



Universidad Católica de Santa María

Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica

Fabricación y caracterización de malla conductiva electrohilada

Tesis presentada por:

Apaza Colca, Fabricio Victor

ORCID: 0009-0001-7125-1195

para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Asesor:

Dr. Alcázar Rojas, Hermann Enrique

ORCID: 0000-0002-7651-9269

Arequipa - Perú

2026

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

INGENIERIA MECANICA, MECANICA-ELECTRICA Y MECATRONICA

TITULACIÓN CON TESIS

DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 04 de Abril del 2026

Dictamen: 017144-C-EPIMMEM-2026

Visto el borrador del expediente 017144, presentado por:

2015241931 - APAZA COLCA FABRICIO VICTOR

Titulado:

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MALLA CONDUCTIVA ELECTROHILADA

Nuestro dictamen es:

APROBADO

Título Profesional/Título de Segunda Especialidad/Grado Académico a optar:

INGENIERO MECÁNICO

**21535915 - DONAYRE CAHUA JESUS MANUEL
DICTAMINADOR**



**29685318 - CASTRO VALDIVIA JORGE LUIS
DICTAMINADOR**



**29529560 - CACERES NUÑEZ AUGUSTO EMILIO CARLOS
DICTAMINADOR**



FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MALLA CONDUCTIVA ELECTROHILADA

INFORME DE ORIGINALIDAD

10%	9%	4%	3%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	Submitted to Universidad Católica de Santa María Trabajo del estudiante	1%
2	repositorio.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	ri-ng.uaq.mx Fuente de Internet	1%
4	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1%
5	www.dspace.espol.edu.ec Fuente de Internet	<1%
6	repositorioinstitucional.uabc.mx Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorioinstitucional.buap.mx Fuente de Internet	<1%

DEDICATORIA

Le dedico esta tesis a mis padres Victor y Felicita, quienes hicieron posible que yo estudiara esta carrera, quienes me han dado su apoyo incondicional durante todo el proceso. A Henry W. y Elisa P. por su invaluable mentoría y tutela. Gracias a ellos es que tengo más oportunidades y libertad de escoger el camino hacia un futuro próspero y gratificante.



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi más profundo agradecimiento a mis padres, Victor y Felicita, por su gran apoyo y confianza puestas en mí durante todo este proceso académico. A mi abuelita Esperanza, quien me acompañó en mis horas de estudio y ahora se encuentra descansando. A quien en mi infancia me ayudó a descubrir mi pasión por las matemáticas. Y finalmente a mis padrinos por su exigencia y orientación me sirvieron para dar los primeros pasos en mi vida profesional.

A mis docentes en general quienes se encargan de transmitir conocimientos a la comunidad y que a lo largo de estos cinco años de carrera me revelaron la belleza de la ciencia y sus alcances. A mis compañeros de laboratorio por su apoyo desinteresado y por mostrarme que el trabajo en investigación es colaborativo. Finalmente, un agradecimiento especial a los ingenieros Hermann Alcázar, Jorge Castro y Dulce Medina por su mentoría.

RESUMEN

La presente investigación se centra en la fabricación y caracterización de una malla polimérica conductiva producida mediante la técnica de electrohilado, empleando fluoruro de polivinilideno (PVDF) como matriz y grafeno como agente funcionalizador de conductividad eléctrica. El objetivo fue optimizar los parámetros del proceso de electrohilado para obtener nanofibras uniformes y, posteriormente, conferirles propiedades eléctricas mediante un tratamiento de inmersión y sonicación. Para la etapa de fabricación, se empleó un diseño de experimentos (DoE) del tipo Box-Behnken, evaluando variables críticas como la concentración de la solución, el voltaje aplicado, la distancia al colector y la relación de solventes (DMAc: Acetona). Los resultados del análisis estadístico permitieron identificar cuáles son condiciones óptimas de concentración de PVDF y voltaje para minimizar defectos morfológicos. La caracterización eléctrica de las mallas funcionalizadas mostró una reducción significativa en la resistencia, alcanzando valores promedio de conductividad de 6.5×10^{-6} S/m tras un proceso de sonicación de 8 horas. Se concluye que la combinación del control de parámetros de hilado y la correcta dispersión del grafeno permite obtener membranas con potencial aplicación en el desarrollo de sensores flexibles y dispositivos electrónicos de bajo costo.

Palabras Clave: Membrana electrohilada, funcionalización eléctrica, cono de Taylor.

ABSTRACT

This research focuses on the fabrication and characterization of a conductive polymer mesh produced by electrospinning, using polyvinylidene fluoride (PVDF) as the matrix and graphene as the electrical conductivity functionalizing agent. The main objective was to optimize the electrospinning process parameters to obtain uniform nanofibers and subsequently impart electrical properties to them through immersion and sonication treatments. For the fabrication stage, a Box-Behnken design of experiments (DoE) was employed, evaluating critical variables such as solution concentration, applied voltage, distance to the collector, and solvent ratio (DMAc: Acetone). The results of the statistical analysis allowed the identification of optimal PVDF concentration and voltage conditions to minimize morphological defects. Electrical characterization of the functionalized meshes showed a significant reduction in resistance, reaching average conductivity values of 6.5×10^{-6} S/m after an 8-hour sonication process. It is concluded that the combination of controlled spinning parameters and proper graphene dispersion allows us to produce membranes with potential applications in the development of flexible sensors and low-cost electronic devices.

Keywords: Electrospun membrane, electrical functionalization, Taylor cone.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN	1
1. MARCO METODOLÓGICO	3
1.1. Descripción del Problema	3
1.2. Hipótesis.....	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo General	5
1.3.2. Objetivos Específicos	5
1.4. Variables	6
1.4.1. Variables Independientes	6
1.4.2. Variables Dependientes.....	6
1.5. Justificación.....	6
1.5.1. Justificación Ambiental.....	6
1.5.2. Justificación Tecnológica.....	7
1.5.3. Justificación Económica.....	7
1.5.4. Justificación Social.....	8
1.6. Alcance de la Investigación	8
1.7. Limitaciones de la Investigación.....	9
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1. Marco Referencial de la Investigación.....	11
2.1.1. Definición de Electrohilado	11

2.1.2. Fundamentos Físicos del Proceso	11
2.1.3. Tipos de Electrohilado	13
2.1.3.1. Electrohilado Convencional	13
2.1.3.2. Electrohilado sin Aguja:.....	14
2.1.3.3. Electrohilado Coaxial.....	14
2.1.4. Propiedades de las Membranas Electrohiladas	15
2.1.4.1. Propiedades Mecánicas.	15
2.1.4.2. Propiedades de Superficie y Humectabilidad:	16
2.1.4.3. Propiedades eléctricas y dieléctricas:.....	17
2.1.4.4. Propiedades Térmicas:	18
2.1.5. Síntesis del Electrohilado	18
2.1.6. Parámetros de la Solución Polimérica.....	18
2.1.6.1. Concentración y viscosidad	18
2.1.6.2. Conductividad y Tensión Superficial	19
2.1.6.3. Naturaleza del Polímero y Disolvente	19
2.1.7. Parámetros de Proceso de Electrohilado	19
2.1.7.1. Voltaje Aplicado	19
2.1.7.2. Velocidad de Flujo.....	20
2.1.7.3. Distancia de Aguja al Colector	20
2.1.7.4. La Temperatura Ambiental.....	20
2.1.7.5. La Humedad Relativa	20
2.1.8. Electrohilado Conductivo y sus Aplicaciones.....	21
2.1.8.1. Aplicaciones de Almacenamiento de Energía.....	22
2.1.8.2. Aplicaciones en Sensores y Electrónica Portátil.....	22
2.1.8.3. Aplicaciones Biomédicas y en Ingeniería de Tejidos	23

2.1.8.4. Aplicaciones Medioambientales y de Filtración	24
2.1.9. Materiales Comunes para Electrohilado Conductivo	24
2.1.9.1. Polímeros Intrínsecamente Conductores	24
2.1.9.2. Polímeros No Conductores Funcionalizados.....	25
2.1.9.3. Aditivos Conductivos	26
2.1.10. Técnicas de Post-Procesamiento	27
2.1.10.1. Reticulación.....	27
2.1.10.2. Tratamiento térmico	27
2.1.10.3. Estiramiento Mecánico	27
2.1.10.4. Recubrimientos Superficiales	28
2.1.11. Caracterización de Nanofibras Electrohiladas	28
2.1.11.1. Caracterización Morfológica y Geométrica	28
2.1.11.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/FESEM)	28
2.1.11.3. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)	29
2.1.11.4. Área Superficial (BET).....	29
2.1.12. Caracterización Química y Estructural	29
2.1.12.1. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)	29
2.1.12.2. Difracción de Rayos X (XRD)	29
2.1.13. Caracterización Mecánica y Eléctrica	30
2.1.13.1. Pruebas de Tracción	30
2.1.13.2. Medición Eléctrica.....	30
3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO	32
3.1. Materiales y Equipos.....	32
3.1.1. Insumos Reactivos.....	32
3.1.2. Equipos.....	32

3.1.3. Materiales	32
3.2. Metodología de Síntesis	33
3.2.1. Preparación de Solución	33
3.2.2. Proceso de Electrohilado	34
3.2.3. Funcionalización eléctrica	35
3.3. Método de Investigación	36
3.4. Variables	36
3.4.1. Variables Independientes	36
3.4.2. Variables Dependientes	36
3.5. Análisis Estadístico	36
3.6. Diseño Box-Behnken para 4 Factores	37
3.6.1. Región de Seguridad	37
3.6.2. Evaluación de Curvatura	37
3.6.3. Selección de Factores y Niveles Experimentales	37
3.7. Matriz Experimental	38
3.8. Análisis Estadístico y Optimización de Superficie de Respuesta	39
3.9. Optimización y Validación del Modelo	39
4. RESULTADOS	41
4.1. Resultados de la Preparación de la Solución	41
4.2. Ensayos Preliminares	43
4.2.1. Ensayo 01	44
4.2.2. Ensayo 02	45
4.2.3. Ensayo 03	46
4.2.4. Ensayo 04	47
4.2.5. Ensayo 05	48

4.2.6. Ensayo 06	49
4.2.7. Ensayo 07	50
4.2.8. Ensayo 08	52
4.3. Selección de Variables	53
4.4. Diseño Box Behnken	58
4.5. Análisis de Diseño De Superficie de Respuesta	63
4.6. Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta	68
4.7. Sonicación del Grafeno	71
4.7.1. Muestra G01	73
4.7.2. Muestra G02	76
4.7.3. Muestra G03	77
4.7.4. Muestra G04	78
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	80
5.1. Hallazgos en Pruebas Preliminares	80
5.1.1. Viscosidad y Obstrucción	80
5.1.2. Contraste Morfológico	80
5.2. Análisis del Diseño Box-Behnken	80
5.2.1. La Interacción Crítica (Concentración - Voltaje)	80
5.2.2. Efecto de la Concentración	81
5.3. El Coeficiente de Variación como Predictor de la Calidad Morfológica	81
5.4. Evaluación de la Resistencia Eléctrica	81
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES	88
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Componentes del Electrohilado.....</i>	13
Figura 2	<i>Electrohilado coaxial</i>	15
Figura 3	<i>Agitación Magnética.....</i>	42
Figura 4	<i>Operación de electrohilado de ensayo M01</i>	44
Figura 5	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M01</i>	44
Figura 6	<i>Operación de Electrohilado de Ensayo M02</i>	45
Figura 7	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M02</i>	46
Figura 8	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M03</i>	47
Figura 9	<i>Evaluación en microscopía electrónica de barrido de ensayo M04</i>	48
Figura 10	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M05</i>	49
Figura 11	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M06.....</i>	50
Figura 12	<i>Operación de Electrohilado de Ensayo M07</i>	51
Figura 13	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M07.....</i>	51
Figura 14	<i>Operación de Electrohilado de Ensayo M08</i>	52
Figura 15	<i>Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M08.....</i>	53
Figura 16	<i>Formación del cono de Taylor respecto al voltaje y distancia al colector</i>	56
Figura 17	<i>Micrografía de muestra B18.....</i>	60
Figura 18	<i>Diagrama de Caja y Bigotes de Diámetros de Fibras</i>	62
Figura 19	<i>Análisis de diseño de superficie de respuesta en software Minitab</i>	63
Figura 20	<i>Diagrama de Pareto de superficie de respuesta</i>	66
Figura 21	<i>Gráficos de superficies de respuesta 3D y gráficos de contorno 2D del análisis de superficie de respuesta</i>	67
Figura 22	<i>Gráfica de optimización de Coeficiente de Varianza</i>	69
Figura 23	<i>Micrografía de Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta.</i>	70

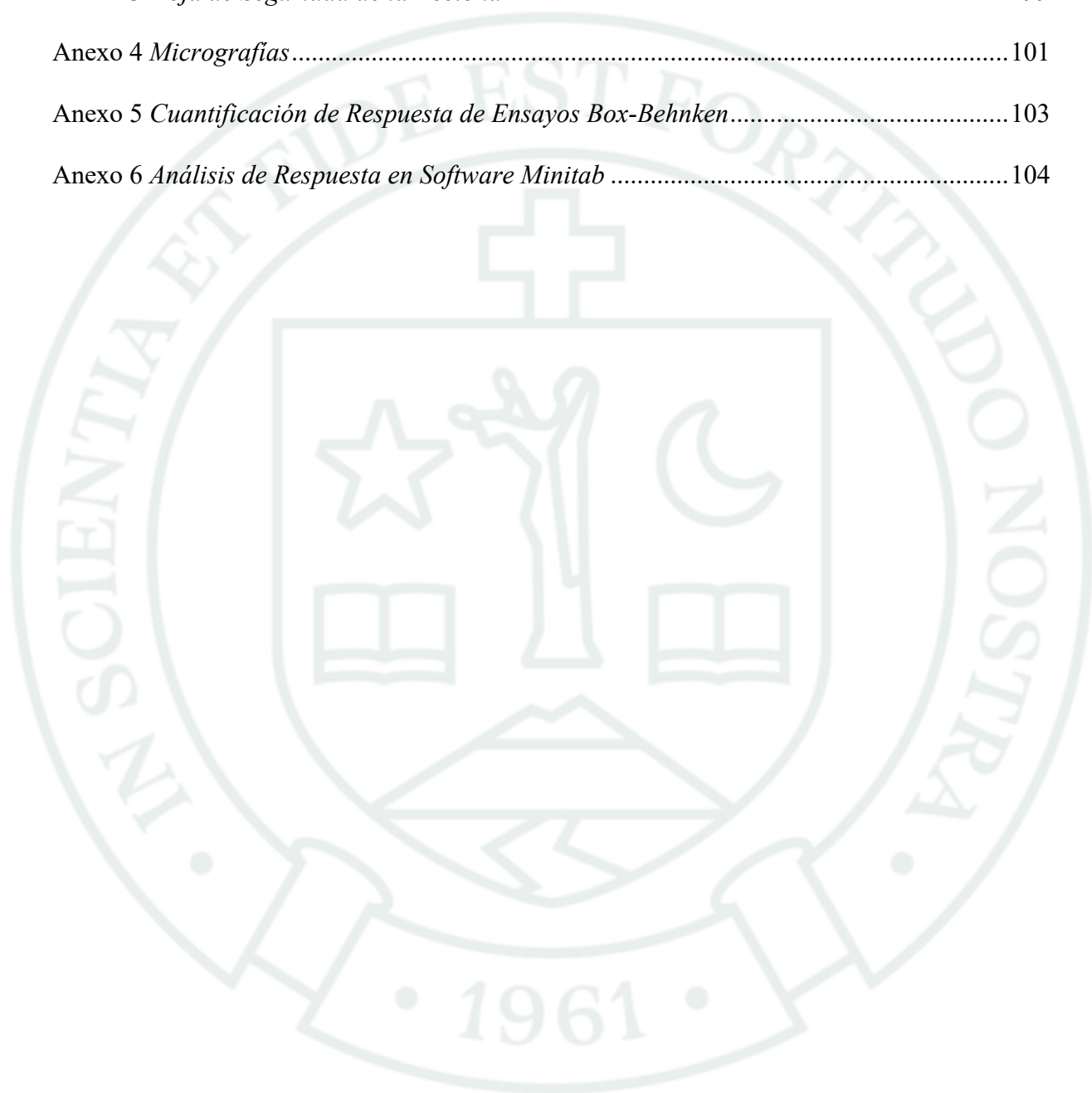
Figura 24	<i>Micrografía SEM de Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta</i>	70
Figura 25	<i>Polvo de Grafeno</i>	71
Figura 26	<i>Dispersión de grafeno en agua destilada</i>	72
Figura 27	<i>Sonicación de Membrana Electrohilada</i>	72
Figura 28	<i>Extracción de Membrana Electrohilada G01</i>	73
Figura 29	<i>Microscopía de Membrana Electrohilada G01</i>	74
Figura 30	<i>Papel filtro de 8 μm</i>	74
Figura 31	<i>Filtración de Grafeno</i>	75
Figura 32	<i>Microscopía de Membrana Electrohilada G01</i>	76
Figura 33	<i>Muestra G02 con Marco para Sonicación</i>	77
Figura 34	<i>Muestra G02 Sonicada</i>	77
Figura 35	<i>Muestra G03 Sonicada</i>	78
Figura 36	<i>Muestra G04 Sonicada</i>	78
Figura 37	<i>Medición de Resistencia Eléctrica</i>	82
Figura 38	<i>Diagrama de cajas y bigotes de resistencia eléctrica de muestra G04</i>	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Comparativa de los Parametros en el Electrohilado</i>	21
Tabla 2	<i>Comparativa Entre Tipos de Electrohilado</i>	26
Tabla 3	<i>Pasos para la elaboración de la solución</i>	33
Tabla 4	<i>Procedimiento para la elaboración del electrohilado</i>	34
Tabla 5	<i>Procedimiento del Proceso de Dopado de Grafeno</i>	35
Tabla 6	<i>Factores y niveles codificados para el diseño Box-Behnken</i>	38
Tabla 7	<i>Matriz Experimental de Electrohilado</i>	38
Tabla 8	<i>Soluciones Preliminares</i>	41
Tabla 9	<i>Primeras Observaciones del Electrohilado</i>	43
Tabla 10	<i>Niveles de variables independientes para metodología Box-Behnken</i>	58
Tabla 11	<i>Orden de ensayos para el diseño Box-Behnken</i>	59
Tabla 12	<i>Cuantificación de Morfología de Fibras</i>	61
Tabla 13	<i>Resumen del Modelo</i>	64
Tabla 14	<i>Mediciones de Resistencia Eléctrica</i>	83
Tabla 15	<i>Rangos y Promedio de Conductividad de Muestra G04</i>	86

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 <i>Hoja de Seguridad del Fluoruro de Polivinilideno</i>	95
Anexo 2 <i>Hoja de Seguridad del Dimetilacetamida</i>	98
Anexo 3 <i>Hoja de Seguridad de la Acetona</i>	99
Anexo 4 <i>Micrografías</i>	101
Anexo 5 <i>Cuantificación de Respuesta de Ensayos Box-Behnken</i>	103
Anexo 6 <i>Análisis de Respuesta en Software Minitab</i>	104



ABREVIATURAS

BBD	Diseño Box-Behnken
CNTs	Nanotubos de carbono
CV	Coeficiente de variación
DMAc	Dimetilacetamida
DoE	Diseño de experimentos
EIS	Espectroscopía de impedancia electroquímica
FESEM	Microscopía electrónica de barrido por emisión de campo
FTIR	Espectroscopía Infrarroja por transformada de Fourier
GO	Óxido de grafeno
PAN	Poliacrilonitrilo
PANI	Polianilina
PCL	Policaprolactona
PEDOT	Poli(3,4-etilendioxitiofeno)
PENGs	Nanogeneradores piezoeléctricos
PPy	Polipirrol
PVA	Alcohol polivinílico
PVDF	Fluoruro de polivinilideno
rGO	Óxido de grafeno reducido
RSM	Metodología de superficie de respuesta
SEM	Microscopía electrónica de barrido
TEM	Microscopía electrónica de transmisión
TENGs	Nanogeneradores triboeléctricos
TPU	Poliuretano termoplástico
XRD	Difracción de rayos X

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[cm ²]
V	Voltaje	[kV]
R	Resistencia eléctrica	[MΩ]
E	Diámetro de fibra electrohilada	[μm]
L	Longitud entre aguja y colector	[cm]
P	Peso molecular	[g/mol]
ω	Revoluciones por minuto	[rpm]
F	Flujo de solución del polímero	[ml/h]
HPI	Hilo previo a la inestabilidad	[cm]

INTRODUCCIÓN

El uso del electrohilado abre un abanico de posibilidades fascinantes en la ciencia de materiales, permitiendo crear mallas de nanofibras que son increíblemente ligeras, extremadamente porosas y con una superficie de contacto enorme en relación con su volumen. Cuando logramos que estas estructuras dejen de ser solo polímeros aislantes y se vuelvan conductivos, obtenemos un material capaz de integrarse en tecnología de punta, como sensores que se adaptan a la piel, electrodos que "respiran" o dispositivos electrónicos que pueden doblarse sin romperse. Esta se logra crear aplicando un voltaje muy alto a una pequeña gota de solución de polímero, la carga eléctrica supera la tensión superficial, expulsando un chorro fino que se estira y formando una punta cónica llamada cono de Taylor. Las fibras que salen de este cono se depositan en el colector de forma caótica secándose casi al instante, formando así una malla de fibras de tamaño nanométrico.

En este presente trabajo se buscaron las variables que den la mejor respuesta morfológica de la malla electrohilada, no se intentaron combinaciones al azar, para esto se optó por usar la metodología de superficie de respuesta. Esta metodología estadística nos permite realizar una cantidad reducida de experimentos para mapear cómo interactúan variables críticas y predecir una respuesta óptima. El objetivo fue identificar con métodos estadísticos qué condiciones generan fibras uniformes y además evitando que aparezcan defectos como perlas o "beads" que arruinen la estructura. Finalmente, se buscó un tratamiento de funcionalización eléctrica usando grafeno. Las partículas del grafeno son excepcionalmente buenas transportando electrones por lo cual, mediante vibraciones ultrasónicas, se buscó que el grafeno se ancle a las fibras y cree puentes eléctricos que permitan el paso de la corriente.



CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO

1. MARCO METODOLÓGICO

1.1. Descripción del Problema

El electrohilado surgió como una técnica versátil para la fabricación de nanofibras. Este proceso, que utiliza la fuerza electrostática para estirar soluciones de polímeros y transformarlas en membranas de fibras ultrafinas. Gracias a esta podemos obtener materiales con una relación superficie-volumen extraordinariamente alta, alta porosidad, buenas propiedades mecánicas. Estas características dan paso a desarrollos científicos en áreas como sistemas de filtración, medicina regenerativa, electrónica flexible y el almacenamiento de energía (Cheng et al., 2023).

Las nanofibras poliméricas presentan características morfológicas y estructurales muy atractivas pero su aplicación en tecnologías avanzadas tiene una desventaja, la mayoría de los polímeros con los que se fabrican son malos conductores de electricidad. Los materiales más comunes en este campo, como la policaprolactona, el fluoruro de polivinilideno o el poliacrilonitrilo que tienen una capacidad de transportar carga eléctrica de manera ineficiente, lo que reduce la utilidad en dispositivos que demandan esta propiedad (Mercante et al., 2023).

Son varios los campos en los que la incorporación de materiales conductivos marca una diferencia sustancial. En el campo de la ingeniería de tejidos resulta indispensable contar con andamios capaces de replicar las condiciones eléctricas de una matriz extracelular presente en tejidos con actividad biológica. Un sustrato con propiedades electroactivas favorece que las células se reproduzcan y potencia el desarrollo del tejido en regeneración y eleva el rendimiento de los implantes una vez integrados en el organismo. Por otro lado, en el sector de la electrónica flexible requiere de componentes que sean ligeros, maleables y al mismo tiempo que tengan capacidades eléctricas como sensores, actuadores y elementos conductores para dispositivos de uso corporal, los cuales requieren materiales que no

sacrifiquen la funcionalidad por la comodidad. En este contexto, las nanofibras conductivas son una elección muy prometedora, ya que permiten diseñar dispositivos donde la respuesta electrónica se encuentra a la par con una notable capacidad de adaptación a superficies irregulares y/o en movimiento (Adabavazeh et al., 2025).

No obstante, la fabricación de mallas electrohiladas que tengan propiedades eléctricas junto con propiedades mecánicas y buena morfología presenta distintos desafíos. Existe la dificultad para mantener una integridad mecánica al someter a los procesos para proporcionar propiedades conductivas como elevar temperatura o someterlos a ciertas presiones. Los rellenos conductores como el grafeno o los nanotubos de carbono pueden ocasionar la reducción de resistencia de la estructura poliméricas (Adabavazeh et al., 2025).

Adicionalmente, el proceso de fabricación se enfrenta a obstáculos como la distribución homogénea de los rellenos conductores. Si estos materiales se agregan a la solución de hilado en un solo paso, tienden a aglomerarse debido a las fuertes interacciones entre sus partículas, lo que resulta en una red de nanofibras con conductividad heterogénea y propiedades mecánicas comprometidas (Baji et al., 2013).

Para poder determinar que las condiciones del proceso de electrohilado son las correctas se usarán Microscopio electrónico de barrido (SEM) y Espectroscopio infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

Este trabajo de tesis centra en la creación de una membrana electrohilada que tenga un grado de conductividad necesario para ser usado diferentes campos ya mencionados, por el mismo motivo se busca un grado de resistencia adecuado debido a que métodos de posprocesado pueden reducir su resistencia mecánica.

1.2. Hipótesis

Es posible obtener membranas poliméricas conductoras de PVDF mediante la técnica de electrohilado y sonicación con grafeno, cuya morfología uniforme y conductividad eléctrica están determinadas significativamente por la interacción entre la concentración de la solución y el tiempo de tratamiento por sonicación.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar y optimizar una membrana polimérica conductora mediante la técnica de electrohilado funcionalizada con grafeno y mediante el método de diseño de experimentos Box-Behnken.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar una membrana mediante la técnica de electrohilado con una morfología uniforme y reduciendo defectos en las fibras.
- Evaluar la influencia estadística de las variables del proceso mediante método de diseño de experimentos Box-Behnken, identificando los factores y las interacciones con mayor impacto en la morfología de las membranas.
- Funcionalizar las membranas con grafeno empleando métodos de inmersión y sonicación para inducir propiedades conductoras en la matriz polimérica.
- Caracterizar la respuesta eléctrica de las membranas resultantes, analizando el efecto del tiempo de sonicación en la reducción de la resistencia eléctrica.

