



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO,
TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LAS
FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE
ELECTROHILADO**

Helen Yessenia Escobar Ramos

Asesorado por la Inga. Marlene Susana Arrechea Alvarado
Co-asesorado por la Licda. Q. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

Guatemala, enero de 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO,
TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LAS
FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE
ELECTROHILADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

HELEN YESSENIA ESCOBAR RAMOS

ASESORADO POR LA INGA. MARLENE SUSANA ARRECHEA ALVARADO
CO-ASESORADO POR LA LICDA. Q. INGRID LORENA BENÍTEZ PACHECO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, ENERO DE 2020

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Christian Moisés de la Cruz Leal
VOCAL V	Br. Kevin Armando Cruz Lorente
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Wong Davi
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdéz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO,
TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS
FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE
ELECTROHILADO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 09 de noviembre de 2017.

Helen Yessenia Escobar Ramos

Guatemala, 23 de julio de 2019.

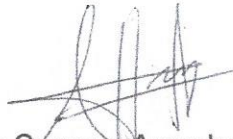
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería -USAC-

Respetable Ingeniero,

Esperando que tenga éxitos en sus actividades laborales, por este medio hago de su conocimiento que en mi calidad de asesora del trabajo de graduación de la estudiante **HELEN YESSERIA ESCOBAR RAMOS**, quien se identifica con **registro académico No. 201403657** y **carne No. 2973125370101** de la carrera de **INGENIERÍA QUÍMICA**, he revisado el informe final del trabajo de graduación con el título **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO, TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LAS FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO”**. Por lo que considero que el presente trabajo cumple con los requisitos necesarios para ser presentado ante las autoridades respectivas de la Escuela de Ingeniería Química y lo doy por aprobado.

Por lo tanto, dejo a su consideración que la estudiante continúe con los trámites pertinentes para la defensa y aprobación del mismo ante la terna evaluadora y su persona. Sin otro particular, agradezco su amable deferencia a la presente.

Atentamente,



Marlene Susana Arrechea Alvarado

Ingeniera Química

Col. 1,593

M. Sc. Nanotecnología

PhD. Marlene Susana Arrechea Alvarado

ASESORA

Ingeniera Química

Colegiado No. 1593

Correo electrónico: arrecheausac@gmail.com

Guatemala, 23 de julio de 2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director de Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente

Ingeniero Álvarez:

Por medio de la presente **HAGO CONSTAR** que he revisado y aprobado el informe final del trabajo de graduación titulado **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO, TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO”** de la estudiante de Ingeniería Química Helen Yessenia Escobar Ramos quien se identifica con el número de registro académico **201403657** y número de carné **2973125370101**.

Sin otro particular me suscribo a usted.

Atentamente,



Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco MSc
COASESORA

Laboratorio Análisis Físicoquímicos /Química Industrial-LAFIQ

Centro de Investigaciones de Ingeniería

e-mail: licdaibenitez@gmail.com

Licda. Ingrid Lorena Benítez P.
Química
Maestría Ciencia y Tecnología
del Medio Ambiente
Colegiado No. 1974



Guatemala, 21 de octubre de 2019.
Ref. EIQ.TG-IF.042.2019.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **030-2017**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Helen Yessenia Escobar Ramos**.
Identificado con número de carné: **2973125370101**.
Identificado con registro académico: **201403657**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Química**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO, TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DE LAS FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Marlene Susana Arrechea Alvarado, profesional de la Ingeniería Química
Ingrid Lorena Benítez Pacheco, profesional de la Química

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑAN A TODOS"

Jorge Mario Estrada Asturias
Jorge Mario Estrada Asturias
Profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



ACAAI

Asociación Guatemalteca de Ingenieros Químicos
Organización de Ingenieros Químicos en Guatemala





Ref.EIQ.TG.003.2020

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación, de la carrera de Ingeniería Química, de la estudiante, **HELEN YESSENIA ESCOBAR RAMOS** titulado: **"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO, TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE LAS FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Williams G. Alvarez Mejía; M.I.Q., M.U.I.E
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, enero de 2020

Cc: Archivo
WGAM/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

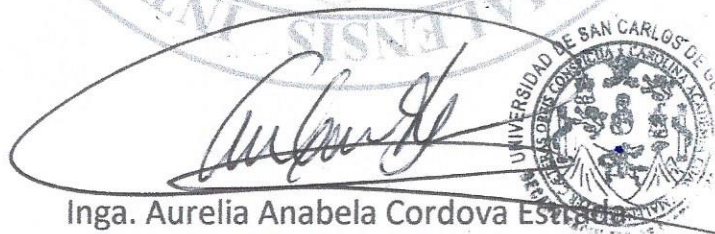


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.024-2020

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE POLÍMERO, TIPO DE DISOLVENTE Y VOLTAJE EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE LAS FIBRAS DE POLIESTIRENO (PS) SINTETIZADAS MEDIANTE LA TÉCNICA DE ELECTROHILADO**, presentado por la estudiante universitaria: **Helen Yessenia Escobar Ramos** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrella
Decana

Guatemala, enero de 2020.

AACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por estar a mi lado durante todo mi proceso de formación y ayudarme cada día a ser una mejor persona.
- Mis padres** Victor Escobar y Ana Ramos, por brindarme amor, apoyarme incondicionalmente durante toda mi carrera universitaria y aconsejarme ante toda circunstancia.
- Mi hermano** Arturo Ramírez, por siempre alentarme a seguir adelante.
- Mi novio** Johan Sierra, por ser un gran apoyo durante mi carrera, aconsejarme y ayudarme en cada parte del proceso.
- Mis amigos** William Montenegro, Leslie Velásquez, Katherine Sazo, Jeniffer Osoy, Wanda Yoc, Laura Méndez, Bárbara Cabrera, Carlos Figueroa, Roselin del Cid, Andrea Obando, José Valenzuela, entre muchos otros, por acompañarme en todo mi proceso de formación y alentarme a siempre seguir adelante.

Área de Físicoquímica
ESIQ

Ing. Ariel Villela, Ing. William Fagiani, Inga. Ana Herrera, Ing. Julio Vargas y Luis Zarat, por el apoyo académico y moral brindado, por el cariño y amistad forjada con cada uno de ellos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por la oportunidad que me brindó para continuar con mi formación académica.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme la oportunidad y los conocimientos necesarios para mi formación como ingeniera.
Mis padres	Victor Escobar y Ana Ramos, por brindarme su amor y apoyo moral y económico de manera incondicional.
Mi hermano	Arturo Ramírez, por apoyarme siempre y ayudarme en la reestructuración del equipo de electrohilado.
Mi novio	Johan Sierra, por apoyarme siempre y brindarme su ayuda en la elaboración de la fase experimental del presente trabajo de