1.4. Variables

1.4.1. Variables Independientes

- Concentración de PVDF
- Relación DMAc y acetona
- Voltaje de electrohilado
- Distancia al colector
- Calibre de aguja
- Velocidad de giro del colector
- Tiempo de sonicación
- Temperatura de sonicación

1.4.2. Variables Dependientes

- Morfología de las fibras
- Conductividad eléctrica

1.5. Justificación

1.5.1. Justificación Ambiental

La técnica de electrohilado, central en este trabajo, se alinea con los principios de la producción sostenible. Este método se distingue por su eficiencia energética y por la posibilidad de realizarse a temperatura ambiente, lo que implica una menor emisión de gases de efecto invernadero con respecto a otros tipos de técnica de nano fabricación. La incorporación de nanomateriales carbonosos en bajas concentraciones aprovechando el efecto de percolación permite obtener alta conductividad eléctrica con una mínima utilización de recursos (Bello et al., 2014).

1.5.2. Justificación Tecnológica

La principal motivación de este trabajo es para poder superar restricciones que tienen los materiales convencionales de una sola función. Las membranas desarrolladas con la técnica de electrohilado poseen ventajas diferenciadas con respecto a su estructura porosa y su elevada superficie útil, pero baja capacidad para conducir electricidad la limita de aplicaciones de alto valor tecnológico. Frente a esta situación, la propuesta que se plantea apunta a desarrollar sistemas que combinen ambas propiedades, abriendo posibilidades a tecnologías donde la respuesta eléctrica y la integridad estructural de alta porosidad y flexibilidad. En lo que respecta a los dispositivos flexibles, uno de los principales obstáculos ha sido fabricar sensores ligeros, compatibles con el cuerpo humano y capaces de adaptarse a geometrías no planas y aquí es donde esta tecnología nos ayuda. Del mismo modo, en el área biomédica, la propuesta nos abre el camino a construir estructuras celulares con capacidad de respuesta activa, un recurso clave en la recuperación de tejidos cuyo funcionamiento depende de estímulos eléctricos, entre ellos el tejido muscular del corazón y el sistema nervioso (Mercante et al., 2023).

1.5.3. Justificación Económica

Mirándolo desde el lado económico, una de las ventajas más relevantes de esta técnica es que permite obtener fibras nanométricas de alto valor sin incurrir en costos elevados de producción. Esto se traduce en oportunidades reales para competir en sectores de tecnología de punta.

Existe un beneficio potencial cuando este conocimiento aterrice en el sector productivo, ya sea en empresas de base tecnológica o sirviendo de punto de partida para desarrollos orientados a la fabricación de sensores, materiales avanzados y sistemas de aplicación biomédica. Esto apunta a fortalecer a la economía del conocimiento, donde el

verdadero capital no es la materia prima sino lo que se sabe hacer con ella (Mercante et al., 2023).

1.5.4. Justificación Social

El impacto social de esta investigación toma forma a través de aportes tangibles en salud y bienestar. El sector sanitario es quizás donde este trabajo encuentra su mayor relevancia, con la posibilidad de diseñar apósitos capaces de monitorizar continuamente el estado de una herida, o implantes regenerativos que combinen estimulación eléctrica con integración biológica. De concretarse, estas soluciones podrían sacudir los esquemas terapéuticos actuales, recortando los tiempos que un paciente necesita para recuperarse y, sobre todo, mejorando las perspectivas clínicas a largo plazo. Dicho de otra forma, no se trata solo de innovar por innovar, sino de que esa innovación llegue a tener un efecto real en la vida de las personas (Casado et al., 2020).

Además, la producción de sensores corporales asequibles y no invasivos promueve el acceso a la prevención de salud y su monitoreo personalizado de esta. Esto permite que la ciudadanía participe en el cuidado de su bienestar, abordando de manera proactiva el manejo de enfermedades crónicas y contribuyendo a la sostenibilidad de los sistemas públicos de salud (Casado et al., 2020).

1.6. Alcance de la Investigación

- La obtención de membranas poliméricas mediante la técnica de electrohilado se realiza utilizando exclusivamente fluoruro de polivinilideno (PVDF) como matriz base.
- Se limita el estudio de optimización al uso de un diseño de experimentos Box-Behnken, evaluando cuatro variables operacionales.

- La funcionalización de propiedades eléctricamente conductoras se restringe al método de post-tratamiento por inmersión y sonicación con grafeno, sin evaluar la mezcla previa del nanomaterial en la solución polimérica.
- Las pruebas eléctricas se centran en la medición de la resistencia óhmica de las membranas, analizando el impacto del tiempo de sonicación.
- No se realiza el diseño ni fabricación de un dispositivo electrónico final. Solo se orienta a la validación del material para su potencial uso.

1.7. Limitaciones de la Investigación

- Al no contar con una cámara de clima controlado, no se controla exhaustivamente la humedad relativa ni temperatura de ambiente.
- Esta investigación no incluye la cuantificación de la resistencia eléctrica del polímero, centrándose exclusivamente en la conductividad eléctrica inducida por el grafeno.
- No se realizaron pruebas de degradación, ni de resistencia mecánica, limitándose a la caracterización del material en estado inicial.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se desarrollarán las bases teóricas y procedimiento fundamental del proceso del electrohilado, así como las técnicas de posprocesamiento.

2.1. Marco Referencial de la Investigación

2.1.1. Definición de Electrohilado

El electrohilado es una técnica para generar fibras poliméricas en rangos de escala micra hasta nanométrica que utiliza fuerzas electrostáticas. Esta técnica permite obtener mallas con alta porosidad y relación superficie-volumen, características que resultan muy útiles para el desarrollo de tecnologías avanzadas en campos como el biomédico, electrónico, y otros.

Los antecedentes del electrospinning se remontan a finales del siglo XIX, cuando Rayleigh sentó las primeras bases al estudiar el comportamiento de chorros de fluidos bajo la influencia de campos eléctricos. Años más tarde, Zeleny formalizó matemáticamente el proceso, y fue Formhals quien, en 1934, lo patentó e introdujo mejoras concretas en el control del equipo. Aunque distintos investigadores retomaron la técnica con el tiempo, su protagonismo actual responde sobre todo al auge de los nanomateriales, campo donde el electrospinning se ha ganado un lugar por su capacidad de producir nanofibras de distintos materiales de forma eficiente y sin costos excesivos (Duque Sánchez et al., 2013).

Las nanofibras obtenidas mediante electrohilado presentan aplicaciones que van desde la ingeniería de tejidos y la liberación controlada de fármacos, hasta su uso en sistemas de filtración y textiles técnicos. Alrededor de dos terceras partes de las patentes en este campo se establecen en el área biomédica (Villanueva et al., 2020).

2.1.2. Fundamentos Físicos del Proceso

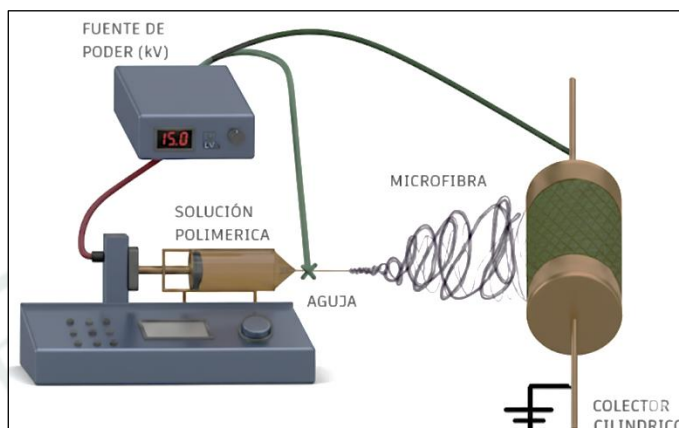
El electrohilado es un proceso donde una solución polimérica es sometida a un campo eléctrico de alta tensión hasta convertirse en fibras de escala nanométrica. El equipo que hace

posible esto consta de una fuente de alto voltaje, una jeringa con bomba para controlar el flujo del solvente, y un rodillo o placa que actúa como colector donde se depositan las fibras. Cuando el voltaje entra en juego se genera una diferencia de potencial entre el colector y la aguja. Por un lado, la tensión superficial, que trata de mantener la gota redonda y en su sitio, por otro, la fuerza electrostática tira con fuerza hacia el colector hasta que finalmente la vence y el chorro sale disparado y se acumulan las fibras dando como resultado las mallas (Villanueva et al., 2020).

Al alcanzar un "voltaje crítico", la fuerza electrostática supera la tensión superficial, y la gota se estira formando un hilo y más adelante un cono distintivo conocido como el cono de Taylor. Desde el vértice de este cono, un chorro fino de polímero cargado es expulsado en dirección al colector. Aunque inicialmente el chorro tiene una trayectoria recta, rápidamente entra en una fase de inestabilidad, conocida como la inestabilidad de batido (Mokhtari et al., 2025). Este movimiento caótico y de alta frecuencia es el fenómeno clave del proceso, ya que estira el chorro de polímero en varias direcciones, adelgazándolo exponencialmente mientras el disolvente se evapora rápidamente llegando a diámetros de orden nano. Al final de su trayectoria, el chorro solidificado, ya convertido en una nanofibra, se deposita sobre el colector como se puede observar en Figura 1. La naturaleza aleatoria o alineada de la deposición depende de la configuración del colector utilizado, lo que permite un control adicional sobre la arquitectura del producto final.

Figura 1

Componentes del Electrohilado



Nota. Para llevar a cabo el proceso de electrohilado se requiere de cinco componentes, elaboración propia.

2.1.3. Tipos de Electrohilado

A lo largo del tiempo, el electrohilado ha mostrado una capacidad de adaptación bastante amplia, lo que ha llevado a que se desarrollen distintas configuraciones para responder a retos como, construir estructuras con geometrías más elaboradas, o bien incorporar materiales que cumplan varias funciones a la vez. A continuación, se mencionan los tipos electrohilado según la forma de expulsión del solvente al colector.

2.1.3.1. Electrohilado Convencional

El método que emplea una boquilla única para generar un único chorro de polímero, esta es la configuración más utilizada. Su elección frente a otras radica en lo sencillo que resulta montarla y operarla y además que produce nanofibras bastante uniformes, con diámetros consistentes que no varían demasiado de una fibra a otra. Por eso se ha convertido en el sistema de referencia cuando se trabaja en laboratorio. Dicho esto, tiene una desventaja significativa, la lenta producción. Esta limitación en la tasa de producción complica dar el salto hacia una fabricación a mayor escala, donde los

volúmenes que exige la industria están muy por encima de lo que ofrece esta configuración (Mercante et al., 2023).

2.1.3.2. Electrohilado sin Aguja:

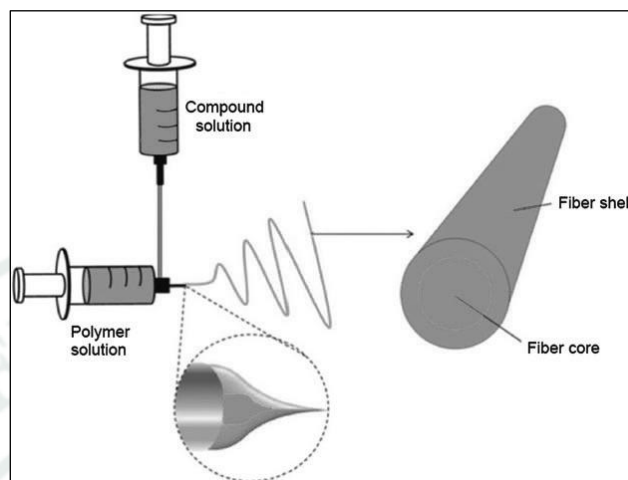
A diferencia de los sistemas convencionales que utilizan boquillas, esta variante emplea superficies cargadas (cilindros, discos o espirales) sumergidas en la solución polimérica para generar múltiples chorros de forma simultánea. Claro que esta mejora en rendimiento tiene su precio. Las nanofibras que se obtienen suelen ser menos uniformes y con diámetros más dispersos. Aun así, el salto en productividad es tan considerable que lo convierte en una opción bastante atractiva para producción industrial, especialmente cuando se trata de fabricar medios filtrantes en grandes volúmenes. Esta dicotomía entre eficiencia y control define su idoneidad para aplicaciones específicas (Syed et al., 2025).

2.1.3.3. Electrohilado Coaxial

Emplea boquillas de diseño concéntrico como se puede observar en la Figura 2, permite la fabricación de nanofibras con morfología núcleo-cubierta. Esta técnica resulta particularmente ventajosa para tres aplicaciones fundamentales: la encapsulación protectora de agentes bioactivos para su liberación controlada, la obtención de fibras huecas mediante la eliminación selectiva del núcleo, y la combinación sinérgica de propiedades mecánicas y funcionales mediante la integración de materiales complementarios en una única estructura fibrilar (Qin, 2017).

Figura 2

Electrohilado coaxial



Nota. Para llevar a cabo el proceso de electrohilado coaxial se requiere de cuatro componentes, elaboración propia.

2.1.4. Propiedades de las Membranas Electrohiladas

Las características finales de los materiales obtenidos por electrohilado no dependen exclusivamente de la composición química del polímero base, sino que se encuentran profundamente determinadas por la nano-arquitectura y la morfología resultante del proceso de fabricación.

2.1.4.1. Propiedades Mecánicas.

Las membranas de nanofibras manifiestan un comportamiento mecánico excepcional, caracterizado por elevada resistencia a la tracción, módulo de Young considerable y notable flexibilidad. Estos atributos derivan principalmente de la alta orientación molecular que las cadenas poliméricas adquieren a lo largo del eje fibrilar durante el intenso estiramiento uniaxial. Cabe destacar que la presencia de defectos morfológicos, como la formación de "beads" o perlas, compromete la integridad estructural de la red fibrilar, reduciendo significativamente tanto la resistencia mecánica como la deformación máxima antes de la fractura. La correlación entre el diámetro fibrilar y las propiedades mecánicas constituye un aspecto fundamental.

Estudios experimentales demuestran que fibras de diámetro nanométrico presentan mayor grado de orientación macromolecular y, consecuentemente, superior resistencia y rigidez. La adición de refuerzos nanoscópicos, como nanotubos de carbono (CNT) o nanocristales de celulosa (CNC), puede potenciar estas propiedades mediante mecanismos de transferencia de carga y restricción de la movilidad molecular. Sin embargo, concentraciones excesivas de estos aditivos pueden inducir fenómenos de aglomeración que, contrariamente al efecto esperado, deterioran las propiedades mecánicas al actuar como puntos de concentración de tensiones e impedir el adecuado empaquetamiento molecular. Este fenómeno se ha observado en nanocompuestos de PVDF con montmorillonita (MMT), donde la aglomeración de nanopartículas redujo la resistencia mecánica al limitar la disolución de portadores iónicos y el entrelazamiento efectivo de las cadenas poliméricas (Baji et al., 2013).

2.1.4.2. Propiedades de Superficie y Humectabilidad:

Los polímeros como el PVDF y la policaprolactona (PCL) presentan inherentemente carácter hidrofóbico, es posible modificar esta propiedad mediante estrategias de funcionalización. Entre estas destaca la incorporación de polímeros hidrofílicos como el quitosano, o la aplicación de recubrimientos superficiales funcionales. Un caso paradigmático es el uso de polidopamina (PDA), la cual no solo incrementa la hidrofiliidad superficial, sino que además confiere capacidades adsorbentes y selectivas para aplicaciones en purificación de aguas (Rastegardoost et al., 2023). Cabe resaltar que las condiciones ambientales durante el proceso de electrohilado, particularmente la humedad relativa, pueden emplearse estratégicamente para modular la morfología superficial. Niveles elevados de humedad inducen la formación de poros circulares en la superficie de las nanofibras, resultado de la condensación de vapor de agua durante la evaporación del solvente. Este fenómeno, lejos de ser

aleatorio, puede aprovecharse como una herramienta de ingeniería para diseñar materiales con funcionalidades específicas. La posibilidad de "programar" la humectabilidad desarrollando membranas con características superhidrofílicas (Mokhtari et al., 2025).

2.1.4.3. Propiedades eléctricas y dieléctricas:

Las características eléctricas y dieléctricas de los materiales obtenidos mediante electrohilado revisten especial relevancia para su implementación en electrónica flexible y sistemas sensores. Esta técnica permite modificar estratégicamente el comportamiento de polímeros, que pueden clasificarse en dieléctricos (aislantes) o conductores, mediante diferentes enfoques de funcionalización. La conferencia de conductividad eléctrica a polímeros inherentemente aislantes se logra mediante la incorporación de aditivos conductores, tales como nanotubos de carbono, óxido de grafeno reducido (rGO) o polímeros conductores intrínsecos como polipirrol (PPy) y polianilina (PANI). Un concepto fundamental en este proceso es el umbral de percolación, que corresponde a la concentración crítica mínima de aditivo requerida para establecer una red conductora interconectada que facilite el transporte electrónico. La morfología nanofibrosa confiere una ventaja significativa en este contexto, ya que la elevada relación de aspecto de refuerzos unidimensionales (como los CNT) y la extensa área superficial de las nanofibras permiten alcanzar dicho umbral con concentraciones sustancialmente inferiores a las necesarias en sistemas masivos. Esta característica posibilita el desarrollo de materiales compuestos con funcionalidad eléctrica, manteniendo simultáneamente las propiedades mecánicas inherentes de la matriz polimérica (Sabet Bokati & Zebarjad, 2025).

2.1.4.4. Propiedades Térmicas:

El proceso de electrohilado induce modificaciones significativas en el comportamiento térmico de los materiales. La solidificación ultrarrápida del chorro polimérico durante la evaporación del solvente puede generar una reducción en el grado de cristalinidad respecto al material original en forma masiva. Asimismo, la incorporación de aditivos nanoestructurados puede alterar sustancialmente parámetros como la temperatura de fusión y el porcentaje de cristalinidad. El entendimiento de estas correlaciones proceso-estructura-propiedad permite el diseño racional de materiales con estabilidad térmica optimizada y control preciso sobre la organización molecular interna para aplicaciones específicas (Ojha, 2017).

2.1.5. Síntesis del Electrohilado

La morfología y las características finales de las nanofibras obtenidas mediante electrohilado están determinadas por un balance preciso entre fuerzas físicas y químicas, las cuales se ven influenciadas por tres categorías principales de variables: parámetros de la solución, parámetros de proceso y condiciones ambientales.

2.1.6. Parámetros de la Solución Polimérica

Las propiedades de la disolución polimérica constituyen factores determinantes para el éxito del proceso de electrohilado y la calidad morfológica de las fibras resultantes.

2.1.6.1. Concentración y viscosidad

La concentración del polímero representa el parámetro más significativo para definir la morfología fibrilar. Concentraciones demasiado bajas favorecen el predominio de la tensión superficial, resultando en la formación de microgotas mediante electrospray en lugar de fibras continuas. Al incrementar la concentración, se eleva la viscosidad de la solución debido al mayor entrelazamiento macromolecular, alcanzándose un rango óptimo para la producción de nanofibras continuas y libres de defectos. Por el

contrario, concentraciones excesivas dificultan la extrusión de la solución e impiden la formación estable del chorro polimérico (Khajavi & Abbasipour, 2017).

2.1.6.2. Conductividad y Tensión Superficial

La conductividad iónica de la solución, comúnmente modificada mediante la adición de sales, incrementa la densidad de carga superficial en el chorro, intensificando las fuerzas de repulsión electrostática. Este fenómeno promueve un estiramiento más eficiente del chorro, generando fibras de menor diámetro. Por otro lado, elevados valores de tensión superficial antagonizan este estiramiento, favoreciendo la aparición de defectos morfológicos como la formación de "beads" (Villanueva et al., 2020).

2.1.6.3. Naturaleza del Polímero y Disolvente

La selección del disolvente requiere una capacidad de disolución adecuada del polímero y una volatilidad controlada. Una evaporación demasiado rápida puede provocar la solidificación prematura del chorro, ocasionando obstrucciones en la boquilla y produciendo fibras quebradizas. Por el contrario, una evaporación excesivamente lenta da lugar a la deposición de fibras húmedas en el colector, promoviendo su coalescencia y la formación de películas continuas en lugar de mantos nanofibrosos porosos (Villanueva et al., 2020).

2.1.7. *Parámetros de Proceso de Electrohilado*

Estos parámetros se ajustan directamente en el sistema de electrohilado para optimizar la formación y calidad de las nanofibras.

2.1.7.1. Voltaje Aplicado

La magnitud del voltaje determina la intensidad del campo eléctrico aplicado. Se requiere un voltaje mínimo para vencer la tensión superficial y generar el cono de Taylor. Un valor óptimo favorece el estiramiento eficaz del chorro, produciendo fibras

de diámetro reducido. No obstante, voltajes excesivos pueden inducir inestabilidades en la trayectoria del chorro y promover la aparición de defectos morfológicos.

2.1.7.2. Velocidad de Flujo

Caudales reducidos se consideran ideales para generar fibras delgadas y homogéneas, ya que permiten un tiempo suficiente para la evaporación del disolvente durante la trayectoria. Por el contrario, velocidades de flujo elevadas pueden dar lugar a fibras de mayor diámetro con presencia de defectos, debido a una evaporación incompleta del solvente.

2.1.7.3. Distancia de Aguja al Colector

Este parámetro es crítico para determinar el tiempo de vuelo del chorro. Debe ser lo suficientemente amplia para permitir la evaporación completa del disolvente antes de que las fibras se depositen en el colector, evitando así su adhesión mutua. Si la distancia es insuficiente, las fibras pueden llegar húmedas al sustrato; si es excesiva, el chorro puede desestabilizarse y fragmentarse antes de alcanzar el colector, particularmente en el caso de fibras de diámetro muy pequeño.

2.1.7.4. La Temperatura Ambiental

Esta incide directamente en la viscosidad de la solución y en la cinética de evaporación del disolvente, afectando consecuentemente la morfología fibrilar y la reproducibilidad del proceso.

2.1.7.5. La Humedad Relativa

Valores elevados de humedad relativa pueden inducir la formación de poros circulares en la superficie de las nanofibras, fenómeno atribuido a la condensación de vapor de agua durante la solidificación del chorro.

Tabla 1*Comparativa de los Parámetros en el Electrohilado*

Parámetros	Efecto en el proceso de electrohilado	Efecto en el diámetro de la fibra	Efecto en la morfología
Concentración del polímero	Aumenta la viscosidad y el entrecruzamiento	Aumenta	Reduce las "beads" y aumenta la continuidad en fibras
Conductividad de la solución	Aumenta las fuerzas electrostáticas	Disminuye	Reduce las "beads" y mejora la uniformidad Puede causar inestabilidad y defectos a voltajes altos
Voltaje aplicado	Aumenta las fuerzas electrostáticas	Disminuye	Puede causar "beads" y fibras húmedas a flujos altos
Velocidad de flujo	Aumenta la cantidad de solución	Aumenta	Fibras húmedas a distancias cortas; ruptura del chorro a distancias muy grandes
Distancia aguja-colector	Afecta el tiempo de vuelo	Varía	Promueve la formación de poros superficiales
Humedad relativa	Efecto indirecto	Efecto indirecto	

Nota. La tabla muestra una comparación a partir de los parámetros de operación presentes en el proceso de electrohilado y cuál es su efecto el proceso y morfología.

2.1.8. Electrohilado Conductivo y sus Aplicaciones

La técnica de electrohilado ya es considerado como un proceso relevante para la fabricación de materiales avanzados, permitiendo el desarrollo de diversas aplicaciones tecnológicas como sensores, dispositivos electrónicos flexibles, sistemas de almacenamiento de energía, blindaje contra interferencias electromagnéticas y aplicaciones biomédicas (Mani et al., 2024).

2.1.8.1. Aplicaciones de Almacenamiento de Energía

El electrohilado permite su desarrollo en el campo de energía portátil gracias a su flexibilidad como técnica que permite fabricar desde nanogeneradores hasta supercondensadores y baterías de alto desempeño, todos ellos son piezas clave en sistemas que necesitan generar o guardar energía de manera eficiente. Con respecto a los nanogeneradores piezoeléctricos, las nanofibras de PVDF reforzadas con materiales como el titanio de bario (BaTiO_3), óxido de grafeno o nanotubos de carbono han mostrado una conversión bastante optimizada de energía mecánica en eléctrica, esto se le puede atribuir a la fase cristalina β . Por su parte, los nanogeneradores triboeléctricos siguen otra lógica, la del contacto entre superficies, compuestos como el PVDF con materiales como sepiolita obtenida de residuos han alcanzado niveles interesantes de voltaje y potencia. Ya en el terreno del almacenamiento, membranas fabricadas con PVDF-HFP y PAN son usadas como separadores en baterías de iones de nueva generación, mejorando tanto la conductividad iónica como la durabilidad del ciclo de carga. Asimismo, las nanofibras de carbono porosas que son sintetizadas a partir de precursores poliméricos emergen como materiales electrodos idóneos para la fabricación de supercondensadores flexibles con elevada capacidad (Kankane et al., 2025).

2.1.8.2. Aplicaciones en Sensores y Electrónica Portátil

La versatilidad del electrohilado permite la creación de una nueva generación de sensores flexibles y dispositivos electrónicos portátiles que interactúan de forma seamless (sin costuras) con el cuerpo humano. Los sensores de presión y deformación se basan en efectos piezoresistivos (cambio de resistencia) o piezoeléctricos (generación de voltaje), donde composites de polímeros como TPU o PVDF con aditivos conductores (rGO, PPy) logran detectar presiones mínimas y exhibir alta

sensibilidad y durabilidad (Cheng et al., 2021). En el monitoreo de movimiento y señales fisiológicas, sensores quimiorresistivos basados en nanofibras funcionalizadas permiten la detección inalámbrica de movimientos y parámetros corporales, facilitando la integración en textiles para una monitorización continua y multifuncional. Adicionalmente, la tecnología es crucial para fabricar componentes electrónicos avanzados, como electrodos flexibles y transpirables, calentadores de película transparente con excelentes propiedades óptico-eléctricas, y materiales con conductividad anisotrópica (tipo Janus), esenciales para la electrónica de próxima generación (Mercante et al., 2023).

2.1.8.3. Aplicaciones Biomédicas y en Ingeniería de Tejidos

En el ámbito biomédico, el electrohilado conductivo es esencial para fabricar andamios inteligentes que mimetizan la matriz extracelular y proporcionan estímulos eléctricos para guiar la regeneración tisular. Para la regeneración de tejido nervioso, andamios de polímeros biocompatibles (PCL, PVA) combinados con materiales conductores (PPy, PEDOT) promueven significativamente la proliferación, diferenciación y guía axonal bajo estimulación eléctrica. En la ingeniería de tejido cardíaco, andamios conductores (ej. PEDOT:PSS, PANI) facilitan la comunicación eléctrica entre cardiomiocitos, mejorando su organización estructural, manejo del calcio y contracción sincronizada (Gonzalez et al., 2023). Para el tejido óseo, se aprovecha el efecto piezoeléctrico inherente de materiales como el PVDF o composites con CNTs/GO para generar microcorrientes que estimulan la mineralización y el crecimiento celular. Un desafío central en el diseño de estos andamios es lograr un equilibrio óptimo entre la conductividad eléctrica, las propiedades mecánicas y la biocompatibilidad, a menudo dirigida mediante estrategias

sofisticadas como estructuras core-shell para evitar la citotoxicidad (Cheng et al., 2023).

2.1.8.4. Aplicaciones Medioambientales y de Filtración

Las membranas de nanofibras electrohiladas, gracias a su alta superficie específica y porosidad controlable, son extremadamente efectivas en aplicaciones de remediación ambiental. En la separación de agua y petróleo, membranas funcionalizadas para exhibir humectabilidad selectiva logran separar emulsiones con eficiencias superiores al 99% impulsadas solo por gravedad. Para la adsorción y degradación de contaminantes, composites que incorporan materiales adsorbentes (GO) o fotocatalizadores (ZnO dopado) en una matriz polimérica demuestran una alta capacidad para eliminar metales pesados y degradar colorantes orgánicos bajo irradiación lumínica (Mohd Salleh et al., 2020). En la filtración de aire, las membranas nanofibrosas, a menudo enriquecidas con agentes antibacterianos o antivirales, proveen una eficiencia de filtración excepcional (>99%) contra partículas y patógenos, a la vez que mantienen una baja resistencia respiratoria, lo que las hace ideales para aplicaciones en mascarillas de protección de alto rendimiento (Alaeddin et al., 2025).

2.1.9. *Materiales Comunes para Electrohilado Conductivo*

La técnica de electrohilado demuestra versatilidad al procesar diversos materiales, desde polímeros sintéticos hasta biopolímeros, seleccionados según sus propiedades inherentes y potencial de funcionalización.

2.1.9.1. Polímeros Intrínsecamente Conductores

Materiales como polianilina (PANI), polipirrol (PPy) y poli(3,4-etilendioxitiofeno) (PEDOT) presentan estructuras conjugadas que confieren conductividad eléctrica. Sin embargo, su procesabilidad limitada frecuentemente requiere su combinación con

polímeros aislantes de buena hilabilidad, como policaprolactona (PCL) o alcohol polivinílico (PVA), para obtener nanofibras homogéneas. Estos sistemas se emplean en electrónica flexible y biosensores, aprovechando su conductividad y biocompatibilidad (Mercante et al., 2023).

2.1.9.2. Polímeros No Conductores Funcionalizados

Numerosos polímeros no conductores se emplean como matrices base debido a sus propiedades mecánicas, químicas o biológicas, las cuales pueden modificarse para incorporar funcionalidades específicas.

- **Poli (fluoruro de vinilideno) (PVDF):** Este polímero semicristalino destaca por su estabilidad térmica y química, resistencia mecánica y facilidad de procesamiento. Sus fases electroactivas, particularmente la fase β , lo posicionan como material preferente para aplicaciones piezoeléctricas (Mokhtari et al., 2025).
- **Poliacrilonitrilo (PAN):** Reconocido por su alta resistencia tensil y bajo módulo elástico, el PAN se utiliza frecuentemente como precursor para nanofibras de carbono. Mediante carbonización, las nanofibras de PAN se transforman en redes conductoras aplicables en electrodos para supercondensadores y protección electromagnética (Mercante et al., 2023).
- **Policaprolactona (PCL):** Este biopolímero es valorado por su biocompatibilidad y biodegradabilidad, siendo ideal para andamios tisulares y sistemas de liberación controlada. Su hidrofobicidad puede modificarse mediante aditivos como quitosano para mejorar humectabilidad y adhesión celular (Lizarazo-Fonseca et al., 2019).

El siguiente cuadro muestran las principales diferencias entre materias primas para electrohilado:

Tabla 2*Comparativa Entre Tipos de Electrohilado*

Técnica	Principio	Ventajas	Desventajas
Con aguja	Un chorro desde una aguja	Simplicidad, fibras uniformes y de diámetro estrecho	Baja productividad
Sin aguja	Múltiples chorros desde una superficie cargada	Alta tasa de producción, escalabilidad industrial	Menor uniformidad, fibras de mayor diámetro
Coaxial	Múltiples soluciones desde boquillas concéntricas	Encapsulamiento de sustancias, creación de fibras huecas	Mayor complejidad del equipo, control de parámetros crucial

Nota. La tabla muestra una comparación de los tres tipos de electrohilado, en base al principio de ejecución, sus ventajas y desventajas.

2.1.9.3. Aditivos Conductivos

La funcionalización polímeros aislantes según Kohestani et al. (2024), se realiza mediante la incorporación de aditivos con propiedades específicas:

- **Nanotubos de carbono (CNTs):** Mejoran la conductividad eléctrica y propiedades mecánicas de la matriz polimérica. En PVDF, adicionalmente actúan como nucleantes de la fase β , mejorando la piezoelectricidad.
- **Óxido de grafeno (GO) y su forma reducida (rGO):** Ampliamente utilizados para mejorar su conductividad, resistencia mecánica y actuar como agentes nucleantes para la fase β en polímeros como PVDF.
- **Nanopartículas metálicas:** Partículas de plata (Ag), cobre (Cu) y oro (Au) se incorporan para conferir conductividad, propiedades antimicrobianas y catalíticas, expandiendo aplicaciones en biomedicina y sensores.

2.1.10. Técnicas de Post-Procesamiento

Una vez fabricadas, las membranas de nanofibras pueden ser sometidas a diversas técnicas de posprocesamiento para optimizar sus propiedades finales y conferir nuevas funcionalidades que no se pueden lograr durante el hilado inicial.

2.1.10.1. Reticulación

La reticulación es un proceso que crea enlaces covalentes entre las cadenas poliméricas, mejorando significativamente la estabilidad mecánica, la durabilidad y la resistencia de las membranas a los disolventes, lo cual es fundamental para aplicaciones de filtración y biomédicas. En el caso de polímeros como el PVA, que por su solubilidad en agua tienden a perder estabilidad cuando se exponen a medios acuosos y donde la reticulación resulta especialmente útil. Este proceso, que puede activarse tanto por vías químicas como térmicas, básicamente refuerza la estructura interna de la membrana para que aguante mejor esas condiciones sin degradarse (Mokhtari et al., 2025).

2.1.10.2. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico controlado tras el electrohilado, en el caso del PVDF rondando los 100 °C, mejora tanto la cristalinidad como el ordenamiento interno de las cadenas moleculares. Y en este polímero en particular cobra especial relevancia, porque ese calentamiento postproceso favorece que la estructura cristalina transite de la fase α hacia la fase β , la cual tiene una mayor respuesta piezoeléctrica (Mani et al., 2024).

2.1.10.3. Estiramiento Mecánico

Estirar mecánicamente la membrana una vez formada fuerza a las cadenas poliméricas a reorganizarse mejorando su orientación y cristalinidad. Ahora bien, donde realmente se nota la diferencia es cuando ese estiramiento se combina con un recocido posterior,

porque la sinergia entre ambos procesos permite afinar la estructura del material de una forma que ninguno lograría trabajando solo (Mani et al., 2024).

2.1.10.4. Recubrimientos Superficiales

Recubrir la superficie de las nanofibras es una manera bastante inteligente de agregarles nuevas funcionalidades sin modificar las fibras. Es especialmente útil cuando la aplicación exige una interfaz con características muy concretas, como en sensores o membranas filtrantes. La técnica se desarrolla con la polimerización de materiales conductores sobre la superficie de las fibras, como la polianilina sobre PAN, o la deposición de nanopartículas metálicas (Ag, Cu) mediante inmersión para conferir propiedades conductoras y antimicrobianas (Li et al., 2022).

2.1.11. Caracterización de Nanofibras Electrohiladas

Para poder cuantificar las propiedades de los materiales electrohilados, se necesitan técnicas de caracterización que evalúen desde su morfología hasta sus propiedades físicas para cuantificar su rendimiento funcional.

2.1.11.1. Caracterización Morfológica y Geométrica

Los métodos usualmente usados para la caracterización morfológica, según Zhu et al. (2017), son los siguientes:

2.1.11.2. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM/FESEM)

Puede examinar la topografía de la superficie, evaluar qué tan uniformes son las fibras y detectar defectos como "beads", aglomeraciones en un punto, diámetros excesivamente anchos. Además, permite medir el diámetro promedio de las fibras, un dato que dice mucho sobre cómo influyeron los parámetros de producción en el resultado final.

2.1.11.3. Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

Trabaja haciendo pasar un haz de electrones directamente a través de una muestra muy delgada, lo que le permite generar imágenes con un nivel de detalle difícil de igualar. Gracias a eso, se pueden observar características a escala nanométrica e incluso atómica, convirtiéndolo en una herramienta clave cuando se necesita estudiar la morfología, el grado de cristalinidad o la composición interna de un nanomaterial.

2.1.11.4. Área Superficial (BET)

La técnica de Brunauer-Emmett-Teller permite cuantificar el área superficial y el volumen de poros de las membranas, datos cruciales para predecir su rendimiento en aplicaciones de filtración, catálisis y adsorción.

2.1.12. Caracterización Química y Estructural

2.1.12.1. Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica que permite identificar qué grupos funcionales están presentes en un material y cómo interactúan químicamente sus componentes. En el caso del PVDF esta permite cuantificar el contenido de la fase β polar, que es justamente la que determina qué tan buenas son las propiedades piezoeléctricas del material, estableciendo así una relación directa entre estructura química y comportamiento funcional (Aassar et al., 2025).

2.1.12.2. Difracción de Rayos X (XRD)

Método usado cuando se quiere conocer qué tan cristalino es un material, qué tamaño tienen sus cristales o cómo están orientadas las fibras, el XRD es la técnica de referencia. Pero donde realmente muestra su potencial es cuando se combina con el FTIR, porque juntos ofrecen una imagen mucho más completa de cómo el electrohilado y los tratamientos posteriores modifican la estructura molecular del material y cómo esos cambios estructurales terminan influyendo en el

comportamiento final que tendrá en la aplicación para la que fue diseñado (Aassar et al., 2025).

2.1.13. Caracterización Mecánica y Eléctrica

2.1.13.1. Pruebas de Tracción

Este ensayo es fundamental para medir la resistencia a la tracción, el módulo de Young y la elongación a la rotura de las membranas de nanofibras. Se requiere cuantificar estas propiedades para poder desarrollarse en aplicaciones que requieren flexibilidad y durabilidad, como ya antes mencionados, los textiles inteligentes y los andamios para ingeniería de tejidos (Zhu et al., 2017).

2.1.13.2. Medición Eléctrica

Para medir la conductividad, lo habitual es usar un sistema de cuatro puntas que evalúa directamente la resistencia del material. Cuando el interés está en entender cómo se transfiere la carga en electrodos o sensores. También está la espectroscopía de impedancia electroquímica la cual ofrece una visión más detallada de esos procesos internos. Y en el caso particular de los materiales piezoeléctricos, la evaluación pasa por aplicar una estimulación mecánica controlada y registrar el voltaje y la corriente que el propio material genera como respuesta (Maharjan et al., 2020).



CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

3. PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO

Para la fabricación de la membrana electrohilada conductiva primero se realiza la preparación de la solución para luego dar inicio al proceso de electrohilado. Una vez terminado se realiza la caracterización de las membranas para descartar defectos en el proceso. Posteriormente se realiza la inmersión en la solución de óxido de grafeno mediante sonicación para cubrir la malla de óxido de grafeno. Finalmente se llevan las muestras para su caracterización morfológica mediante el SEM, su caracterización mecánica en un equipo de ensayos de tracción y la caracterización conductiva calculando su resistencia eléctrica.

3.1. Materiales y Equipos

3.1.1. Insumos Reactivos

- Fluoruro de polivinilideno (PVDF): [$\text{CH}_3\text{CON}(\text{CH}_3)_2$]; PM: 750,000-800,000 g/mol
- Dimetilacetamida (DMAc): [$\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{N}(\text{CH}_3)_2$], PM: 87.12 g/mol, pureza $\geq 99.9\%$
- Acetona: [CH_3COCH_3]; PM: 58.08 g/mol; HPLC, $\geq 99.9\%$
- Grafeno en dispersión acuosa: Diámetro: <500 nm; Espesor: 0.8-1.2 nm

3.1.2. Equipos

- Sistema de Electrohilado, voltaje de 10 – 30 kV
- Homogeneizador ultrasónico portátil, marca Hielscher, UP200Ht, 200 W
- Agitador magnético MS-H280-PRO DLAB
- Balanza analítica 210 g x 0.1 mg Sartorius TE214S

3.1.3. Materiales

- Jeringas (10 mL)
- Aguja metálica (calibre 21G-25G)
- Micropipetas de 2 ml

- Vasos de precipitado 50 ml y 100 ml
- Frasco graduado de vidrio boca ancha con tapa rosca de 100 ml
- Placa de Petri
- Papel aluminio

3.2. Metodología de Síntesis

3.2.1. Preparación de Solución

Tabla 3

Pasos para la elaboración de la solución

Etapa	Descripción
Mezcla de solventes	En un vaso de precipitado con tapa, preparar x_1 mL de Dimetilacetamida (DMAc) junto con x_2 mL de Acetona.
Pesar PVDF	Pesar x_3 g de PVDF utilizando una balanza analítica.
Agregar PVDF	Agregue lentamente el PVDF pesado al vaso de precipitado que contiene la mezcla de solventes bajo agitación magnética constante.
Agitar solución	Agite la solución a 50 °C con una placa calefactora durante aproximadamente 4 horas hasta obtener una solución transparente y viscosa.
Almacenar	Almacenar en un envase hermético, a temperatura ambiente, en un ambiente seco y oscuro. Listo para iniciar el proceso de electrohilado.

Nota. Elaboración propia

3.2.2. Proceso de Electrohilado

Tabla 4

Procedimiento para la elaboración del electrohilado

Etapa	Descripción
Extraer solución	Retirar el envase hermético del lugar de almacenamiento y verificar las condiciones en las que se encuentra, temperatura y homogeneidad de la mezcla.
Cargar jeringa	Cargar la solución de PVDF en una jeringa de plástico de 10 mL equipada con una aguja metálica.
Montar jeringa en equipo	Montar la jeringa en la bomba de infusión del equipo de electrohilado.
Preparar equipo de electrohilado	Colocar papel aluminio y ajustar los parámetros de electrohilado en el equipo: voltaje, distancia entre la aguja y el colector, flujo de la solución y velocidad angular del colector.
Realizar electrohilado	Realizar el proceso de electrohilado a una temperatura ambiente de 21 °C.
Extraer malla del colector	Retirar con cuidado la membrana electrohilada de PVDF junto con el papel aluminio del colector.
Almacenar	Almacenar las mallas electrohiladas cubiertas con papel manteca.

Nota. Elaboración propia

3.2.3. Funcionalización eléctrica

Tabla 5

Procedimiento del Proceso de Dopado de Grafeno

Etapa	Descripción
Pesar grafeno	Pesar 0.1 g de grafeno con una balanza analítica y colocarla en un envase hermético.
Agregar agua destilada	Verter en un vaso de precipitados de 100 mL de agua destilada y agregar al envase hermético donde se encuentra el grafeno.
Agitación magnética	Someter la dispersión de grafeno a durante 30-60 minutos hasta obtener una dispersión homogénea y estable, sin grumos visibles.
Preparar malla electrohilada	Colocar la malla electrohilada de PVDF en un vaso de precipitado.
Inmersión de malla en GO	Verter la dispersión acuosa de GO preparada sobre la malla, asegurándose de que esté completamente sumergida.
Sonicación de malla	Someter la muestra a sonicación a una potencia de 100 W durante el tiempo determinado, 60 minutos.
Extraer malla del colector	Transcurrido el tiempo, retirar con cuidado la membrana de la dispersión de GO utilizando las pinzas.
Lavar la malla	Lavar suavemente la membrana recubierta con agua destilada para eliminar cualquier partícula de grafeno débilmente adsorbida.
Secar la malla	Secar la membrana composite PVDF/Grafeno en un horno a 50 °C durante 24 horas para eliminar completamente cualquier rastro de humedad.

Nota. Elaboración propia

3.3. Método de Investigación

El método de investigación es cuantitativo, debido a que se controlarán variables como la concentración de polímero y grafeno, y los tiempos de inmersión para optimizar el proceso. La caracterización se centrará en la morfología (SEM), medición de la conductividad eléctrica y resistencia a la tracción. Los resultados permitirán establecer la relación entre los parámetros de fabricación y las propiedades finales del material, demostrando la viabilidad de esta técnica.

3.4. Variables

3.4.1. Variables Independientes

- X1: Concentración de PVDF
- X2: Relación DMAc: Acetona
- X3: Voltaje de electrohilado
- X4: Distancia al colector
- X5: Velocidad de giro del colector
- X6: Diámetro de aguja
- X7: Tiempo de sonicación
- X8: Temperatura de sonicación

3.4.2. Variables Dependientes

- Y1: Morfología de las fibras
- Y2: Conductividad eléctrica

3.5. Análisis Estadístico

En la presente investigación se emplea la metodología de superficie de respuesta (RSM) mediante un diseño Box-Behnken (BBD) para la optimización y análisis del proceso de electrohilado de PVDF. Este enfoque permite modelar matemáticamente la relación entre los parámetros de entrada y las propiedades de la membrana resultante.

3.6. Diseño Box-Behnken para 4 Factores

La elección de un diseño BBD con cuatro factores independientes responde a la necesidad de explorar un espacio experimental complejo de manera eficiente. Mientras que un diseño factorial completo de 4 niveles requeriría 256 experimentos, el diseño Box-Behnken permite obtener un modelo de segundo orden con solo 27 corridas experimentales, incluyendo los puntos centrales.

Este diseño es particularmente adecuado para el electrohilado por las siguientes razones técnicas:

3.6.1. Región de Seguridad

Evita combinaciones de niveles extremos (vértices del cubo) que podrían resultar en condiciones de operación inestables, como voltajes excesivos a distancias mínimas, lo que podría provocar arcos eléctricos o daños en el equipo de 10-30 kV disponible.

3.6.2. Evaluación de Curvatura

Permite identificar si la respuesta, diámetro de fibra, tiene un comportamiento no lineal.

3.6.3. Selección de Factores y Niveles Experimentales

Se han seleccionado cuatro variables independientes basadas en las pruebas de cribado preliminares, donde se observó la influencia del voltaje en la estabilidad del cono de Taylor y la morfología de la fibra. Los niveles se han codificado como Bajo (-1), Central (0) y Alto (+1) como se observa en la Tabla 6

Tabla 6*Factores y niveles codificados para el diseño Box-Behnken*

Factor	Unidades	Símbolo	Nivel (-1)	Nivel (0)	Nivel (+1)
Variable 01	% (p/v)	X1	X1 _{BAJO}	X1 _{CENTRAL}	X1 _{ALTO}
Variable 02	kV	X2	X2 _{BAJO}	X2 _{CENTRAL}	X2 _{ALTO}
Variable 03	cm	X3	X3 _{BAJO}	X3 _{CENTRAL}	X3 _{ALTO}
Variable 04	rpm	X4	X4 _{BAJO}	X4 _{CENTRAL}	X4 _{ALTO}

Nota. Se muestran los factores y niveles para el diseño Box-Behnken, elaboración propia.

3.7. Matriz Experimental

La matriz de diseño consiste en 27 corridas experimentales ejecutadas en orden aleatorio para minimizar el sesgo de factores externos, estas se pueden observar en la Tabla 7. Se incluyen 4 réplicas en el punto central para estimar el error puro del sistema.

Tabla 7*Matriz Experimental de Electrohilado*

Orden de corrida	Concentración de PVDF	Voltaje de operación	Distancia al colector	Velocidad del colector
1	0	-1	1	0
2	1	-1	0	0
3	-1	-1	0	0
4	0	-1	0	-1
5	0	1	-1	0
6	0	0	1	-1
7	-1	0	0	1
8	0	1	1	0
9	1	0	1	0
10	0	1	0	1
11	1	0	0	-1
12	0	0	0	0
13	1	0	-1	0
14	0	-1	-1	0
15	-1	0	1	0
16	0	1	0	-1
17	0	0	0	0
18	0	0	1	1
19	0	0	-1	1
20	-1	0	0	-1
21	-1	0	-1	0
22	1	0	0	1

23	0	0	0	0
24	0	-1	0	1
25	0	0	-1	-1
26	1	1	0	0
27	-1	1	0	0

Nota. Se muestran los niveles alto, medio y bajo para cada uno de los ensayos Box-Behnken, elaboración propia.

3.8. Análisis Estadístico y Optimización de Superficie de Respuesta

Tras la ejecución de las 27 corridas experimentales definidas por el diseño Box-Behnken, los datos obtenidos se someterán a un análisis estadístico riguroso para determinar la influencia de los factores operativos sobre las características de la membrana.

El análisis de Superficie de Respuesta, para facilitar la interpretación de los efectos de los factores, se genera gráficas de superficie de respuesta en 3D y gráficas de contorno en 2D. Estas representaciones visuales permiten observar cómo interactúan dos variables independientes simultáneamente mientras las demás permanecen constantes en su nivel central. El análisis de la curvatura de estas superficies es fundamental para localizar las regiones donde se alcanzan los valores óptimos (máximos, mínimos o rangos objetivo) de las propiedades de la membrana, como el diámetro de fibra o la porosidad.

3.9. Optimización y Validación del Modelo

Una vez identificado el punto óptimo teórico mediante la función de deseabilidad de Minitab, se procederá a la validación experimental. Esta fase consiste en realizar ensayos adicionales utilizando las condiciones operativas sugeridas por el modelo optimizado. El objetivo final es comparar los resultados prácticos con las predicciones teóricas del software; si el error relativo entre ambos valores es despreciable, el modelo se considera validado y capaz de predecir el comportamiento del sistema dentro del espacio de diseño evaluado.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4. RESULTADOS

4.1. Resultados de la Preparación de la Solución

La etapa de preparación de la solución tiene como objetivo encontrar rangos de concentración adecuados con los cuales se puede realizar el electrohilado. Inicialmente se tomaron como referencia los parámetros de concentración descritos por Fang-Fang et al. (2017). Además, se eligieron 3 concentraciones adicionales con soluciones de menor concentración de PVDF como se muestra en la Tabla 8.

La homogenización de la solución polimérica se llevó a cabo mediante agitación magnética constante a 200 rpm, empleando un sistema de calefacción regulado a 50 °C durante 4 horas como se observa en la Figura 4. Este procedimiento garantizó la completa disolución del PVDF y la estabilidad térmica necesaria para obtener una mezcla uniforme y libre de aglomerados.

Cabe resaltar que en investigaciones previas reportan el uso de PVDF con pesos moleculares cercanos a los 100,000 g/mol, el polímero empleado en este trabajo posee un peso molecular elevado, en el rango de 750,000 a 800,000 g/mol.

Tabla 8

Soluciones Preliminares

Solución	DMAc (mL)	Acetona (mL)	PVDF (g)	Relación DMAc: Acetona (v/v)	Concentración de PVDF (p/v)
S1	5.00	5.00	2.150	1.00	20
S2	6.25	5.00	2.150	1.25	18
S3	6.25	5.00	1.775	1.25	15.4
S4	6.25	5.00	2.025	1.25	17.2
S5	6.25	4.17	1.775	1.50	16.2

Nota. Elaboración propia

Figura 3

Agitación Magnética



Nota. La agitación magnética se regulo a 50°C y 200 RPM, elaboración propia.

Se observó que la solución S1 de la Tabla 8 presentó una viscosidad excesiva, superando el límite operativo del sistema de mezcla y dosificación. Durante el proceso de preparación, la elevada viscosidad impidió que la pastilla magnética alcanzara la velocidad programada de 200 rpm; en su lugar, se produjo un fenómeno de desacoplamiento magnético, donde la pastilla presentó vibraciones erráticas sin lograr un flujo rotacional efectivo.

Esta consistencia con elevada viscosidad resultó incompatible con el sistema de electrohilado, ya que la fuerza requerida para desplazar el fluido a través de la aguja de calibre 25G excedió la capacidad del actuador que desplaza la jeringa, provocando obstrucciones. Este comportamiento confirmó que, para el peso molecular del PVDF empleado (750,000-800,000 g/mol), una concentración del 20% (p/v) se sitúa por encima del umbral de procesabilidad, explorando concentraciones inferiores, entre 16-18% (p/v), para garantizar la formación del chorro de la solución polimérica.

4.2. Ensayos Preliminares

Debido a la cantidad de parámetros del proceso de electrohilado, el cual involucra siete variables operacionales independientes, se realizaron ocho pruebas preliminares. El objetivo fundamental de esta etapa es evaluar la significancia de cada parámetro y delimitar los rangos de operación estables. Esta selección previa es útil para reducir la complejidad experimental antes de la aplicación del diseño de superficie de respuesta, asegurando que las variables incluidas en el modelo optimizado sean aquellas con mayor impacto en la morfología y calidad de las membranas. Las magnitudes de los parámetros operaciones se pueden observar en la Tabla 9.

Tabla 9

Primeras Observaciones del Electrohilado

Número de muestra	Solución	Concentración de PVDF (p/v)	Relación DMAc: Acetona (v/v)	Voltaje (kV)	Caudal (ml/h)	Rpm	Distancia aguja al colector (cm)	Calibre de aguja
M01	S2	18.0	1.25:1	13	0.6	250	10	Cal. 22
M02	S3	18.0	1.25:1	19	0.6	250	12	Cal. 27
M03	S4	15.5	1.25:1	16	0.6	200	15	Cal. 22
M04	S3	15.5	1.25:1	20	0.8	200	15	Cal. 21
M05	S4	17.0	1.25:1	19	0.6	200	15	Cal. 25
M06	S4	17.0	1.25:1	20	0.8	250	10	Cal. 25
M07	S5	18.0	1.25:1	13	0.6	200	15	Cal. 27
M08	S5	18.0	1.5:1	11	0.6	185	15	Cal. 27

Nota. Elaboración propia

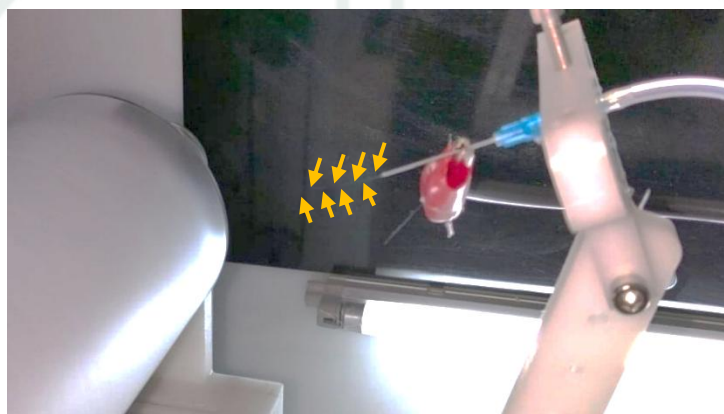
En la Tabla 9 se detallan los resultados obtenidos en las pruebas preliminares. Para cada etapa, se especifican las condiciones operacionales como el voltaje, el flujo másico y la distancia del colector junto con una descripción cualitativa del comportamiento del chorro polimérico y la formación del cono de Taylor. Estos ensayos permiten analizar cómo las variaciones en la composición de la solución y los parámetros físicos influyen en la morfología de las fibras resultantes, elaboración propia.

4.2.1. Ensayo 01

El primer ensayo se realiza con 5 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 18% (p/v) con un voltaje de 13 kV y una distancia del colector de 10 cm. En el proceso de electrohilado se puede observar que el chorro tiene una forma de línea recta hacia el colector y presencia del cono de Taylor que se puede observar en la Figura 5, con la formación de hilos del polímero solidificado cortos de aproximadamente 3 cm del polímero solidificado en la punta de la aguja. Calificación: 4/10.

Figura 4

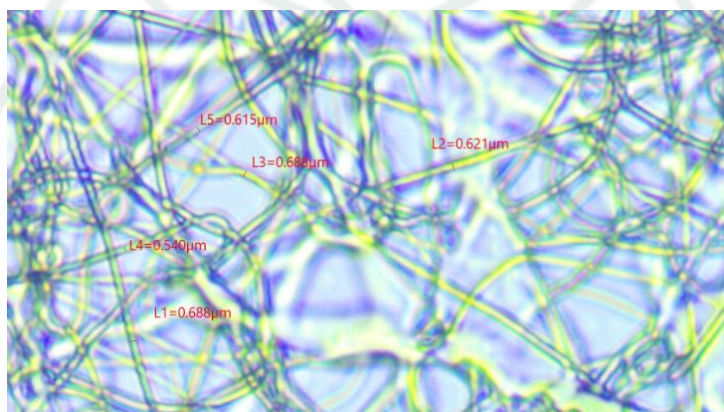
Operación de electrohilado de ensayo M01



Nota. La trayectoria del chorro expulsado por aguja esta delimitado por las flechas, elaboración propia.

Figura 5

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M01



Nota. Elaboración propia

La Figura 5 muestra el producto del primer ensayo donde se aprecian fibras con diámetros con un rango entre $0.63\ \mu\text{m}$ y $1\ \mu\text{m}$. Sin embargo, se observa una leve fusión de fibras en los puntos de intersección y una morfología ligeramente irregular en algunas zonas. No hay presencia evidente de "beads", pero sí de salpicaduras en algunas zonas.

4.2.2. Ensayo 02

El segundo ensayo se realiza con 5 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 18% (p/v) con un voltaje de 19 kV y una distancia del colector de 12 cm. En el proceso de electrohilado el chorro forma una curva hacia el extremo del colector con la presencia del cono de Taylor. La forma y dirección que forma el chorro se observa en la Figura 6. Calificación: 2/10.

Figura 6

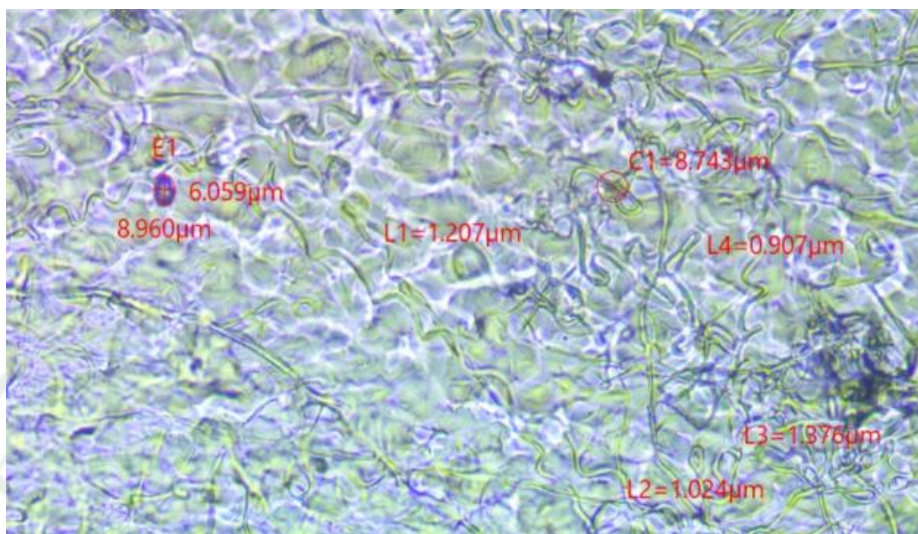
Operación de Electrohilado de Ensayo M02



Nota. La trayectoria del chorro expulsado no se da de forma directa, se desvía hacia en el extremo inferior, elaboración propia.

Figura 7

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M02



Nota. Elaboración propia

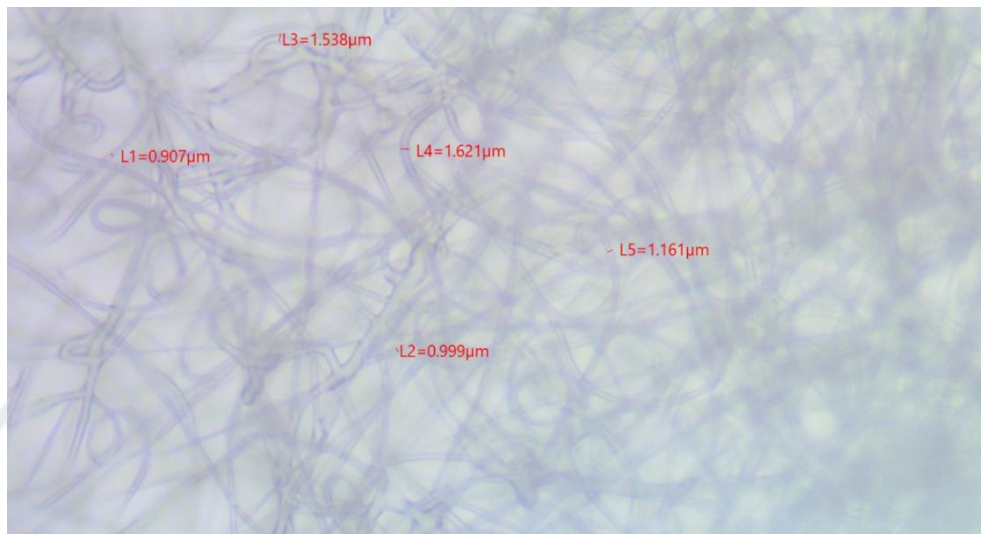
La Figura 7 muestra el resultado del segundo ensayo donde se ve que la membrana tiene una alta densidad de defectos tipo salpicaduras, y las fibras que se mas delgadas rondan los 0.8 µm a 1.3 µm, y perlas o "beads" que se muestran tienen dimensiones que superan las 8 µm. Las fibras son discontinuas y aparecen embebidas en una matriz de material polimérico no fibrilar, lo que indica una pérdida de la estructura porosa.

4.2.3. Ensayo 03

El tercer ensayo se realiza con 6 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 15.5% (p/v) con un voltaje de 16 kV y una distancia del colector de 15 cm. En el proceso de electrohilado el chorro forma una curva hacia el extremo del colector con la presencia del cono de Taylor.

Figura 8

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M03



Nota. Elaboración propia

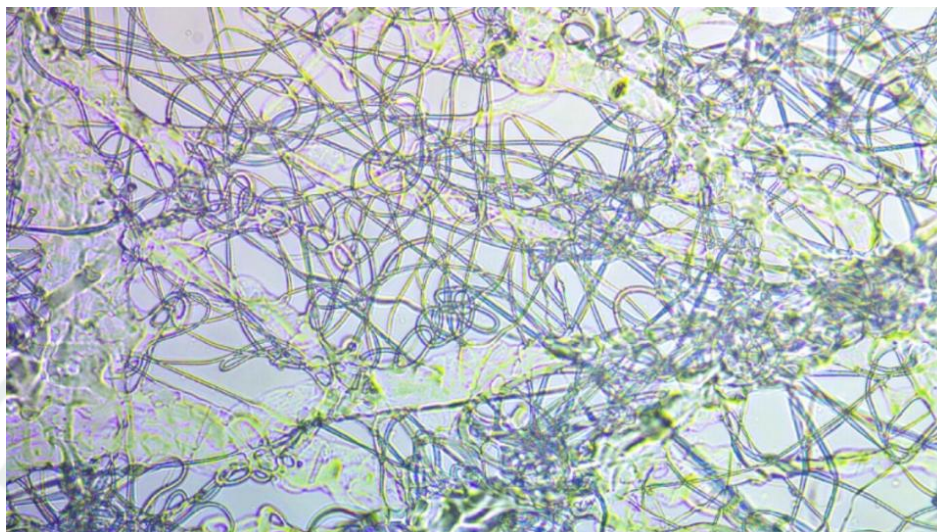
La Figura 8 presenta una membrana con estructura de fibras que se ramifican en filamentos secundarios más delgados. Se evidencia una ligera diferencia en los diámetros, con algunos filamentos que duplican el grosor de otros, pero manteniendo la integridad de la red sin presencia de perlas o "beads". Calificación: 5/10, elaboración propia.

4.2.4. Ensayo 04

El cuarto ensayo se realiza con 6 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 15.5% (p/v) con un voltaje de 20 kV y una distancia del colector de 15 cm. En el proceso de electrohilado el chorro forma una curva mucho mayor que el ensayo 03 hacia costado del colector depositando también en el área lateral del colector. Se presencia el cono de Taylor.

Figura 9

Evaluación en microscopía electrónica de barrido de ensayo M04



Nota. Elaboración propia

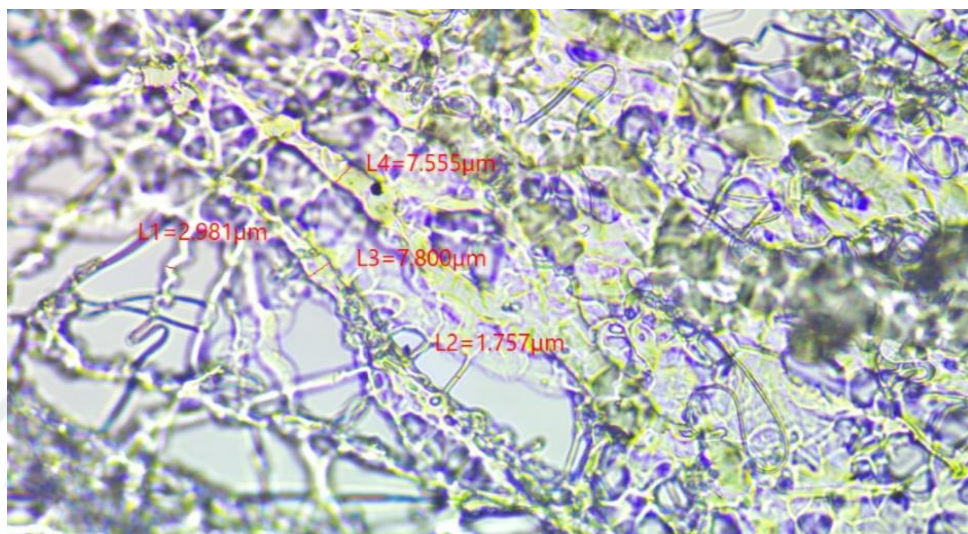
La Figura 9 revela una malla con múltiples uniones y fusiones entre fibras que forman espirales. La distribución es caótica y se aprecian zonas donde el polímero se ha depositado de forma masiva, perdiendo la definición individual de los filamentos en varios sectores de la muestra. Calificación: 3/10, elaboración propia.

4.2.5. Ensayo 05

El quinto ensayo se realiza con 6 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 17% (p/v) con un voltaje de 20 kV y una distancia del colector de 15 cm. En el proceso de electrohilado el chorro forma una curva mucho mayor que el tercer ensayo hacia costado del colector depositando también en el área lateral del colector. Se presencia el cono de Taylor.

Figura 10

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M05



Nota. Se observa una morfología deficiente caracterizada por fibras de gran grosor, superiores a 7 μm , con aspecto aplastado o cintado.

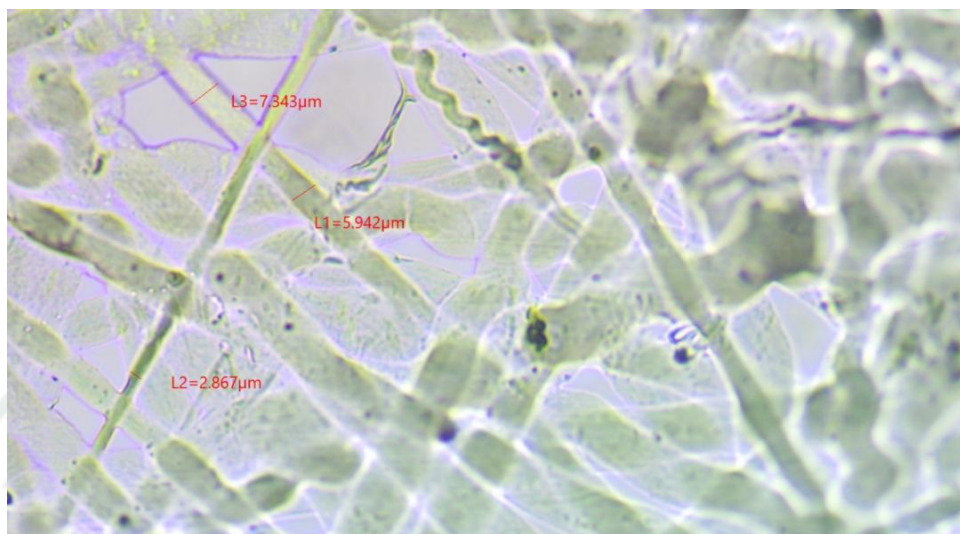
En la Figura 10, en la vista por el microscopio óptico se observa que existe una coalescencia significativa entre las capas, resultando en una superficie con porosidad obstruida y depósitos de material irregulares. Calificación: 1/10, elaboración propia.

4.2.6. Ensayo 06

El sexto ensayo, se evaluó una solución de PVDF al 17% (p/v) de una solución con relación 1.25:1 de DMAc: Acetona. Los parámetros operacionales se fijaron en un voltaje de 20 kV y una distancia al colector de 15 cm. Sin embargo, no fue posible completar el proceso de electrohilado. Se observó un incremento crítico en la viscosidad de la solución, lo que provocó la obstrucción de la aguja en 5 ocasiones e impidió la formación del flujo continuo y provocando la pérdida de las agujas. Este fenómeno se atribuye al tiempo de almacenamiento de la mezcla de 3 días después de la preparación, lo que sugiere una posible gelificación o evaporación parcial de los solventes volátiles, alterando las propiedades necesarias para la formación del cono de Taylor.

Figura 11

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M06



Nota. Elaboración propia

La Figura 11 exhibe fibras cintadas y planas de gran calibre, con diámetros medidos entre 2.8 μm y 7.3 μm . Los filamentos carecen de sección transversal circular y se presentan fusionados en bandas anchas, eliminando la estructura de nanofibra deseada. Calificación: 2/10, elaboración propia.

4.2.7. Ensayo 07

El séptimo ensayo se realiza con 3 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 18% (p/v) con un voltaje de 13 kV y una distancia del colector de 15 cm. En el proceso de electrohilado se puede observar en la Figura 12 el chorro forma una curva mucho mayor que el ensayo 03 hacia costado del colector depositando también en el área lateral del colector. Se presencia el cono de Taylor. El resultado obtenido se llevó al microscopio óptico cuya morfología se puede observar en la Figura 12.

Figura 12

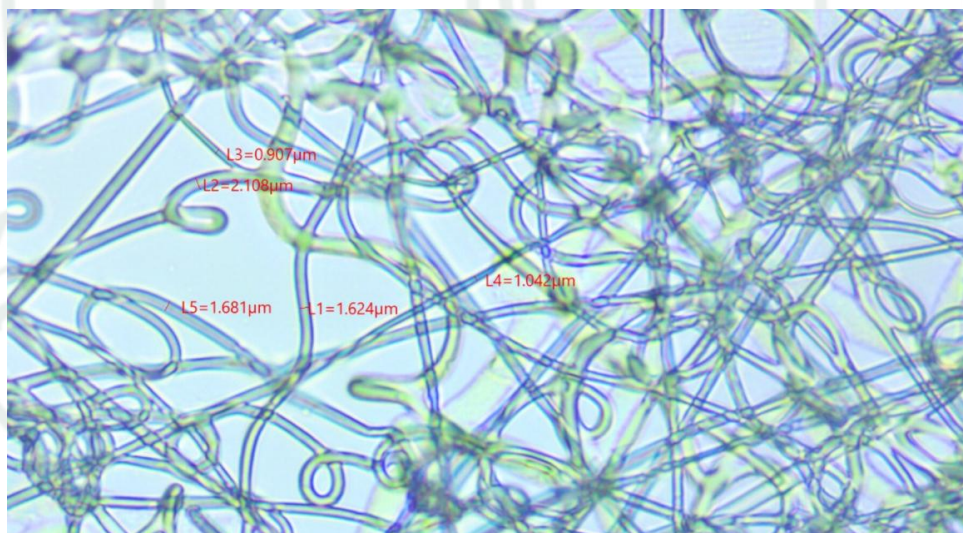
Operación de Electrohilado de Ensayo M07



Nota. El chorro muestra una trayectoria hacia la zona inferior del colector, elaboración propia.

Figura 13

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M07



Nota. Elaboración propia

La Figura 13 presenta una red de fibras con numerosas inestabilidades que resultan en la superposición y unión de fibras. Aunque los diámetros son regulares, alrededor de 1 μm y 2.1 μm , la malla carece de uniformidad lineal y muestra puntos de acumulación polimérica. Calificación: 6/10.

4.2.8. Ensayo 08

El octavo ensayo se realiza con 5 ml de la solución con una relación de 1.25:1 entre DMAc y acetona y un porcentaje de PVDF de 18% (p/v) con un voltaje de 11 kV y una distancia del colector de 15 cm. En el proceso de electrohilado el chorro forma un chorro recto hacia el colector rotatorio, una gota en la punta de la aguja, además se presencia el cono de Taylor como se puede ver en la Figura 14.

Figura 14

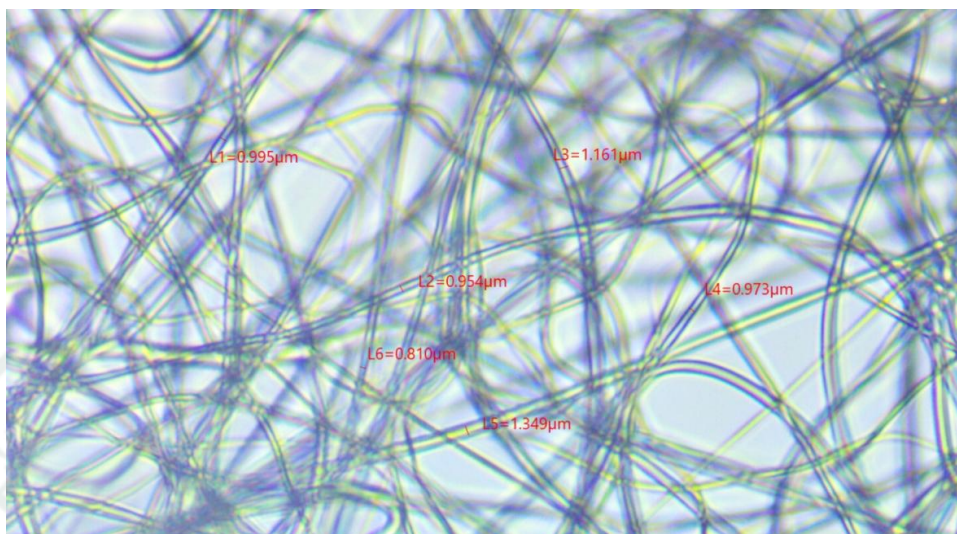
Operación de Electrohilado de Ensayo M08



Nota. La trayectoria de este chorro es directa y de mayor longitud que las anteriores.

Figura 15

Evaluación microscópica 40X de membrana ensayo M08



Nota. Elaboración propia

La Figura 15 es la muestra que presenta mayor homogeneidad. Se observa una disposición clara de fibras largas y continuas con diámetros uniformes que oscilan cerca de 1 μm . No se detectan perlas, salpicaduras ni fusiones significativas, manteniendo una porosidad abierta y definida. Calificación: 8/10.

4.3. Selección de Variables

Como resultado de la fase exploratoria, se describe a continuación las variables con mayor impacto en la morfología y en el proceso de electrohilado:

- La concentración de la solución polimérica se identificó como el factor limitante principal debido a su impacto directo en la viscosidad y procesabilidad. Durante las pruebas iniciales, se determinó que una concentración del 20% (p/v) en la solución S1 excede el umbral operativo. A este nivel de concentración, la viscosidad impidió que el sistema de agitación magnética mantuviera las 200 rpm programadas, provocando un desacoplamiento de la pastilla. La alta consistencia generó obstrucciones en la aguja de calibre 25G, ya que la fuerza requerida para el

flujo superó la capacidad del actuador de la jeringa. Se exploró y se definieron concentraciones entre el 16% y 18% (p/v) para asegurar la formación de un chorro continuo, siendo el ensayo M08 el que mostró la mayor homogeneidad y disposición clara de fibras.

- La proporción entre el solvente de alta constante dieléctrica (DMAc) y el solvente volátil (acetona) es crucial para estabilizar el chorro y controlar la morfología fibrilar. Ensayos como el M07, con una relación de 1.25:1, se observaron inestabilidades que resultaron en una malla carente de uniformidad lineal y puntos de acumulación polimérica. Al ajustar la relación a 1.5:1 en el ensayo M08, se obtuvo una red de fibras largas y continuas con diámetros uniformes cercanos a 1 μm , manteniendo una porosidad abierta.
- El voltaje actúa como la fuerza motriz que vence la tensión superficial de la solución; sin embargo, niveles inadecuados degradan severamente la calidad de la membrana. Defectos por exceso: En el ensayo M02, un voltaje elevado de 19 kV provocó una alta densidad de defectos tipo salpicaduras y la formación de perlas o "beads" con dimensiones superiores a las 8 μm . Voltajes de 20 kV (ensayos M04 y M05) resultaron en mallas caóticas, con fibras de gran grosor (superiores a 7 μm). Rango óptimo: Los mejores resultados cualitativos se obtuvieron en el rango de 11 kV a 13 kV, donde se mantuvo la integridad del cono de Taylor y la estabilidad del chorro.
- La distancia es la variable que determina el tiempo de vuelo de la fibra, permitiendo que los solventes se evaporen antes de impactar el sustrato. En el ensayo M01, con una distancia de 10 cm, se detectó una leve fusión de fibras en los puntos de intersección, lo que sugiere una evaporación incompleta del solvente antes de la deposición. Al estandarizar la distancia a 15 cm en la mayoría de los

ensayos posteriores (M03 a M08), se logró una mejor definición individual de los filamentos. Dado que la distancia interactúa directamente con el voltaje para definir la intensidad del campo eléctrico, su control es esencial para evitar que la membrana presente una morfología aplastada o cintada.

- La velocidad de giro afecta primordialmente el grado de alineación mecánica de las fibras y no su formación intrínseca o diámetro. Aunque esta variable fue monitoreada y variada entre 185 y 250 rpm durante los ensayos preliminares (M01 a M08), pero no se seleccionó para el diseño Box-Behnken debido a que no tuvo gran impacto en el proceso.

Resumiendo, se seleccionaron estas cuatro variables independientes para la optimización del proceso mediante la metodología de superficie de respuesta basada en un Diseño Box-Behnken (BBD):

- Concentración de PVDF
- Relación DMAc: Acetona
- Voltaje
- Distancia al colector

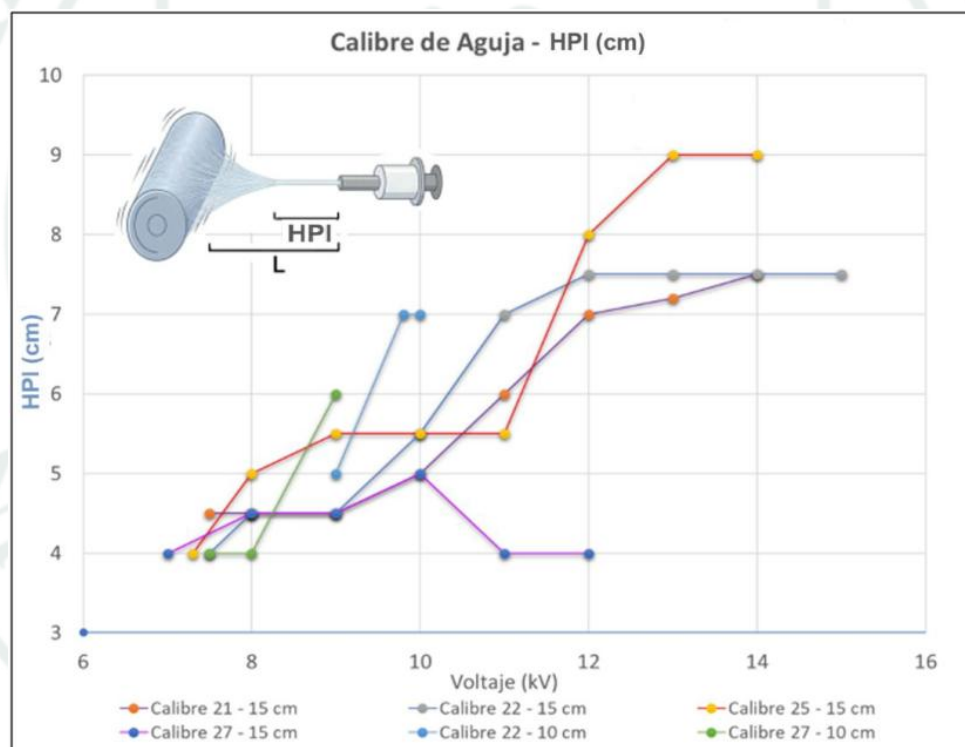
Para la correcta implementación del BBD, fue necesario definir los niveles experimentales (magnitudes) del voltaje. Con este fin, se realizaron ensayos de barrido para determinar la ventana de estabilidad del cono de Taylor. Se ejecutaron cuatro series de corridas experimentales variando el calibre de la aguja (21G, 22G, 25G y 27G), incrementando el voltaje de manera progresiva desde 7 kV hasta 20 kV, como se puede observar en la Figura 4.14. Estos límites permiten establecer los niveles -1, 0 y +1 requeridos por el modelo estadístico. Durante este proceso, se identificaron dos puntos críticos:

- Voltaje umbral inferior: El potencial mínimo necesario para la formación de un cono de Taylor estable y libre de vibraciones.

- Voltaje límite superior: El punto en el que el chorro pierde su trayectoria rectilínea inicial y comienza a presentar inestabilidades por flexión excesiva o curvaturas prematuras.
- Cabe resaltar que, para las variables independientes, a excepción del diámetro de aguja y voltaje, se utilizaron magnitudes constantes:
 - Concentración de Concentración de PVDF: 18% (p/v)
 - Relación DMAc: Acetona: 1.25:1
 - Velocidad de giro: 185 rpm

Figura 16

Formación del cono de Taylor respecto al voltaje y distancia al colector



Nota. Elaboración propia

La gráfica de la Figura 16 se presenta la relación entre la longitud del chorro saliente de la aguja y la diferencia de potencial aplicada para los cuatro calibres de aguja evaluados, considerando 2 distancias para realizar este análisis de 10 y 15 cm. Del análisis de estas curvas se desprenden las siguientes observaciones, elaboración propia.

- Se observa la ausencia de datos para las agujas de calibre 21G y 25G a una distancia de 10 cm debido a que, en estas condiciones, el chorro polimérico se extendió de forma continua hasta el colector sin permitir la formación del cono de Taylor.
- Uniformidad en el umbral mínimo de voltaje, ya para todos los ensayos realizados a una distancia de 15 cm, el voltaje umbral inferior común fue de 7.4 kV. Estableciendo un cono de Taylor morfológicamente estable independiente del calibre de la aguja.
- En las pruebas a 10 cm de distancia entre la aguja y el colector, el inicio de la formación del cono de Taylor mostró una dependencia directa con el diámetro del capilar. Para la aguja de menor diámetro 27G, el proceso inició a los 7.8 kV, mientras que para la aguja 22G se requirió un potencial mayor de 8.5 kV. Esto indica que, a distancias reducidas entre el colector y la aguja, se facilita la formación del cono a incluso a voltajes más bajos y con un menor diámetro de aguja.

A partir de los ensayos preliminares de estabilidad del chorro y la determinación de los potenciales críticos, se establecieron los niveles operativos para la variable voltaje dentro del diseño experimental Box-Behnken. Se seleccionó un rango estrecho de operación entre 9 kV y 11 kV, situando el punto central en 10 kV, con el fin de garantizar la persistencia de un cono de Taylor estable y evitar la transición hacia regímenes de proyección directa o goteo excesivo.

Tabla 10*Niveles de variables independientes para metodología Box-Behnken*

Variables	Niveles		
	-1	0	1
Concentración de PVDF (p/v)	16	17	18
Relación DMAc: Acetona (v/v)	1.25:1	1.5:1	1.75:1
Voltaje (kV)	9	10	11
Distancia Aguja - Colector (cm)	10	12.5	15

Nota. Elaboración propia

Una vez definidos los niveles bajo, central, y alto, para las cuatro variables independientes (concentración de PVDF, voltaje, distancia y calibre de aguja), se procedió a generar la matriz de experimentación mediante el software estadístico Minitab, elaboración propia.

El diseño Box-Behnken resultó en una serie de 27 corridas experimentales, las cuales incluyen puntos factoriales y réplicas en el punto central para la estimación del error experimental y la evaluación de la repetibilidad del proceso.

4.4. Diseño Box Behnken

En la Tabla 11 se detallan las magnitudes reales asignadas a cada ensayo, las cuales deberán ejecutarse de manera aleatoria para garantizar la validez estadística de los resultados obtenidos en la caracterización de las membranas.

Tabla 11*Orden de ensayos para el diseño Box-Behnken*

Concentración de PVDF (p/v)	Relación DMAc: Acetona (v/v)	Voltaje de operación (kV)	Distancia al colector (cm)
18	1.50	10	10.0
17	1.50	9	10.0
17	1.25	9	12.5
18	1.25	10	12.5
16	1.75	10	12.5
17	1.50	11	10.0
16	1.50	10	10.0
17	1.50	10	12.5
17	1.75	10	10.0
17	1.50	9	15.0
17	1.50	10	12.5
17	1.25	10	10.0
18	1.75	10	12.5
17	1.75	10	15.0
16	1.50	10	15.0
16	1.50	11	12.5
17	1.25	11	12.5
17	1.75	11	12.5
17	1.50	10	12.5
16	1.25	10	12.5
16	1.50	9	12.5
17	1.50	11	15.0
17	1.25	10	15.0
18	1.50	11	12.5
18	1.50	9	12.5
17	1.75	9	12.5
18	1.50	10	15.0

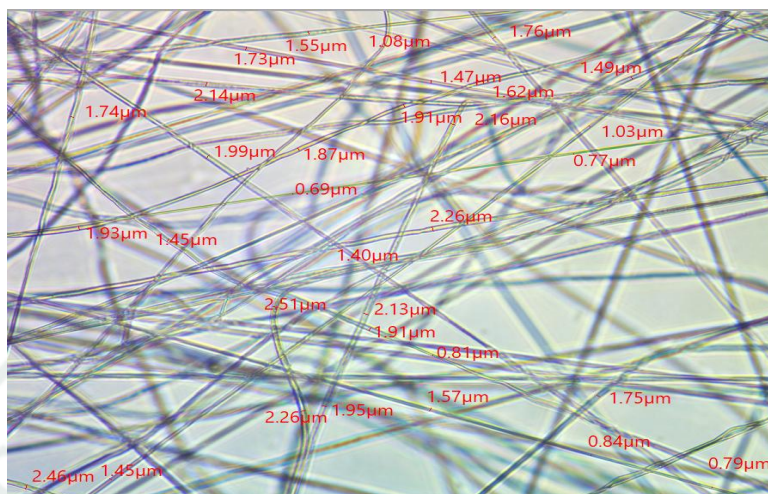
Nota. El orden de los experimentos se dio de manera aleatoria por lo cual no se enumeró, elaboración propia.

Se llevo a cabo cada una de las pruebas a las condiciones previamente mostradas.

Para la caracterización se utilizó el microscopio óptico con un aumento de 40x, se buscaron puntos al azar, buscando un enfoque y guardando las imágenes que se pueden observar en el Anexo 4. El software ImageFocusAlpha permitió la medición del espesor de diámetro de fibra, además de la visualización de defectos morfológicos como "beads", charcos y aglomeraciones, como ejemplo la Figura 17 muestra una captura de la muestra B18.

Figura 17

Micrografía de muestra B18



Nota. Elaboración propia

El análisis incluyó la medición de 30 hilos seleccionados al azar para determinar el diámetro promedio y la desviación relativa mediante el coeficiente de variación. Esta lista de medidas individuales de las fibras se puede observar en el Anexo 5. Estos datos reflejan la uniformidad estructural de las membranas obtenidas bajo las distintas condiciones experimentales. El resumen de diámetro promedio y coeficiente de variación se pueden observar en la Tabla 12.

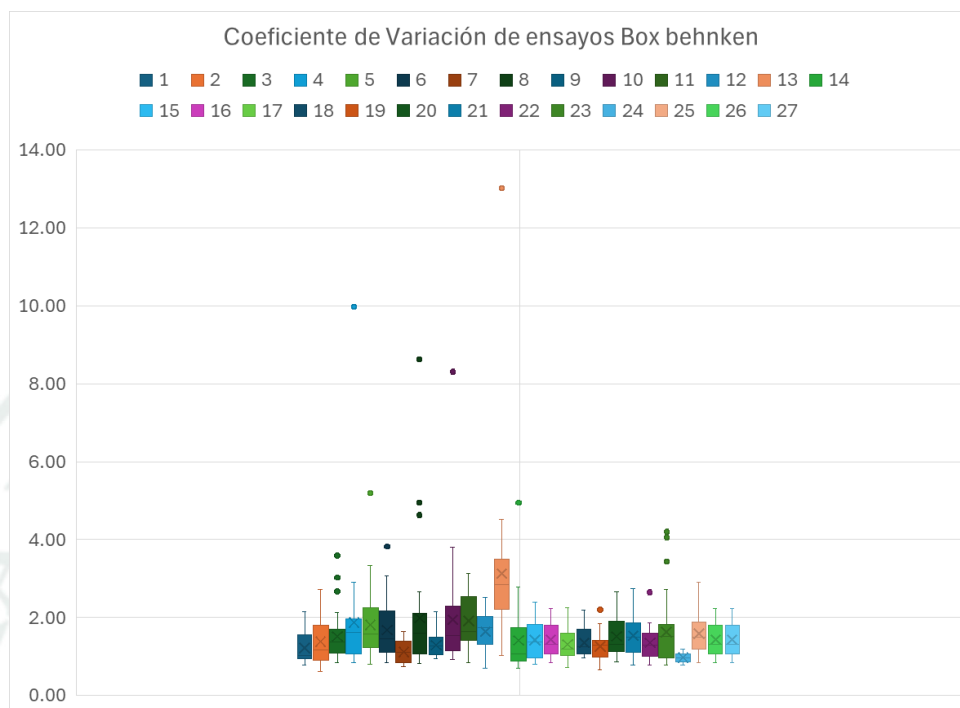
Tabla 12*Cuantificación de Morfología de Fibras*

Número de muestra B	Promedio (μm)	Coefficiente de Variación
1	1.218	0.306
2	1.386	0.416
3	1.516	0.416
4	1.873	0.86
5	1.816	0.494
6	1.684	0.436
7	1.122	0.253
8	1.03	1.514
9	1.29	0.217
10	1.946	0.704
11	1.913	0.377
12	1.642	0.315
13	3.13	0.66
14	1.418	0.604
15	1.421	0.321
16	1.429	0.281
17	1.311	0.304
18	1.351	0.246
19	1.26	0.262
20	1.513	0.328
21	1.534	0.315
22	1.349	0.302
23	1.624	0.547
24	0.973	0.118
25	1.583	0.33
26	1.464	0.264
27	1.369	0.294

Nota. La tabla muestra el resultado de promedio en micras y el coeficiente de variación de sin unidades debido a que es un resultado adimensional, elaboración propia.

Figura 18

Diagrama de Caja y Bigotes de Diámetros de Fibras



Nota. Este gráfico permite visualizar la dispersión y la homogeneidad de los diámetros obtenidos en cada una de las 27 muestras experimentales, elaboración propia.

El comportamiento morfológico de las fibras en la membrana electrohilada se evaluó mediante un análisis con el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 18.

A nivel general, se observa que la mayoría de los experimentos presentan diámetros promedio que oscilan entre 1.00 y 2.50 μm , con variaciones significativas en la precisión del proceso. Las muestras 4, 8, 10 y 20 destacan por la presencia de valores atípicos significativamente alejados de la mediana. En el contexto del electrohilado, estos puntos suelen representar defectos estructurales, como el ensanchamiento repentino de la fibra o la formación incipiente de "beads". La muestra 13 presenta la mayor dispersión intercuartílica, lo que se traduce en una baja uniformidad de la fibra.

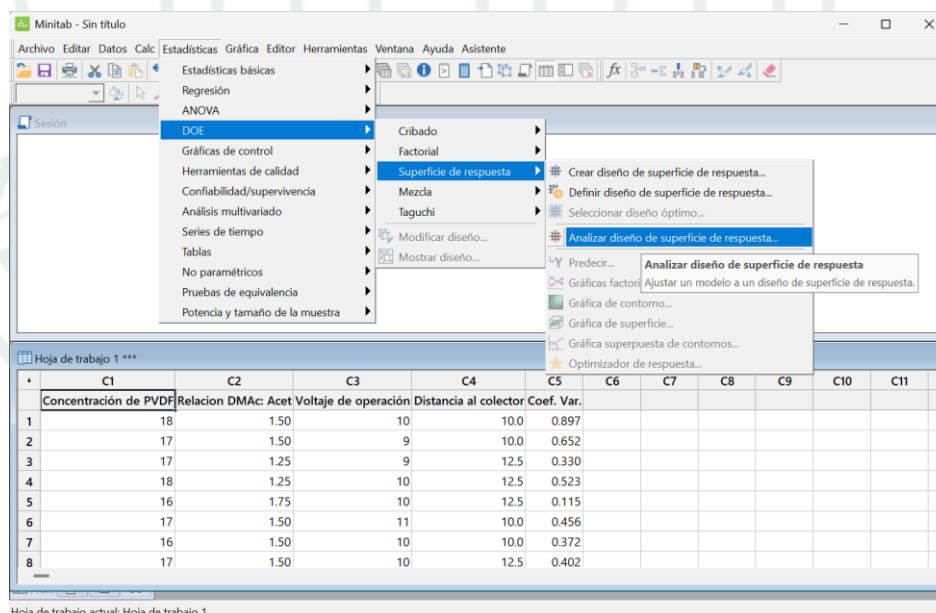
Al identificar la condición de mayor estabilidad, destaca la muestra 22. Este experimento exhibe el rango intercuartílico más reducido de todo el conjunto, visualizándose como una "caja" casi plana con bigotes extremadamente cortos. Esta mínima variación indica que las condiciones de operación para la muestra 22 lograron un equilibrio ideal entre las fuerzas electrostáticas y viscoelásticas del polímero, resultando en la morfología más homogénea y controlada de las 27 pruebas realizadas.

4.5. Análisis de Diseño De Superficie de Respuesta

En esta sección se utiliza técnicas estadísticas y matemáticas para modelar, mejorar y optimizar la respuesta que en este caso es la morfología de la membrana electrohilada. Para esto se utilizó el software de Minitab, la opción de Estadísticas > DOE > Superficie de respuesta > Analizar diseño de superficie de respuesta, este procedimiento se puede observar en la Figura 19. Los resultados se pueden observar en el Anexo 6.

Figura 19

Análisis de diseño de superficie de respuesta en software Minitab



Nota. En la zona inferior se coloca la lista de combinaciones de cada uno de los experimentos junto con su respuesta, elaboración propia.

Tabla 13*Resumen del Modelo*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.19999	82.73%	62.59%	0.53%

Nota. Esta respuesta está dada por el software Minitab, elaboración propia.

El valor S representa la desviación estándar de los residuos (la distancia promedio entre los datos experimentales y los valores ajustados por el modelo). Un valor S aproximado de 0.20 indica que las predicciones del modelo sobre la variabilidad de las fibras se desvían, en promedio, solo un 0.20 de los valores reales medidos. Cuanto menor sea este valor en relación con la magnitud de tus respuestas, más precisa será la estimación del diámetro de fibra, elaboración propia.

Coefficiente de Determinación ($R^2 = 82.73\%$) es el indicador de "bondad de ajuste". Indica qué porcentaje de la variación observada en el Coeficiente de Varianza (CV) puede explicarse por los cambios en tus cuatro factores (concentración, relación DMAc: Acetona, voltaje y distancia). Este modelo explica con un 82.73% de la variabilidad total. En procesos complejos como el electrohilado, un R^2 superior al 80% se considera robusto, lo que demuestra que has seleccionado los parámetros de operación correctos para controlar la uniformidad de la malla.

Con respecto al R^2 ajustado, existe una brecha significativa entre el 82.73% y el 62.59%. Esto sugiere que algunos de los términos incluidos en la ecuación cuadrática (posiblemente algunas interacciones o términos al cuadrado que tuvieron valores de $p > 0.05$ en el ANOVA) no están aportando suficiente fuerza predictiva al modelo.

El R^2 predicho indica qué tan bien el modelo predice la respuesta para nuevas observaciones. Un valor de 0.53% es bajo. Esto indica que, aunque el modelo explica bien los datos que ya tienes (R^2 alto), no es capaz de predecir nuevos experimentos con precisión.

Tras el ajuste de los datos experimentales obtenidos mediante el diseño Box Behnken, se generó la Ecuación de regresión de segundo orden que describe el comportamiento del Coeficiente de Varianza (CV) en función de los parámetros de electrohilado.

$$\begin{aligned} \text{Coef. Var} = & 184.8 - 12.98 \text{ Concentración de PVDF} - 11.57 \text{ Relacion DMac: Acet} \\ & - 13.64 \text{ Voltaje de operación} + 0.167 \text{ Distancia al colector} \\ & + 0.2066 \text{ Concentración de PVDF} * \text{Concentración de PVDF} \\ & - 0.49 \text{ Relacion DMac: Acet} * \text{Relacion DMac: Acet} + 0.1686 \text{ Voltaje de operación} \\ & * \text{Voltaje de operación} + 0.0025 \text{ Distancia al colector} * \text{Distancia al colector} \\ & + 0.530 \text{ Concentración de PVDF} * \text{Relacion DMac: Acet} \\ & + 0.578 \text{ Concentración de PVDF} * \text{Voltaje de operación} \\ & - 0.0367 \text{ Concentración de PVDF} * \text{Distancia al colector} \\ & + 0.216 \text{ Relacion DMac: Acet} * \text{Voltaje de operación} + 0.176 \text{ Relacion DMac: Acet} \\ & * \text{Distancia al colector} + 0.0129 \text{ Voltaje de operación} * \text{Distancia al colector} \end{aligned}$$

Nota. Esta ecuación fue obtenida del software Minitab.

El análisis de esta ecuación revela que el proceso no es lineal, destacando la presencia de términos cuadráticos significativos, especialmente para la concentración de PVDF ($p = 0.034$). Esto indica la existencia de una región de estabilidad óptima dentro del espacio experimental, elaboración propia.

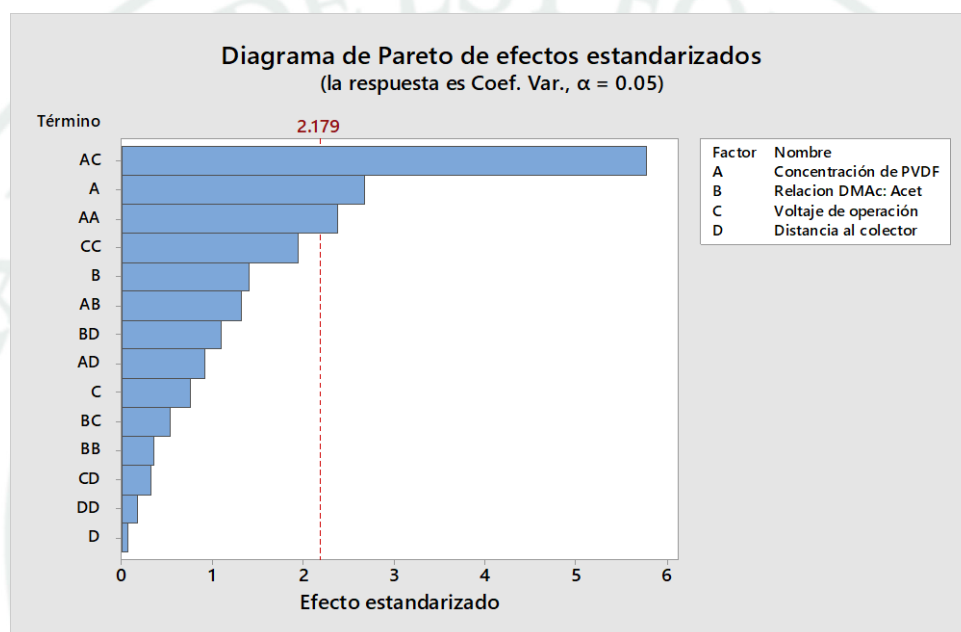
La interacción más relevante ocurre entre la concentración de PVDF y el voltaje de operación ($p < 0.0001$), lo cual es coherente con la física del proceso de electrohilado: la fuerza electrostática necesaria para estirar el chorro polimérico depende intrínsecamente de la viscosidad y tensión superficial de la solución. Un coeficiente positivo en esta interacción sugiere que a medida que ambas variables aumentan simultáneamente fuera de su rango óptimo, el coeficiente de varianza se eleva, favoreciendo la aparición de irregularidades en el diámetro de las fibras.

La razón por qué hay números tan grandes (como el 184.8 o el -12.98), explica que es porque la ecuación está en unidades reales (% (p/v), kV, cm) y no en unidades codificadas (-1, 0, +1). Esto hace que los coeficientes absorban las magnitudes de las unidades, pero el comportamiento del modelo sigue siendo el mismo.

Para determinar la jerarquía de influencia de los parámetros de operación sobre el Coeficiente de Varianza (CV), se utilizó un Diagrama de Pareto de efectos estandarizados. Este análisis permite discriminar entre los efectos vitales y los triviales mediante un valor crítico de comparación de 2.179, correspondiente a un nivel de significancia de 0.05%.

Figura 20

Diagrama de Pareto de superficie de respuesta



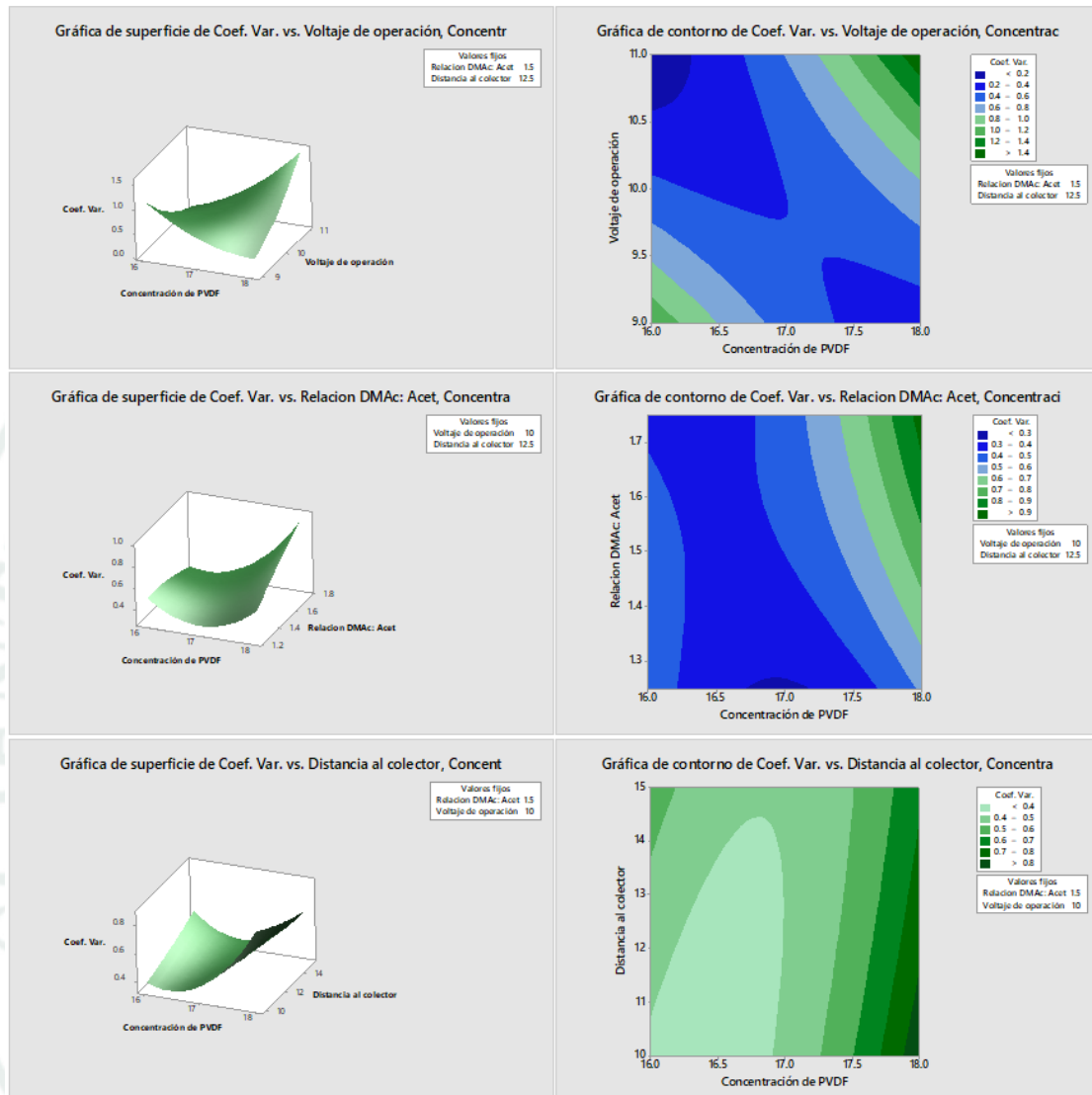
Nota. Gráfico generado mediante el software Minitab.

Los resultados revelan que la interacción entre la concentración de PVDF y el voltaje de operación es el factor con mayor impacto estadístico en la uniformidad de las fibras. Asimismo, la concentración de polímero manifiesta una influencia significativa tanto en su componente lineal como cuadrático, validando la naturaleza no lineal del proceso de electrohilado y la existencia de una región de estabilidad reológica óptima.

Por el contrario, factores como la distancia al colector y la relación de solventes se situaron por debajo del umbral de significancia, indicando que el sistema presenta una alta tolerancia a variaciones en estos parámetros dentro del espacio experimental definido. Este hallazgo permite simplificar el control del proceso, priorizando el ajuste preciso de la carga polimérica y el campo eléctrico para minimizar la aparición de defectos en la membrana.

Figura 21

Gráficos de superficies de respuesta 3D y gráficos de contorno 2D del análisis de superficie de respuesta



Nota. Elaboración propia

Según el Diagrama de Pareto de la Figura 20, la interacción entre la concentración de PVDF y el voltaje de operación (AC) constituye el efecto dominante, superando con creces el umbral de significancia de 2.179, elaboración propia.

Este fenómeno se visualiza en las gráficas de superficie y contorno de la Figura 21, donde la región de respuesta óptima (mínimo CV < 0.2) se localiza en un “valle” de estabilidad que requiere un equilibrio preciso: concentraciones bajas de PVDF como 16%

(p/v) demandan voltajes moderados para evitar inestabilidades, mientras que concentraciones mayores desplazan el punto de operación hacia voltajes más altos. Por el contrario, la distancia al colector demostró ser el factor de menor impacto, con una superficie de respuesta prácticamente plana en su eje, lo que confirma la robustez del proceso frente a variaciones en el tiempo de vuelo de la fibra dentro del rango estudiado. En conclusión, la minimización del CV y, por ende, la obtención de mallas homogéneas y libres de defectos se logra priorizando el control estricto de la viscosidad de la solución y su interacción con el campo eléctrico aplicado.

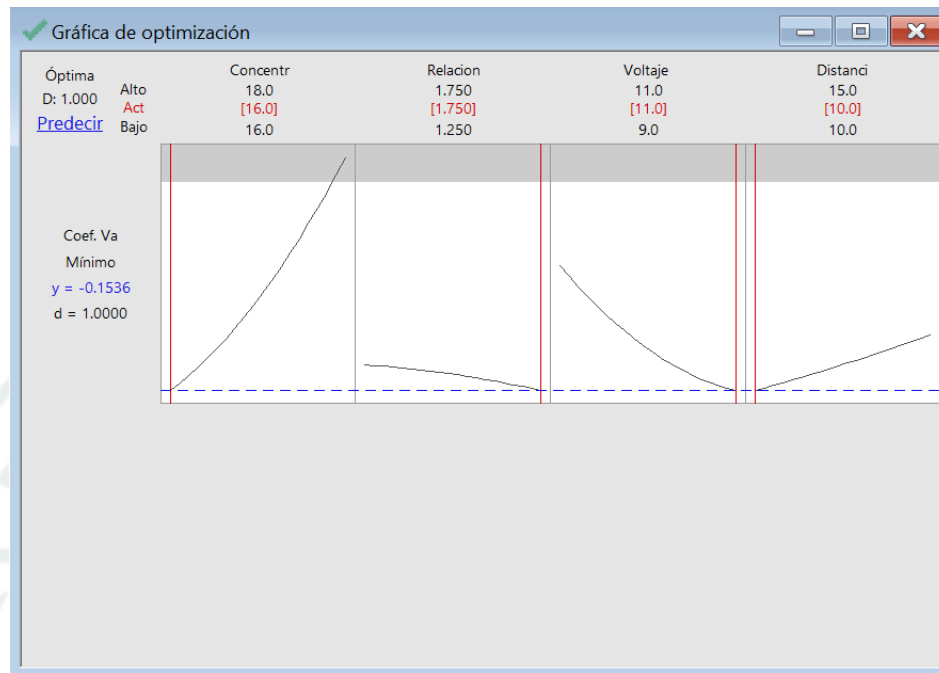
Al evaluar la relación entre la concentración de PVDF y la proporción de solventes (DMAc: Acetona) con respecto a la variable de respuesta, se observa que la región de respuesta óptima, caracterizada por los valores mínimos del Coeficiente de Varianza (CV < 0.3), se localiza preferentemente en niveles bajos de concentración polimérica como 16% (p/v). La gráfica de contorno revela que, en este nivel de concentración, el sistema presenta una alta robustez frente a cambios en la relación de solventes, manteniendo una uniformidad superior en gran parte del rango operativo. Este comportamiento sugiere que una menor viscosidad inicial facilita un estiramiento más estable y homogéneo del chorro polimérico.

4.6. Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta.

Los resultados arrojan una configuración óptima consistente en una concentración de PVDF del 16.0% (p/v), una relación DMAc: Acetona de 1.750, un voltaje de 11.0 kV y una distancia al colector de 10.0 cm. El análisis de las pendientes en la gráfica de optimización ratifica que la concentración polimérica es el factor con mayor sensibilidad sobre la respuesta, seguida por el voltaje. Esta combinación de parámetros asegura la formación de una malla electrohilada con la máxima uniformidad estructural y la menor dispersión en la distribución de diámetros dentro del espacio experimental estudiado.

Figura 22

Gráfica de optimización de Coeficiente de Varianza

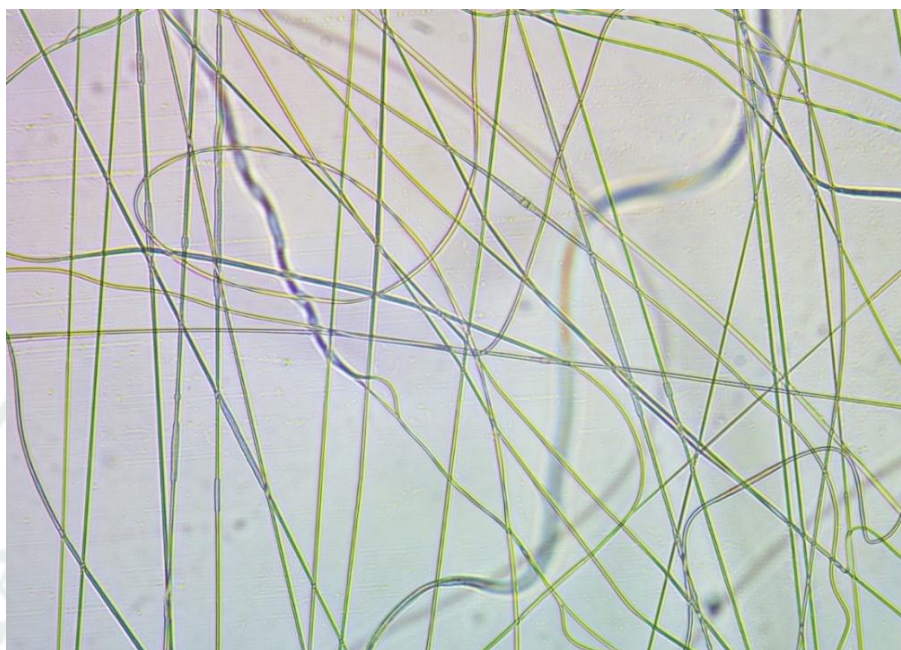


Nota. Elaboración propia

La Figura 22 muestra este resultado visual es la evidencia física de que los niveles seleccionados por el software Minitab (distancia de 10.0 cm y relación DMAc: Acetona de 1.750) minimizaron efectivamente el Coeficiente de Varianza (CV), logrando la máxima estabilidad morfológica. Aunque se percibe una fibra con una morfología ligeramente ondulada en el sector izquierdo en la Figura 23, la estructura general representa el estándar para pasar a la próxima etapa del diseño, pasando también por SEM, como se observa en la Figura 24.

Figura 23

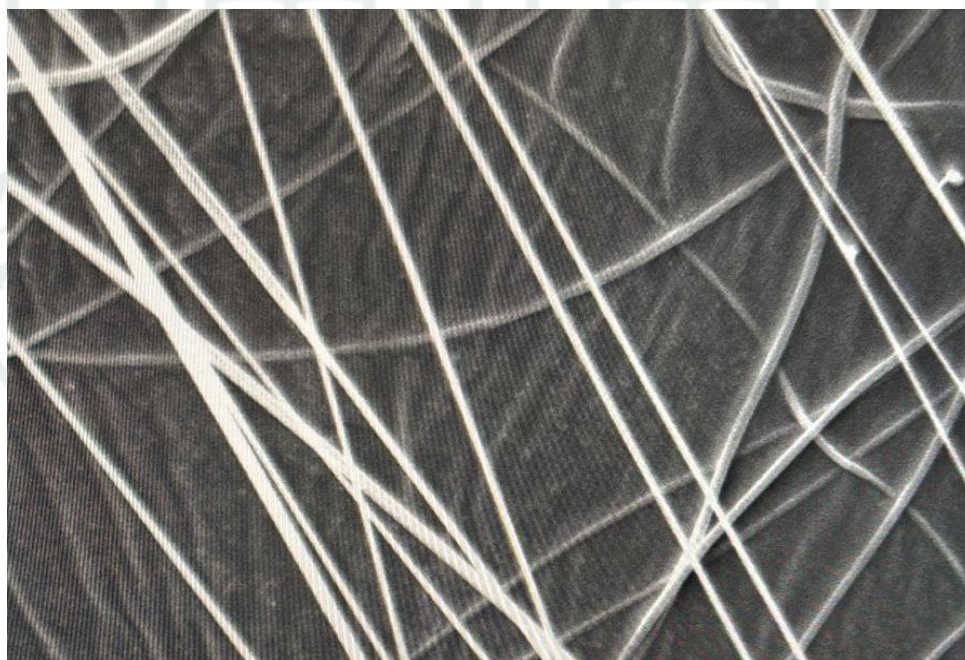
Micrografía de Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta.



Nota. Elaboración propia

Figura 24

Micrografía SEM de Optimización de Análisis de Superficie de Respuesta



Nota. Elaboración propia

4.7. Sonicación del Grafeno

Establecidos los parámetros de electrohilado para nuestra muestra final ahora se dirige a la etapa de funcionalización eléctrica con grafeno.

Se pesó 0.1 g de grafeno en la balanza analítica, como se observa en la Figura 25. Luego se vaciaron en un vaso de precipitado con 50 ml de agua destilada y se agitó por 60 y 120 min usando un agitador magnético para dispersar el grafeno. Se tomaron muestras de 2 cm × 2 cm de lados y colocados dentro de un vaso de precipitado de 10 mL como se puede observar en la Figura 26. Luego este fue introducido en un equipo de ultrasonido por 60 y 120 minutos, a temperaturas de 60 y 80 °C.

Figura 25

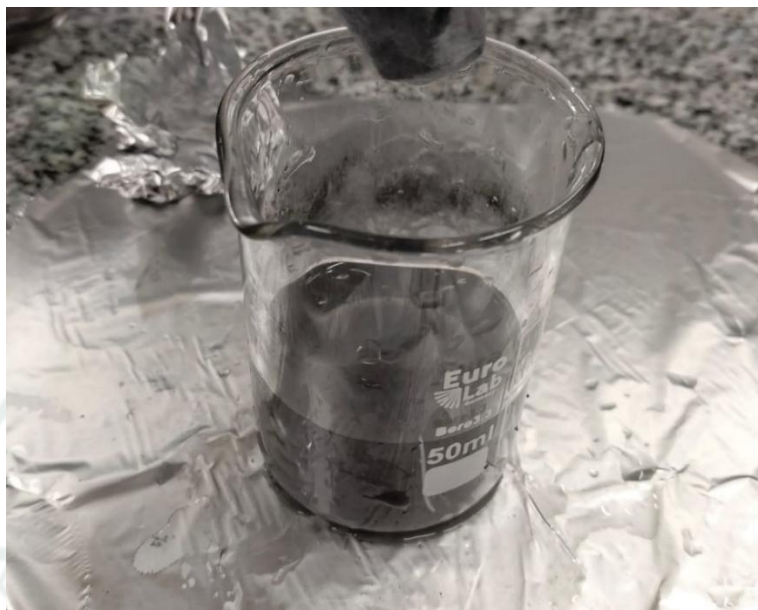
Polvo de Grafeno



Nota. Medición de la masa de polvo de grafeno en una balanza analítica de alta precisión.

Figura 26

Dispersión de grafeno en agua destilada



Nota. La muestra de 2×2cm de la malla de electrohilado fue introducida en el vaso de precipitado donde se encuentra la dispersión de grafeno y cerrada en su parte superior con un trozo circular de bolsa para autoclave, elaboración propia

Figura 27

Sonicación de Membrana Electrohilada



Nota. Se vertió agua destilada dentro equipo se sonicación a un volumen mayor al 80% de su contenido total, elaboración propia.

4.7.1. Muestra G01

El primer ensayo G01 fue realizado a 60 °C por 60 minutos, al terminar el proceso de sonicación se esperó un tiempo de reposo de 20 minutos para su enfriamiento. La membrana electrohilada se retiró con una pinza como se puede observar en la Figura 28. La coloración grisácea resultante confirmó la incorporación de la carga de grafeno en la membrana de PVDF. La muestra extraída resultó con dobleces formando una masa semi compacta. Esta forma resultante puede que haya dificultado el ingreso de grafeno en el proceso de sonicación.

Luego fue llevado al microscopio óptico para su evaluación, el resultado se puede observar en la Figura 29. Se observan depósitos de grafeno que se presentan como cuerpos opacos de geometría irregular, distribuidos a lo largo de la arquitectura de las fibras. Estos depósitos varían en tamaño, encontrándose partículas individuales que concuerdan con el diámetro de 2-7 μm especificado en la ficha técnica, así como aglomerados de mayor escala que alcanzan dimensiones superiores a los 25-28 μm .

Figura 28

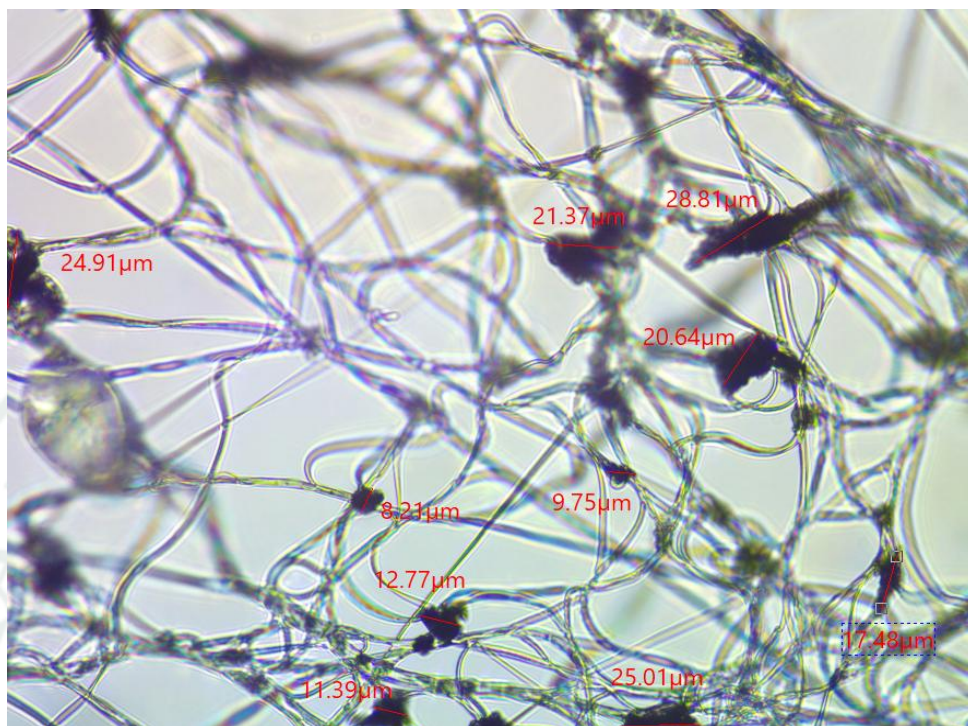
Extracción de Membrana Electrohilada G01



Nota. Elaboración propia

Figura 29

Microscopía de Membrana Electrohilada G01

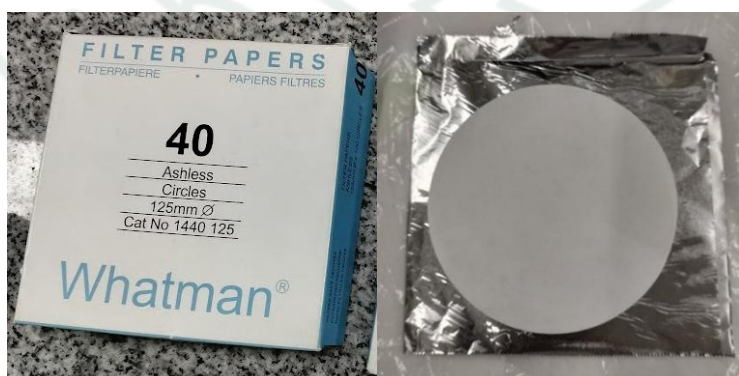


Nota. Los cúmulos de color negro observados son pertenecientes al grafeno diluido.

Para el segundo ensayo se decidió filtrar el grafeno para que la deposición de granos de grafeno sea principalmente de granos más finos. El filtro usado se puede observar en la Figura 30, elaboración propia.

Figura 30

Papel filtro de 8 µm



Nota. Elaboración propia

Figura 31

Filtración de Grafeno



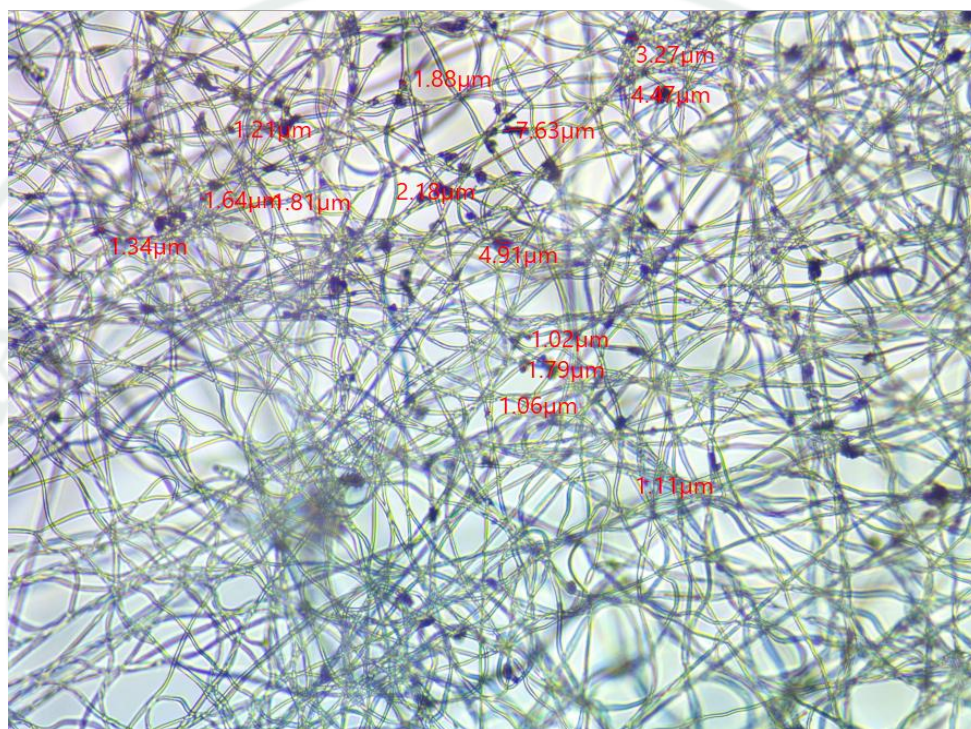
Nota. La filtración se hizo de manera manual, sumergiéndolo lentamente, elaboración propia.

En el ensayo inicial se observaron aglomerados de grafeno de gran tamaño, alcanzando dimensiones críticas de hasta $28.81\ \mu\text{m}$. Tras el filtrado con papel de $8\ \mu\text{m}$, la nueva micrografía muestra una ausencia total de estos cúmulos masivos, limitando la presencia de partículas a un rango mayoritariamente inferior a los $5\ \mu\text{m}$, con medidas frecuentes de $1.02\ \mu\text{m}$, $1.21\ \mu\text{m}$ y $2.18\ \mu\text{m}$. Mientras que en la primera muestra el grafeno se depositaba de forma errática creando zonas de saturación en la red de fibras, la muestra filtrada exhibe una distribución finamente dispersa. Se observan granos de grafeno que se han anclado a las fibras de PVDF de manera individual, manteniendo la porosidad de la malla y evitando la obstrucción de los canales intersticiales.

Al tener muchos granos pequeños (entre 1.0 y 4.9 μm) distribuidos uniformemente, aumentas drásticamente la probabilidad de que se formen puentes eléctricos entre las fibras. Esto se conoce como reducir el umbral de percolación.

Figura 32

Microscopía de Membrana Electrohilada G01



Nota. Elaboración propia

4.7.2. Muestra G02

Para en ensayo numero dos ya no se realizó el proceso de filtrado, solo se agitó por 60 minutos la dispersión de grafeno y se realizó sonicación por 4 horas a 70 °C. Para evitar que se plieguen las caras de la membrana se creó un marco para evitar que la membrana electrohilada se aglomere y el proceso de sonicación tenga mayor efecto como se puede observar en la Figura 33. Al finalizar, se apagó el equipo y se esperó 20 minutos a que enfriara para poder retirarlo, se lavó con agua destilada lo que ocasiono que se desprendiera gran cantidad de grafeno adherido perdiendo el color grisáceo como se ve en la Figura 34.

Figura 33

Muestra G02 con Marco para Sonicación



Nota. Elaboración propia

Figura 34

Muestra G02 Sonicada



Nota. Elaboración propia

4.7.3. Muestra G03

El ensayo número tres de sonicación al igual que el anterior ensayo no se realizó un filtrado previo de la dilución de grafeno. La sonicación se llevó a cabo por 6 horas a una temperatura de 80°C. Se espero 30 min para retirar la membrana del equipo de ultrasonido, luego se llevó esta misma a una estufa para secado, regulada a 50°C por 120 minutos. El resultado se puede observar en la Figura 35.

Figura 35

Muestra G03 Sonicada



Nota. Elaboración propia

4.7.4. Muestra G04

El cuarto ensayo de sonicación tampoco se realizó con un filtrado previo a la dilución de grafeno en agua destilada. La sonicación se llevó a cabo por 8 horas a una temperatura de 70°C. De igual manera que en la anterior prueba, se esperó 30 minutos para que la se reduzca la temperatura dentro del sonicador para retirar el vaso de precipitado. Se retiró con pinzas para luego llevarlo a la estufa para su secado a una temperatura de 50°C por 120 minutos. Se mostro un color característico grisáceo, como se puede observar en la Figura 36.

Figura 36

Muestra G04 Sonicada



Nota. Elaboración propia



CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Hallazgos en Pruebas Preliminares

Las pruebas preliminares permitieron identificar la "ventana de trabajo" técnica. Un hallazgo crítico fue la incompatibilidad de concentraciones elevadas 20% (p/v) con el elevado peso molecular del PVDF empleado.

5.1.1. Viscosidad y Obstrucción

En la solución S1, la viscosidad excedió la capacidad del sistema, provocando desacoplamiento magnético y obstrucciones en la aguja. Esto demuestra que la viscosidad, derivada de la concentración, es el parámetro inicial del proceso.

5.1.2. Contraste Morfológico

El ensayo M02 (18% (p/v) de PVDF, 19 kV) mostró una densidad masiva de "beads" de 8 μm y fibras discontinuas. En contraste, el M08 (18% (p/v) de PVDF, 11 kV), al reducir el voltaje y aumentar la distancia, logró una red homogénea y libre de defectos. Esto sugiere que el voltaje excesivo puede desestabilizar el chorro si no hay un equilibrio con la viscoelasticidad de la solución.

5.2. Análisis del Diseño Box-Behnken

El diseño experimental permitió cuantificar qué parámetros realmente gobiernan la uniformidad, medida a través del Coeficiente de Varianza (CV).

5.2.1. La Interacción Crítica (Concentración - Voltaje)

El Diagrama de Pareto de tu investigación identifica la interacción AC (Concentración - Voltaje) como el factor de mayor impacto estadístico ($p < 0.0001$). Esto valida que no se puede optimizar el voltaje sin considerar la carga polimérica; a mayor concentración, se requiere un campo eléctrico más preciso para estirar las cadenas entrelazadas sin romper el chorro.

5.2.2. Efecto de la Concentración

Fue el factor con mayor significancia tanto lineal ($p = 0.020$) como cuadrática ($p = 0.034$). Esto confirma que existe un "punto dulce" reológico (determinado en 16% (p/v) para el sistema) donde las fuerzas elásticas superan a la tensión superficial, eliminando la formación de beads.

5.3. El Coeficiente de Variación como Predictor de la Calidad Morfológica

La relación entre el CV y la aparición de defectos es inversamente proporcional a la calidad:

- Menor CV = Mayor Uniformidad: Un CV bajo, como el de la muestra B25 con 0.1179, indica que el estiramiento uniaxial fue constante, produciendo diámetros similares y una porosidad abierta.
- Relación con *Beads*: Los valores altos de CV en el Anexo 5, como la muestra B08 con 1.52, coinciden con distribuciones diametrales caóticas donde la presencia de perlas actúa como puntos de acumulación de masa, elevando la desviación estándar del sistema.

5.4. Evaluación de la Resistencia Eléctrica

La membrana sonicada previamente fue lavada con agua destilada y secada en una estufa a 50°C por 60 minutos. Al retirarla de la estufa se procedió a medir la resistencia eléctrica con un multímetro como se puede observar en la Figura 37. Las medidas de cada muestra se detallan en la Tabla 14, con diferentes procedimientos de lavado. La muestra 02 fue lavada instantáneamente luego de ser retirada del equipo de ultrasonido, mientras que la muestras 03 fue secada por 60 min antes de ser lavada.

Figura 37

Medición de Resistencia Eléctrica



Nota. Elaboración propia

Tras la incorporación de partículas de grafeno mediante el método de inmersión y sonicación, se evaluó la resistencia eléctrica superficial en 20 puntos distintos para cuatro muestras seleccionadas como se puede observar en la Figura 37. Los resultados, expresados en mega ohmios ($M\Omega$), reflejan la efectividad del proceso de deposición y la formación de redes de percolación en la estructura de la membrana electrohilada.

Tabla 14*Mediciones de Resistencia Eléctrica*

Nro.	Muestra G01 (MΩ)	Muestra G02 (MΩ)	Muestra G03 (MΩ)	Muestra G04 (MΩ)
1	-	-	-	150.6
2	-	-	-	133.5
3	-	-	-	10.09
4	-	-	122.5	15.73
5	-	14.62	113.5	18.96
6	-	-	182.6	12.7
7	-	-	174.9	-
8	-	-	134	-
9	-	18.2	149.8	-
10	-	-	-	2.23
11	-	-	-	125.3
12	-	-	7.87	-
13	-	-	0.86	0.91
14	-	-	19.87	-
15	-	-	19.05	13.81
16	-	-	-	17.98
17	-	-	-	6.61
18	-	-	-	11.32
19	-	-	127.8	-
20	-	-	-	12.08

Nota. Valores obtenidos en las mediciones de resistencia eléctrica para las diferentes muestras compuestas. Los guiones (-) indican lecturas que excedieron el límite de medición del instrumento debido al comportamiento altamente aislante, elaboración propia.

El análisis de la Tabla 14 revela una evolución clara en la captación de grafeno entre las muestras.

- **Muestra 01:** Presenta una ausencia total de lecturas en el rango de medida del multímetro calibrado en $20\text{ M}\Omega$, lo que indica que la membrana tiene una resistencia eléctrica superior a esta. Esto sugiere que, en esta condición, el grafeno no logró adherirse a las fibras de PVDF o la concentración depositada es inferior al umbral necesario para crear un camino conductivo continuo.
- **Muestra 02:** Muestra una mejora marginal con solo dos puntos de medición exitosos (14.62 y $18\text{ M}\Omega$), que se tomaron en un lugar donde se encontró una zona grisácea de 3 mm de diámetro que sugiere una acumulación en la superficie de la membrana. Esta baja densidad de puntos conductivos evidencia una deposición muy heterogénea y pobremente distribuida sobre la superficie polimérica.
- **Muestra 03:** Presenta una mayor frecuencia de puntos conductivos (11 de 20 lecturas). Sin embargo, la variabilidad es extrema, con valores que oscilan entre $0.86\text{ M}\Omega$ y $182.6\text{ M}\Omega$. Esta fluctuación de varios órdenes de magnitud indica que, aunque hay presencia de grafeno, su distribución es irregular, formando "islas" de alta conductividad rodeadas de zonas con alta resistencia.
- **Muestra 04:** Se identifica como la muestra con mejor rendimiento en términos de conectividad superficial, logrando lecturas en el 70% de los puntos evaluados. A pesar de mantener una alta dispersión (desde $2.23\text{ M}\Omega$ hasta $150.6\text{ M}\Omega$) la mayor densidad de puntos registrados sugiere que los parámetros utilizados en esta muestra favorecieron una mejor interacción fibra partícula durante la sonicación.

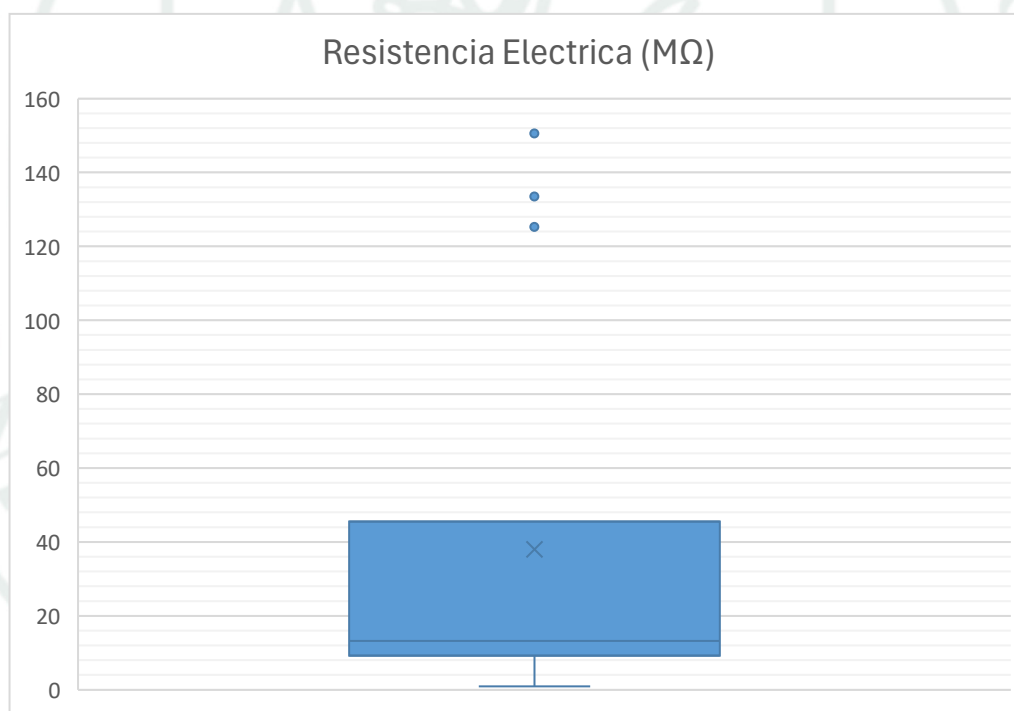
En las etapas de caracterización, específicamente en la Muestra 03, se observó una variación en los valores de resistencia, con lecturas que oscilaron entre los $0.86\text{ M}\Omega$ y $182.6\text{ M}\Omega$. Esta variabilidad de varios órdenes de magnitud sugiere una distribución heterogénea del grafeno, caracterizada por la formación de "islas" conductoras aisladas. Físicamente, esto indica que, aunque existe material conductor en la superficie, la densidad de contactos entre

las láminas de grafeno no fue suficiente para superar el umbral de percolación en toda la extensión de la muestra, dejando zonas con alta resistencia donde el polímero (aislante) predomina.

El comportamiento eléctrico mostró una mejora significativa en la Muestra G04, donde se alcanzó una mayor estabilidad en las lecturas (70% de puntos con continuidad). El incremento del tiempo de sonicación a 8 horas aumento el ingreso de grafeno y reducción de aglomerados de este mismo. Una dispersión más fina permite que las partículas se ingresen entre las distintas capas que forman las nanofibras de PVDF, aumentando la probabilidad de formación de puentes eléctricos continuos.

Figura 38

Diagrama de cajas y bigotes de resistencia eléctrica de muestra G04



Nota. Elaboración propia

La Figura 38 es una gráfica de cajas y bigotes en la cual podemos observar la línea cuartil inferior de la caja está situada en la parte inferior, aproximadamente entre 10 y 15 MΩ. La media se encuentra más cercana al cuartil superior esto debido los valores atípicos

entre 150 y 120 M Ω . Los rangos de la caja se encuentran entre 10 y 45 esto significa que más del 50% de las mediciones se encuentran en este rango, elaboración propia.

Tabla 15

Rangos y Promedio de Conductividad de Muestra G04

Mínimo	Promedio	Máximo
7×10^{-7} S/m	6.5×10^{-6} S/m	1.1×10^{-4} S/m

Nota. Elaboración propia

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos para la muestra G04, que oscilan entre 7×10^{-7} S/m y 1.1×10^{-4} S/m como se observa en la Tabla 15, demuestran la efectividad del proceso de funcionalización de las membranas de PVDF con grafeno. Al comparar estos resultados con la literatura científica, según Adabavazeh et al. (2025), se observa que la muestra alcanza niveles de conductividad propios de materiales semiconductores, superando en hasta nueve órdenes la magnitud de conductividad del PVDF puro que es de 10^{-13} S/m.

CONCLUSIONES

Se determinó que los niveles ideales para obtener fibras uniformes son una concentración de PVDF al 16.0% (p/v), un voltaje de 11.0 kV, una distancia al colector de 10.0 cm y una relación de solventes DMAc: Acetona de 1.75.

Mediante el modelo estadístico ($R^2 = 82.73\%$), se identificó que la interacción entre la concentración y el voltaje constituye la variable dominante en el proceso ($t = 5.80$, Figura 20). Este comportamiento no lineal se refleja en las gráficas de contorno de la Figura 21, donde la minimización del Coeficiente de Variación a valores de $CV < 0.2$ delimita la región de estabilidad de electrohilado óptima para la obtención de fibras uniformes.

La técnica de sonicación demostró ser un método viable para anclar partículas de grafeno a las fibras de PVDF (Figura 32), logrando una distribución dispersa en la membrana y promoviendo la formación de puentes eléctricos.

El incremento del tiempo de sonicación a 8 horas permitió reducir la resistencia eléctrica de la malla hasta valores de $0.86 \text{ M}\Omega$, alcanzando una conductividad promedio de $6.5 \times 10^{-6} \text{ S/m}$, lo que posiciona al material en el rango de los semiconductores.

RECOMENDACIONES

Se recomienda estandarizar el uso de marcos de sujeción (como el probado en la muestra G02) que mantengan la malla extendida, para evitar que la membrana se pliegue o aglomere durante la funcionalización, asegurando una exposición uniforme de todas las fibras durante el proceso de sonicación.

Se recomienda realizar un diseño de experimentos con un rango más amplio de variables o incluir parámetros ambientales como la humedad relativa y la temperatura del recinto de electrohilado, los cuales influyen en la evaporación del solvente con el fin de mejorar el coeficiente de determinación predicho.

Se recomienda realizar las pruebas mecánicas utilizando una máquina universal de ensayos para evaluar mallas delgadas y obtener una precisa del módulo de Young y la resistencia a la tracción.

Se recomienda no exceder un tiempo operación de 6 horas con la misma solución polimérica, ya que la alta volatilidad de la acetona y la tendencia a la gelificación del PVDF pueden alterar drásticamente la viscosidad, provocando obstrucciones en la boquilla y ocasionando un cono de Taylor inestable. En caso de operaciones prolongadas, se recomienda preparar soluciones en paralelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adabavazeh, Z., Johari, N., & Baino, F. (2025). Electrospun conductive polymer scaffolds: Tailoring fiber diameter and electrical properties for tissue engineering applications. *Materials Today Communications*, 46, 112596. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.112596>
- Alaeddin, M. M., Honarbakhsh Raouf, A., Bahrami, Z., & Faridi Majidi, R. (2025). Development and optimization of electrospun respiratory face masks utilizing PVDF, graphene oxide, and copper oxide nanoparticles for enhanced efficiency and antiviral protection. *Carbon Trends*, 20, 100508. <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2025.100508>
- Baji, A., Mai, Y. W., Abtahi, M., Wong, S. C., Liu, Y., & Li, Q. (2013). Microstructure development in electrospun carbon nanotube reinforced polyvinylidene fluoride fibers and its influence on tensile strength and dielectric permittivity. *Composites Science and Technology*, 88, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.08.021>
- Bello, A., Grima, M., & Laredo, E. (2014). Conductividad eléctrica de nanocompuestos polímero/nanotubos de carbono en PCL y en la mezcla PCL/PLA. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.*, 29(1), 127–132. https://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0798-40652014000100014&script=sci_abstract
- Casado Peña, F. L., Hinostroza García, Y., Hernández Patiño, I., Rossani Alatriza, G. V. M., & Guevara Mendoza, D. (2020). Análisis del potencial de innovación en apósitos para tratar heridas crónicas en la ciudad de Lima, Perú. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20(4), 657–661. <https://doi.org/10.25176/RFMH.v20i4.3195>
- Chen, W.-C., Huang, B.-Y., Huang, S.-M., Liu, S.-M., Chang, K.-C., Ko, C.-L., & Lin, C. -L. (2023). In vitro evaluation of electrospun polyvinylidene fluoride hybrid nanoparticles

- as direct piezoelectric membranes for guided bone regeneration. *Biomaterials Advances*, 144, 213228. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2022.213228>
- Cheng, H., Wang, B., Yang, K., Qiang Yang, Y., & Wang, C. (2021). A high-performance piezoresistive sensor based on poly (styrene-co-methacrylic acid)@polypyrrole microspheres/graphene-decorated TPU electrospun membrane for human motion detection. *Chemical Engineering Journal*, 420, 131152. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131152>
- Gonzales Molfino, M., Alcalde Yañez, A., Valverde Morón, V., & Villanueva Salvatierra, D. (2020). Electrospinning: Avances y aplicaciones en el campo de la biomedicina. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20(4), 706-713. <https://doi.org/10.25176/rfmh.v20i4.3004>
- Duque Sánchez, L. M., Rodríguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: La era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 14(1), 10–27. <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2013-duque.pdf>
- El-Aassar, M. R., Alolaimi, R. F., Alzaid, M., Al-Muaikel, N. S., Alhumaimess, M. S., Alsohaimi, I. H., Rafea, M. A., Zaki, M. E., El-Sayed, M. Y., & Hassan, H. M. (2025). Oil/Water separation using thiol-functionalized mesoporous silica-impregnated polyacrylonitrile/polyvinylidene fluoride electrospun nanofiber hybrid nanostructures. *Separation and Purification Technology*, 361, 131651. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.131651>
- Gonzalez, G., Nelson, A. C., Holman, A. R., Whitehead, A. J., LaMontagne, E., Lian, R., Vatsyayan, R., Dayeh, S. A., & Engler, A. J. (2023). Conductive electrospun polymer improves stem cell-derived cardiomyocyte function and maturation. *Biomaterials*, 302, 122363. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122363>

- Chen, J., Ayranci, C., & Tang, T. (2023). Piezoelectric performance of electrospun PVDF and PVDF composite fibers: a review and machine learning-based analysis. *Materials Today Chemistry*, 30, 101571. <https://doi.org/10.1016/j.mtchem.2023.101571>
- Kankane, A., Kumar Rai, D., & Janakiraman, S. (2025). Synergistic effects of halloysite nanotubes in electrospun PVDF-HFP separator for advanced sodium ion battery. *Solid State Ionics*, 428, 116947. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2025.116947>
- Khajavi, R., & Abbasipour, M. (2017). Controlling nanofiber morphology by the electrospinning process. En M. Afshari (Ed.), *Electrospun Nanofibers* (pp. 45–63). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00005-2>
- Kohestani, A. A., Xu, Z., Baştan, F. E., Boccaccini, A. R., & Pishbin, F. (2024). Electrically conductive coatings in tissue engineering. *Acta Biomaterialia*, 186, 30-62. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2024.08.007>
- Lizarazo-Fonseca, L., Muñoz Prieto, E., Vera Graziano, R., Camacho, B., Salguero, G., & Silva Cote, I. (2019). Andamios electrohilados de poli(ϵ -caprolactona)/colágeno con uso potencial en regeneración de tejido cutáneo. *Ciencia en Desarrollo*, 10(2), 197–208. <https://doi.org/10.19053/01217488.v10.n2.2019.9841>.
- Maharjan, B., Kaliannagounder, V.K., Jang, S.R., Awasthi, G.P., Bhattarai, D.P., Choukrani, G., Park, C.H., & Kim, C.S. (2020). In-situ polymerized polypyrrole nanoparticles immobilized poly(ϵ -caprolactone) electrospun conductive scaffolds for bone tissue engineering. *Materials Science & Engineering C*, 114, 111056. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111056>
- Mani, S., Kasi, A., Nagamalai, T., Subramani, V. A., Natarajan, A., Seikh, A. H., ... Ramachandran, S. K. (2024). Enhancement of piezoelectric responses of electrospun

- PVDF nanofibers through mechanical stretching and annealing process. *Materials Science & Engineering B*, 299, 117538. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117538>
- Mercante, L. A., Andre, R. S., Facure, M. H. M., Correa, D. S., & Mattoso, L. H. C. (2023). Recent progress in conductive electrospun materials for flexible electronics: Energy, sensing, and electromagnetic shielding applications. *Chemical Engineering Journal*, 465, 142847. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142847>
- Mohd Salleh, N. A. B., Afifi, A. M., Mohamed Zuki, F. B., Muhammad Sarih, N. B., Kalantari, K., & Niza Mohamad, E. (2020). Studies on properties and adsorption ability of bilayer chitosan/PVA/PVDF electrospun nanofibrous. *Desalination and Water Treatment*, 206, 177–188. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.26279>
- Mokhtari, F., Samadi, A., Rashed, A. O., Li, X., Razal, J. M., Kong, L., Varley, R. J., & Zhao, S. (2025). Recent progress in electrospun polyvinylidene fluoride (PVDF)-based nanofibers for sustainable energy and environmental applications. *Progress in Materials Science*, 148, 101376. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2024.101376>
- Qin, X. (2017). Coaxial electrospinning of nanofibers. En S. Qin (Ed.), *Electrospun nanofibers* (pp. 41–71). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00003-9>
- Rastegardoost, M., Tafreshi, O. A., Saadatnia, Z., Ghaffari, S., Park, C. B., & Naguib, H. E. (2023). Porous PVDF mats with significantly enhanced dielectric properties and novel dipole arrangement for high-performance triboelectric nanogenerators. *Applied Materials Today*, 31, 101732. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2023.101732>
- Sabet Bokati, Z., & Zebarjad, S. M. (2025). Study of the synergistic effect of electrospun fiber structure and PPy particles on the electrical conductivity and tensile strength of

PCL-PVA-PPy fibers. *Results in Engineering*, 25, 106655.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106655>

Syed, M. H., Khan, M. M., Abdullah, N., & Mohd Khushairi Mohd Zahari, M. A. (2025).

Effect of drug loading on sustained release through needleless electrospun nanocellulose/chitosan/polylactic acid-based drug delivery system. *International Journal of Biological Macromolecules*, 329, 147843.

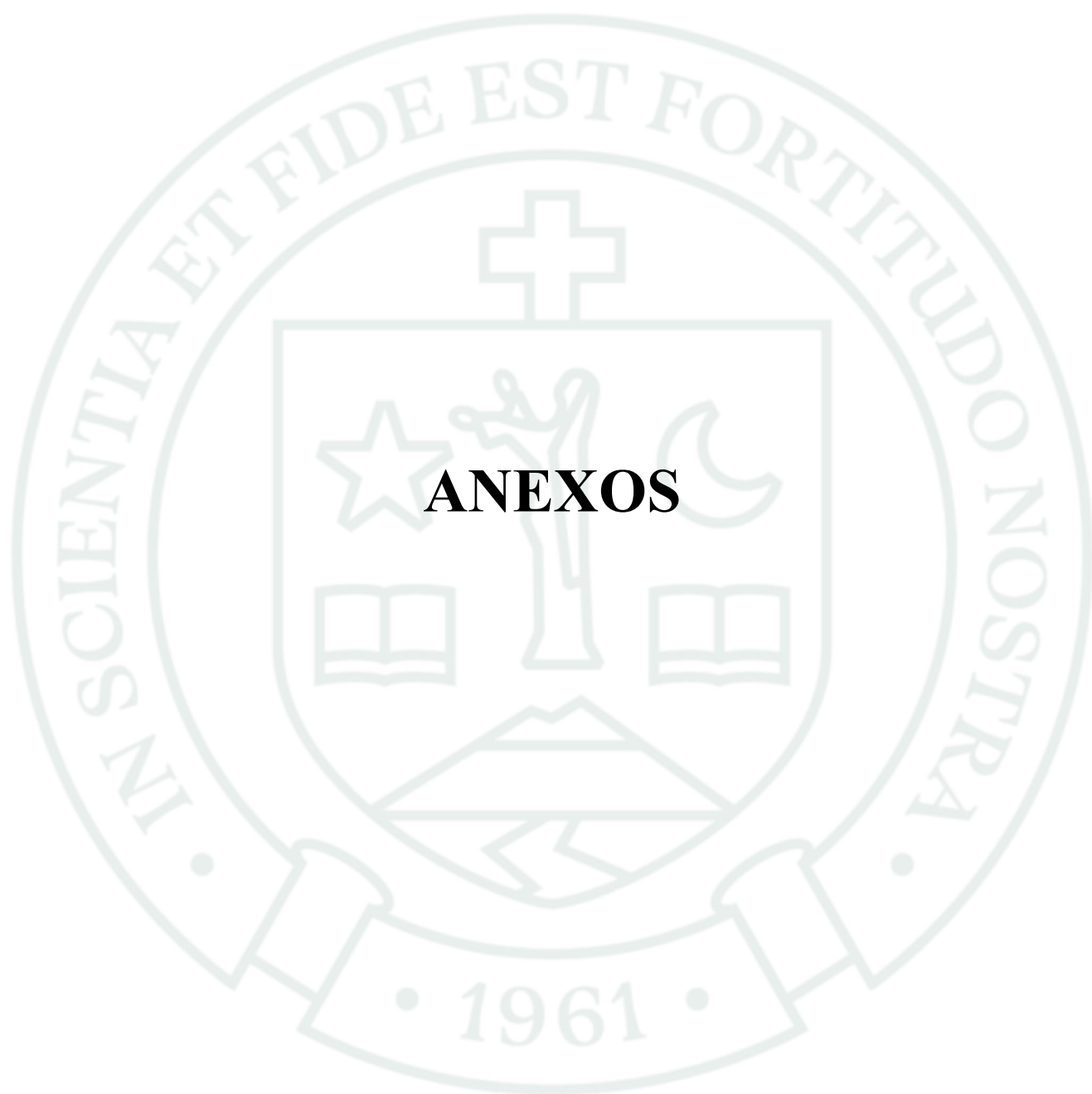
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.147843>

Villanueva, D., Valverde, V., Alcalde, A., & Gonzales, M. (2020). Electrospinning: advances and applications in the field of biomedicine. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 20(4), 3–8. <https://doi.org/10.25176/rfmh.v20i4.3004>

Li, Y., Yu, H., Zhang, Y., Zhou, N., & Tan, Z. (2022). Kinetics and characterization of preparing conductive nanofibrous membrane by in-situ polymerization of polypyrrole on electrospun nanofibers. *Chemical Engineering Journal*, 428, 133531.

<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.133531>

Zhu, J., Ge, Y., Jasper, S., & Zhang, X. (2017). Physical characterization of electrospun nanofibers. En M. Afshari (Ed.), *Electrospun Nanofibers* (pp. 161–182). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100907-9.00009-X>



ANEXOS

ANEXOS

Anexo 1. Hoja de Seguridad del Fluoruro de Polivinilideno

Material Safety Data Sheet - PVDF powder

SECTION 1 Product and Company Identification

Product Name: PVDF powder

SECTION 2 Hazards Identification

Classification according to Regulation (EC) No 1272/2008:

The product is not classified, according to the CLP regulation.

Labelling according to Regulation (EC) No 1272/2008: Not applicable

Signal word: Not applicable

SECTION 3 Composition/Information on Ingredients

Chemical Name	CAS No.	Concentration%
Polyvinylidene fluoride	24937-79-9	100

SECTION 4 First Aid Measures

Skin Contact: No hazards which require special first aid measures. Wash off with soap and water. Cool skin rapidly with cold water after contact with molten material. Do not peel polymer from the skin. Consult a physician.

Eye Contact: Hold eye open and rinse slowly and gently with water for 15-20 minutes. Get medical attention immediately.

Inhalation: Move to fresh air in case of accidental inhalation of fumes from overheating or combustion. Consult a physician.

Ingestion: Not a probable route of exposure. However, in case of accidental ingestion, call a physician.

SECTION 5 Fire-Fighting Measures

Specific Hazards during firefighting: Hazardous decomposition products formed under fire conditions. Acid fluorides Fluorinated compounds.

Suitable Extinguishing Media: Carbon dioxide (CO₂), Dry powder, Foam, Water.

Special protective equipment: In the event of fire, wear self-contained breathing for fire-fighters apparatus. Wear suitable protective equipment. Wear neoprene gloves during cleaning up work after a fire.

SECTION 6 Accidental Release Measures

Personal Precautions: ventilate the area. Refer to protective measures listed in sections 7 and 8. Material can create slippery conditions.

Environmental Precautions: No special environmental precautions required.

Methods for Cleaning Up: Sweep up and shovel into suitable containers for disposal. Clean contaminated floors and objects thoroughly while observing environmental regulations.

SECTION 7 Handling and Storage

Advice on safe handling: When opening containers, avoid breathing vapors that may be emanating. Avoid contamination of cigarettes or tobacco with dust from this material. Provide appropriate exhaust ventilation at dryers, machinery and at places where dust or volatiles can be generated. In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment. Do not use a torch to clean this material from equipment without local exhaust ventilation and respirator.

Advice on protection against fire and explosion storage: Take necessary action to avoid static electricity discharge (which might cause ignition of organic vapors).

Requirements for storage areas and containers: Keep container tightly closed in a dry and well-ventilated place. Protect from contamination.

SECTION 8 Exposure Controls/Personal Protection

Engineering Control: Ensure adequate ventilation, especially in confined areas. Good general ventilation should be provided to keep dust concentrations below the exposure limits. Local exhaust ventilation should be employed to minimize airborne contamination.

Eye Protection: Safety glasses with side-shields

Body Protection: If there is a potential for contact with hot/molten material wear heat resistant clothing and footwear.

Hand Protection: Wear rubber protective gloves.

Other Protection: No smoking at work site. Maintain good hygiene.

SECTION 9 Physical and Chemical Properties

Colour	White powder
Odour	Odorless
Melting point/ range	155 - 168 °C
Flash point	not applicable
SSG	1.74 -1.77g/cm ³
Solubility(water)	insoluble

SECTION 10 Stability and Reactivity

Conditions to avoid: To avoid thermal decomposition, do not overheat. Abnormally long processing time or high temperatures can produce irritating and toxic fumes. Stable under normal conditions.

Materials to avoid: Powdered metals, finely divided aluminum, potent oxidizers like fluorine (F₂), and related compounds powdered metals, finely divided aluminum, potent oxidizers like fluorine (F₂).

Hazardous reactions: During drying, cleaning and molding, small amounts of hazardous gases and/or particulate matter may be released. These may irritate eyes, nose and throat. Large molten masses may give off hazardous gases. No decomposition if used as directed.

Hazardous Decomposition Products: Hydrogen fluoride, Carbonyl fluoride, acid fluorides.

SECTION 11 Toxicological Information

Information on hazard classes as defined in Regulation (EC) No 1272/2008

Acute oral toxicity: ALD/rat: > 5,000 mg/kg

Acute inhalation toxicity: LC50/4 h/rat: 7.3 mg/l. The thermal decomposition vapours of fluorinated polymers may cause polymer fume fever with flu-like symptoms in humans, especially when smoking contaminated tobacco.

Skin irritation: Non-irritant

Eye irritation: Non-irritant

Sensitization: Not a skin sensitizer.

Human experience: Excessive exposures may affect human health, as follows: Inhalation: Polymer fume fever, Fever, Cough Eyes, Nasal inner lining, Upper respiratory tract: Irritation.

SECTION 12 Ecological Information

Toxicity to fish: This product has no known eco-toxicological effects.

Further information: This product has no known eco-toxicological effects.

SECTION 13 Disposal Considerations

Product: Like most thermoplastic plastics the product can be recycled. If recycling is not practicable, dispose of in compliance with local regulations. Incinerate only in incinerators capable of scrubbing out acidic combustion

Contaminated packaging: Empty containers should be taken to an approved waste handling site for recycling or disposal.

SECTION 14 Transport Information

Dangerous Goods Code: No data available **UN Number:** No data available

Packing Mark: No data available

Packing Method: Not applicable

SECTION 15 Regulatory Information

Safety, health and environmental regulations/legislation specific for the substance or mixture

No further relevant information available.

Labelling according to Regulation (EC) No 1272/2008: Not applicable

Hazard pictograms: Not applicable

Signal word: Not applicable

Hazard statements: Not applicable

SECTION 16 Other Information

Revision Date: 01-January-2024

Disclaimer: The MSDS applies to specified products, unless otherwise indicated, does not apply to mixtures of this product with other substances. The MSDS provide safety information for those who appropriately trained personnel about this product. Users of this MSDS must make independent judgments on the suitability of this MSDS under special conditions. Under special cases, the author of this MSDS will not be held responsible for any damage caused by the use of this MSDS.



Anexo 2. Hoja de Seguridad del Dimetilacetamida



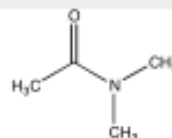
DI0860

N,N-Dimetilacetamida, para HPLC

Ficha de Datos Técnicos

Identificación

C₄H₉NO
M = 87,12 g/mol
CAS [127-19-5]
EC number: 204-826-4
Taric code: 2924 19 00



Sinónimos

Ácido acético dimetilamida

Aplicaciones

laboratory reagent, solvents (synthesis of organic products).

Especificaciones

contenido (G.C.).....	min. 99,8 %	min. transmitancia/max. absorbancia en una celda de 1,0 cm a
Identidad (IR-spectrum).....	pasa test	longitud de onda:..... T(%) A (AU)
densidad(20°/4°).....	0,940 - 0,942	275 nm..... 20 % 0,699 AU
acidez.....	max. 0,0005 meq/g	285 nm..... 50 % 0,301 AU
alcalinidad.....	max. 0,003 meq/g	310 nm..... 90 % 0,046 AU
materia no volátil.....	max. 0,0002 %	
agua (K.F.).....	max. 0,05 %	Microfiltrado a través de membranas de diámetro de poro 0,22 µm

Datos físicos

- Densidad: 0,94 g/cm³
- Solub. en agua: (20 °C): miscible
- Punto de fusión: -20 °C
- Punto de ebullición: 165 -166 °C
- Punto de inflamación: 64 °C
- Temperatura de ignición: 320 °C
- Presión de vapor: (20 °C) 1,76 hPa
- Índice de refracción: (n 20 °C/D) 1,4230
- Momento dipolar: (20 °C) 3,8 Debye
- Constante dieléctrica: (25 °C) 37,8
- Cons. de saturación: (20 °C) 12 g/m³
- Límite de explosión (alto): 11,5 Vol%
- Límite de explosión (bajo): 1,7 Vol%
- pH(200 g/l H₂O, 20 °C) ~ 4
- Hygroscopic

Seguridad - GHS

Palabra de advertencia: Peligro

Indicaciones de peligro:

H312+H332: Nocivo en contacto con la piel o si se inhala.
H360D: Puede dañar al feto.



Indicaciones de precaución:

- P261: Evitar respirar el polvo / el humo / el gas / la niebla / los vapores / el aerosol.
P280: Llevar guantes / prendas / gafas / máscara de protección.
P321: Se necesita un tratamiento específico (ver en esta etiqueta).
P304+P340: EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la víctima al exterior y mantenerla en reposo en una posición confortable para respirar.
P405: Guardar bajo llave.
P501a: Eliminar el contenido o el recipiente conforme a la reglamentación local / regional / nacional / internacional.

Transporte/Almacenamiento

- 10°C - 30°C

Anexo 3. Hoja de Seguridad de la Acetona

Sigma-Aldrich

www.sigmaaldrich.com

FICHA DE DATOS DE SEGURIDAD

de acuerdo el Reglamento (CE) No. 1907/2006

Versión 6.6
Fecha de revisión 04.01.2024
Fecha de impresión 04.04.2026
GENERIC EU MSDS - NO COUNTRY SPECIFIC DATA - NO OEL DATA

SECCIÓN 1. Identificación de la sustancia o la mezcla y de la sociedad o la empresa

1.1 Identificadores del producto

Nombre del producto : Acetona

Referencia : 34850
Marca : SIGALD
No. Índice : 606-001-00-8
REACH No. : 01-2119471330-49-XXXX
No. CAS : 67-64-1

1.2 Usos pertinentes identificados de la sustancia o de la mezcla y usos desaconsejados

Usos identificados : Reactivos para laboratorio, Fabricación de sustancias

1.3 Datos del proveedor de la ficha de datos de seguridad

Compañía : Sigma-Aldrich Inc.
3050 SPRUCE ST
ST. LOUIS MO 63103
UNITED STATES

Teléfono : +1 314 771-5765
Fax : +1 800 325-5052

1.4 Teléfono de emergencia

Teléfono de Urgencia : 800-424-9300 CHEMTREC (USA) +1-703-527-3887 CHEMTREC (International) 24 Hours/day; 7 Days/week

SECCIÓN 2. Identificación de los peligros

2.1 Clasificación de la sustancia o de la mezcla

Líquidos inflamables, (Categoría 2) H225: Líquido y vapores muy inflamables.

Irritación ocular, (Categoría 2) H319: Provoca irritación ocular grave.

Toxicidad específica en H336: Puede provocar somnolencia o

SIGALD- 34850

Página 1 de 15

The life science business of Merck operates as MilliporeSigma in the US and Canada



determinados órganos - vértigo.
exposición única, (Categoría 3),
Sistema nervioso central

2.2 Elementos de la etiqueta

Etiquetado de acuerdo con el Reglamento (CE) 1272/2008

Pictograma



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

H225

Líquido y vapores muy inflamables.

H319

Provoca irritación ocular grave.

H336

Puede provocar somnolencia o vértigo.

Consejos de prudencia

P210

Mantener alejado del calor, de superficies calientes, de chispas, de llamas abiertas y de cualquier otra fuente de ignición. No fumar.

P233

Mantener el recipiente herméticamente cerrado.

P240

Toma de tierra y enlace equipotencial del recipiente y del equipo receptor.

P241

Utilizar material eléctrico/ de ventilación/ iluminación/ antideflagrante.

P242

No utilizar herramientas que produzcan chispas.

P305 + P351 + P338

EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado.

Información suplementaria sobre riesgos (UE)

EUH066

La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.

Etiquetado reducido (<= 125 ml)

Pictograma



Palabra de advertencia

Peligro

Indicaciones de peligro

ninguno(a)

Consejos de prudencia

ninguno(a)

Información suplementaria sobre riesgos (UE)

EUH066

La exposición repetida puede provocar sequedad o formación de grietas en la piel.

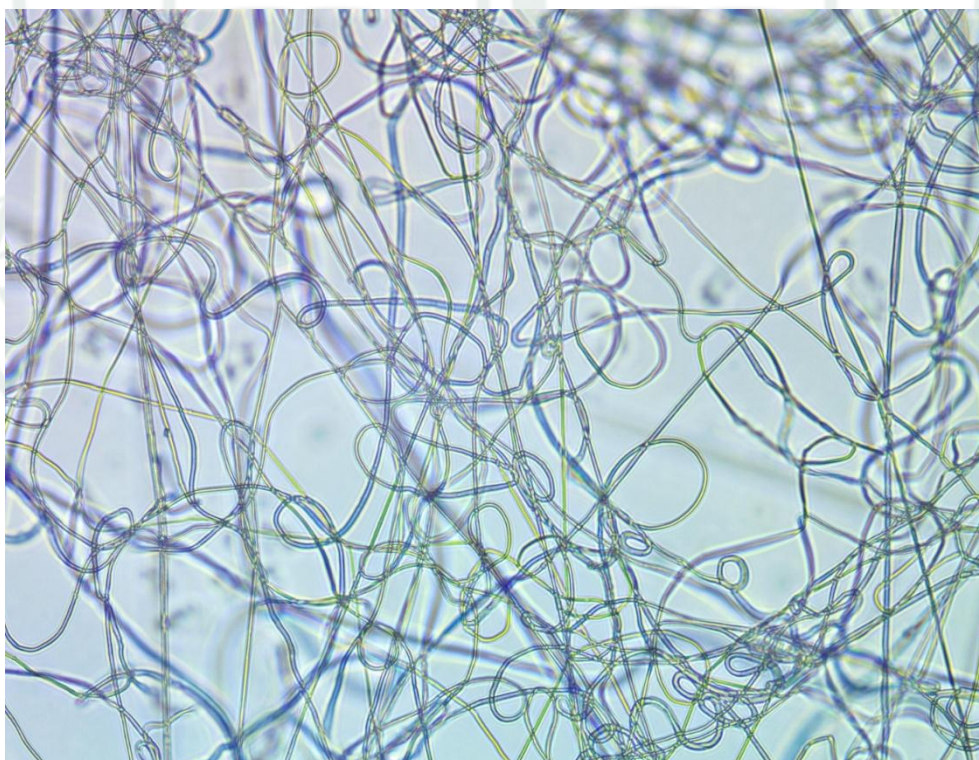
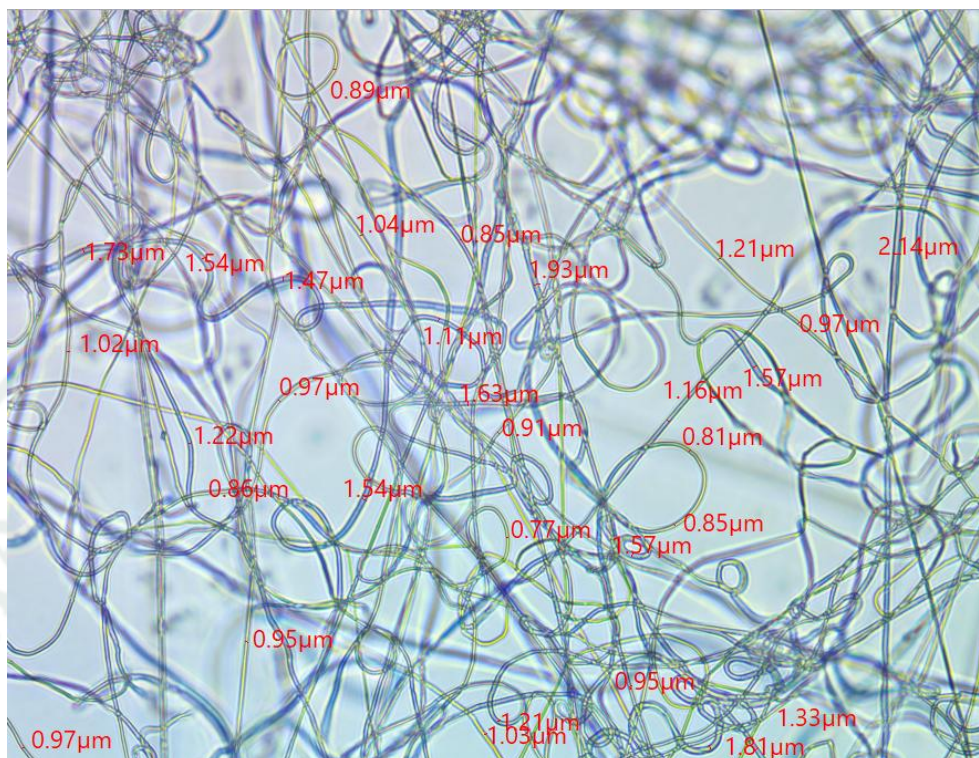
2.3 Otros Peligros

Esta sustancia/mezcla no contiene componentes que se consideren que sean bioacumulativos y tóxicos persistentes (PBT) o muy bioacumulativos y muy persistentes (mPmB) a niveles del 0,1% o superiores.

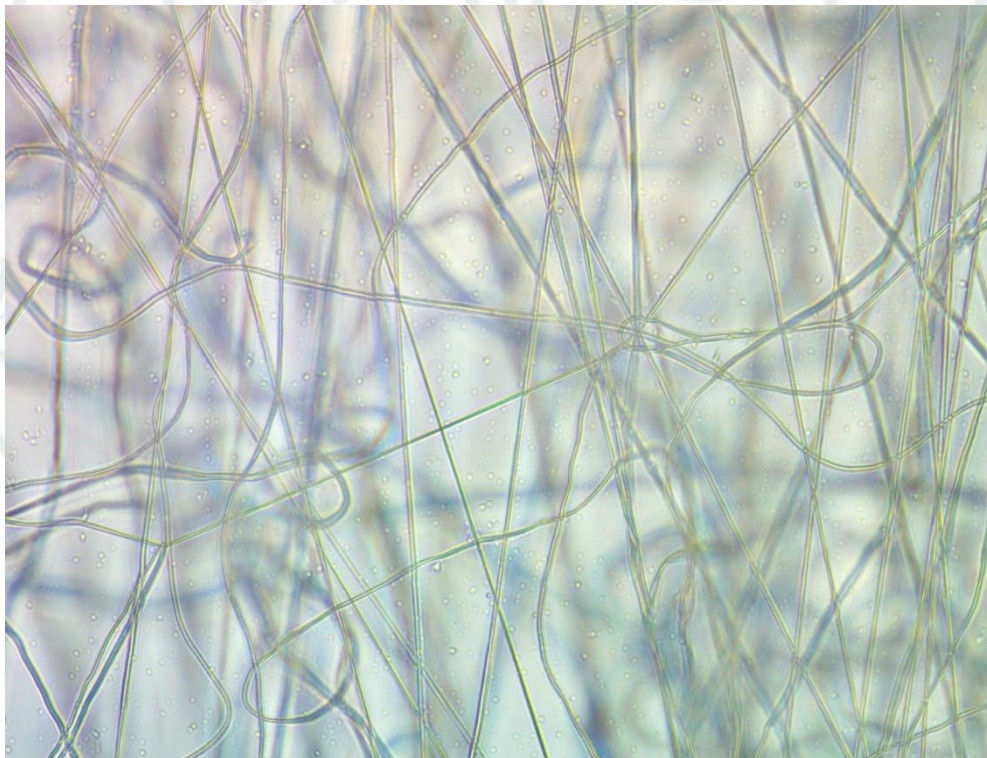
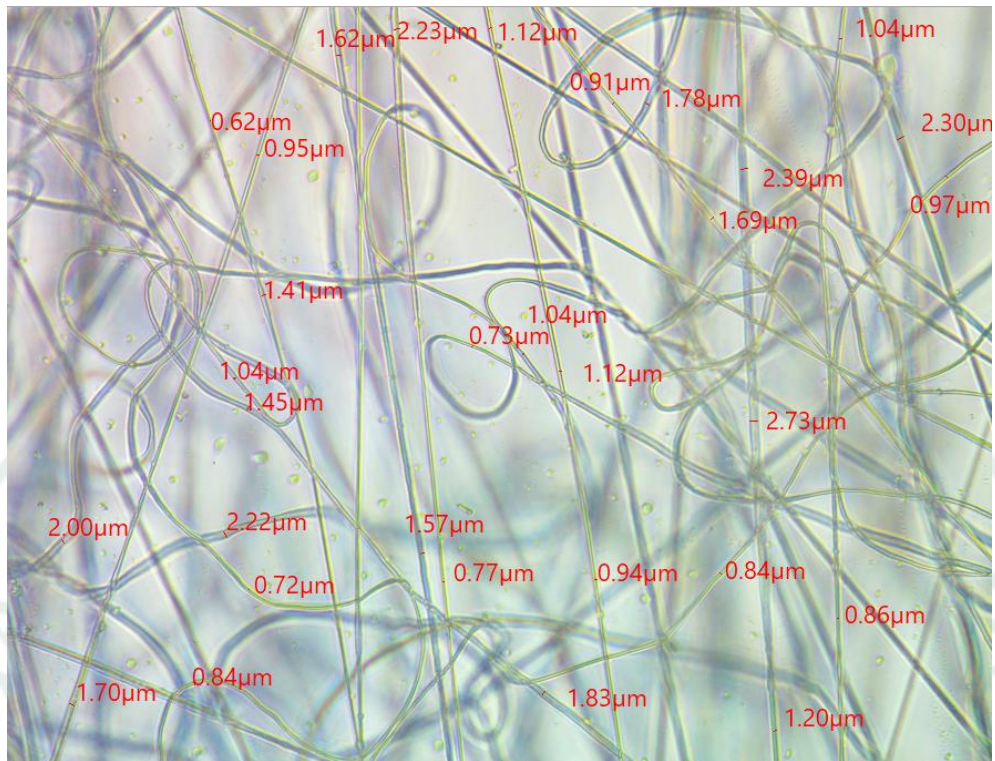


Anexo 4. Micrografías

Ensayo B01



Ensayo B02



Anexo 5. Cuantificación de Respuesta de Ensayos Box-Behnken

Nro. de medición	Ensayos Box-Behnken (B)																										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0.77	0.62	0.84	0.84	0.81	0.85	0.73	0.83	0.94	0.92	0.84	0.69	1.03	0.70	0.81	0.85	0.72	0.97	0.65	0.87	0.79	0.77	0.79	0.77	0.85	0.81	0.71
2	0.81	0.72	0.85	0.86	0.84	0.91	0.77	0.85	0.94	0.94	0.86	0.77	1.04	0.77	0.84	0.91	0.85	1.00	0.81	0.95	0.88	0.79	0.81	0.77	0.89	0.86	0.74
3	0.85	0.73	0.86	0.86	0.87	0.91	0.77	0.85	0.95	0.97	1.08	0.79	1.33	0.77	0.85	0.92	0.85	1.03	0.88	0.97	0.97	0.85	0.84	0.85	0.91	0.91	0.78
4	0.85	0.77	0.92	0.92	0.92	0.95	0.79	0.89	0.97	1.00	1.16	0.81	1.47	0.85	0.92	0.97	0.89	1.03	0.92	1.00	1.03	0.91	0.84	0.85	0.95	0.95	0.83
5	0.86	0.84	0.92	1.03	0.94	1.00	0.79	0.92	1.00	1.04	1.19	0.84	1.49	0.85	0.95	1.00	0.95	1.03	0.92	1.03	1.06	0.92	0.84	0.86	1.11	1.00	0.88
6	0.89	0.84	1.00	1.04	1.02	1.06	0.84	1.03	1.00	1.11	1.23	1.03	1.96	0.85	0.97	1.00	0.97	1.04	0.95	1.11	1.08	0.94	0.85	0.86	1.11	1.04	0.93
7	0.91	0.86	1.04	1.06	1.08	1.08	0.84	1.03	1.03	1.11	1.30	1.08	2.22	0.89	0.97	1.03	1.00	1.06	0.97	1.11	1.09	0.97	0.97	0.86	1.15	1.09	0.97
8	0.95	0.91	1.11	1.06	1.28	1.11	0.84	1.08	1.06	1.15	1.45	1.40	2.22	0.92	0.97	1.07	1.03	1.07	1.00	1.14	1.11	1.03	0.97	0.87	1.19	1.13	1.02
9	0.95	0.94	1.19	1.07	1.30	1.15	0.85	1.08	1.08	1.16	1.45	1.45	2.23	0.94	1.02	1.11	1.04	1.11	1.04	1.16	1.21	1.04	1.04	0.87	1.21	1.18	1.07
10	0.95	0.97	1.20	1.72	1.33	1.15	0.86	1.11	1.11	1.19	1.45	1.47	2.34	1.03	1.11	1.14	1.08	1.11	1.06	1.16	1.21	1.09	1.09	0.87	1.28	1.22	1.11
11	0.97	1.04	1.21	1.11	1.35	1.19	0.89	1.30	1.14	1.19	1.47	1.55	2.53	1.04	1.26	1.16	1.11	1.11	1.09	1.19	2.51	1.11	1.15	0.94	1.31	1.25	1.16
12	0.97	1.04	1.26	1.21	1.35	1.20	0.92	1.51	1.15	1.21	1.49	1.57	2.53	1.04	1.27	1.21	1.11	1.15	1.21	1.20	1.21	1.16	1.19	0.94	1.37	1.30	1.21
13	0.97	1.12	1.27	1.31	1.51	1.21	1.02	1.59	1.15	1.37	1.53	1.62	2.61	1.07	1.30	1.21	1.11	1.16	1.22	1.21	1.27	1.21	1.21	0.94	1.39	1.34	1.25
14	1.02	1.12	1.33	1.41	1.54	1.27	1.03	1.62	1.20	1.45	1.54	1.73	2.65	1.07	1.33	1.24	1.14	1.22	1.28	1.23	1.37	1.21	1.28	0.94	1.45	1.39	1.30
15	1.03	1.20	1.37	1.52	1.57	1.35	1.11	1.63	1.26	1.51	1.55	1.74	2.77	1.12	1.37	1.29	1.16	1.22	1.29	1.30	1.39	1.28	1.51	0.95	1.47	1.44	1.35
16	1.04	1.41	1.38	1.59	1.57	1.56	1.11	1.72	1.28	1.57	1.71	1.75	2.93	1.12	1.37	1.34	1.22	1.26	1.32	1.33	1.47	1.30	1.53	0.97	1.51	1.49	1.39
17	1.11	1.45	1.45	1.66	1.66	1.63	1.16	1.76	1.28	1.66	1.80	1.87	3.08	1.15	1.39	1.39	1.23	1.29	1.34	1.37	1.51	1.45	1.53	0.97	1.57	1.54	1.44
18	1.16	1.57	1.49	1.69	1.87	1.65	1.24	1.95	1.35	1.98	1.81	1.91	3.15	1.37	1.39	1.59	1.23	1.30	1.35	1.53	1.54	1.46	1.54	1.02	1.62	1.59	1.49
19	1.22	1.62	1.49	1.71	1.89	1.76	1.27	1.97	1.35	2.06	2.08	1.91	3.20	1.38	1.41	1.69	1.41	1.34	1.41	1.54	1.54	1.54	1.57	1.19	1.66	1.64	1.53
20	1.33	1.70	1.51	1.81	1.95	1.79	1.27	1.99	1.38	2.13	2.15	1.93	3.24	1.64	1.43	1.73	1.59	1.37	1.41	1.61	2.75	1.54	1.57	1.11	2.86	1.68	1.58
21	1.47	1.78	1.51	1.84	2.19	2.04	1.31	2.06	1.43	2.16	2.41	1.95	3.28	1.89	1.81	1.81	1.59	1.39	1.45	1.82	1.54	1.54	1.61	1.02	1.68	1.69	1.62
22	1.54	1.83	1.55	1.88	2.20	2.06	1.38	2.22	1.45	2.25	2.48	1.99	3.36	1.89	1.84	1.81	1.76	1.54	1.49	1.87	1.71	1.54	1.81	1.03	1.81	1.74	1.67
23	1.54	2.00	1.70	1.95	2.23	2.08	1.39	2.22	1.49	2.26	2.49	2.13	3.44	2.10	1.89	1.86	1.79	1.68	1.55	1.88	1.82	1.59	1.82	1.03	1.83	1.79	1.72
24	1.57	2.22	1.72	2.04	2.32	2.40	1.39	2.46	1.50	2.40	2.67	2.14	3.67	2.19	1.95	1.92	1.87	1.73	1.59	1.97	1.84	1.62	1.84	1.03	1.87	1.84	1.76
25	1.57	2.23	1.88	2.31	2.32	2.40	1.41	2.66	1.50	2.44	2.74	2.16	3.93	2.65	2.03	1.99	1.93	1.74	1.78	1.99	1.86	1.71	1.89	1.04	1.91	1.88	1.81
26	1.63	2.30	2.01	2.50	2.55	2.46	1.41	4.63	1.54	2.60	3.02	2.26	3.97	2.79	2.22	2.14	2.24	1.74	1.85	2.09	1.89	1.76	2.20	1.11	1.92	1.93	1.86
27	1.73	2.39	2.13	2.63	2.65	2.61	1.46	4.95	1.58	2.72	3.06	2.26	4.35	4.95	2.39	2.23	2.25	1.76	2.20	2.28	1.89	1.80	2.73	1.11	2.08	1.98	1.90
28	1.81	2.73	2.67	2.67	2.86	2.80	1.54	8.63	1.70	2.72	3.11	2.46	4.35	0.85	2.40	1.65	1.34	1.92	1.38	2.35	2.01	1.81	3.44	1.11	2.22	2.03	1.95
29	1.93	0.95	3.02	2.90	3.33	3.06	1.64	1.47	1.75	3.81	3.13	2.51	4.51	0.97	1.57	1.81	1.47	1.98	1.38	2.49	2.17	1.87	4.06	1.11	2.40	2.07	2.00
30	2.14	1.69	3.59	9.98	5.19	3.82	1.64	1.45	2.15	8.31	3.13	1.49	13.02	1.70	1.59	1.80	1.39	2.18	1.00	2.65	2.29	2.65	4.20	1.19	2.90	2.12	2.04
Promedio	1.22	1.39	1.52	1.87	1.82	1.68	1.12	1.03	1.29	1.95	1.91	1.64	3.13	1.42	1.42	1.43	1.31	1.35	1.26	1.51	1.53	1.35	1.62	0.97	1.58	1.46	1.37
Varianza	0.37	0.58	0.63	1.61	0.90	0.73	0.28	1.56	0.28	1.37	0.72	0.52	2.06	0.86	0.46	0.40	0.40	0.33	0.33	0.50	0.48	0.41	0.89	0.11	0.52	0.39	0.40
Coefficiente de Variación	0.31	0.42	0.42	0.86	0.49	0.44	0.25	1.51	0.22	0.70	0.38	0.32	0.66	0.60	0.32	0.28	0.30	0.25	0.26	0.33	0.31	0.30	0.55	0.12	0.33	0.26	0.29

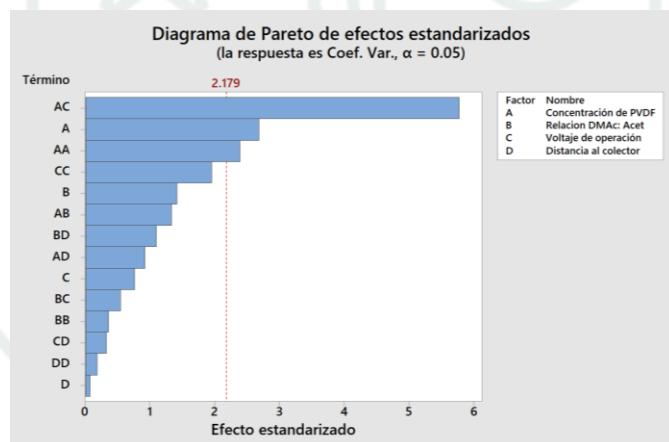
Anexo 6. Análisis de Respuesta en Software Minitab

Ecuación de regresión en unidades no codificadas

Coef. Var. = 184.8 - 12.98 Concentración de PVDF - 11.57 Relación DMAc: Acet
 - 13.64 Voltaje de operación + 0.167 Distancia al colector
 + 0.2066 Concentración de PVDF*Concentración de PVDF
 - 0.49 Relación DMAc: Acet*Relación DMAc: Acet
 + 0.1686 Voltaje de operación*Voltaje de operación
 + 0.0025 Distancia al colector*Distancia al colector
 + 0.530 Concentración de PVDF*Relación DMAc: Acet
 + 0.578 Concentración de PVDF*Voltaje de operación
 - 0.0367 Concentración de PVDF*Distancia al colector
 + 0.216 Relación DMAc: Acet*Voltaje de operación
 + 0.176 Relación DMAc: Acet*Distancia al colector
 + 0.0129 Voltaje de operación*Distancia al colector

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	Coef. Var.	Ajuste	Resid est.	R
22	0.332	0.658	-0.326	-2.53



Regresión de superficie de respuesta: Coef. Var. vs. ... tancia al colector

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	14	2.29945	0.16425	4.11	0.009
Lineal	4	0.39039	0.09760	2.44	0.104
Concentración de PVDF	1	0.28721	0.28721	7.18	0.020
Relacion DMAc: Acet	1	0.07984	0.07984	2.00	0.183
Voltaje de operación	1	0.02314	0.02314	0.58	0.462
Distancia al colector	1	0.00019	0.00019	0.00	0.946
Cuadrado	4	0.40549	0.10137	2.53	0.095
Concentración de PVDF*Concentración de PVDF	1	0.22765	0.22765	5.69	0.034
Relacion DMAc: Acet*Relacion DMAc: Acet	1	0.00503	0.00503	0.13	0.729
Voltaje de operación*Voltaje de operación	1	0.15157	0.15157	3.79	0.075
Distancia al colector*Distancia al colector	1	0.00129	0.00129	0.03	0.860
Interacción de 2 factores	6	1.50357	0.25059	6.27	0.004
Concentración de PVDF*Relacion DMAc: Acet	1	0.07031	0.07031	1.76	0.210
Concentración de PVDF*Voltaje de operación	1	1.33547	1.33547	33.39	0.000
Concentración de PVDF*Distancia al colector	1	0.03368	0.03368	0.84	0.377
Relacion DMAc: Acet*Voltaje de operación	1	0.01166	0.01166	0.29	0.599
Relacion DMAc: Acet*Distancia al colector	1	0.04827	0.04827	1.21	0.294
Voltaje de operación*Distancia al colector	1	0.00418	0.00418	0.10	0.752
Error	12	0.47995	0.04000		
Falta de ajuste	10	0.47995	0.04800	*	*
Error puro	2	0.00000	0.00000		
Total	26	2.77940			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.199990	82.73%	62.59%	0.53%

Coeficientes codificados

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.402	0.115	3.48	0.005	
Concentración de PVDF	0.1547	0.0577	2.68	0.020	1.00
Relacion DMAc: Acet	0.0816	0.0577	1.41	0.183	1.00
Voltaje de operación	0.0439	0.0577	0.76	0.462	1.00
Distancia al colector	-0.0040	0.0577	-0.07	0.946	1.00
Concentración de PVDF*Concentración de PVDF	0.2066	0.0866	2.39	0.034	1.25
Relacion DMAc: Acet*Relacion DMAc: Acet	-0.0307	0.0866	-0.35	0.729	1.25
Voltaje de operación*Voltaje de operación	0.1686	0.0866	1.95	0.075	1.25
Distancia al colector*Distancia al colector	0.0156	0.0866	0.18	0.860	1.25
Concentración de PVDF*Relacion DMAc: Acet	0.133	0.100	1.33	0.210	1.00
Concentración de PVDF*Voltaje de operación	0.578	0.100	5.78	0.000	1.00
Concentración de PVDF*Distancia al colector	-0.092	0.100	-0.92	0.377	1.00
Relacion DMAc: Acet*Voltaje de operación	0.054	0.100	0.54	0.599	1.00
Relacion DMAc: Acet*Distancia al colector	0.110	0.100	1.10	0.294	1.00
Voltaje de operación*Distancia al colector	0.032	0.100	0.32	0.752	1.00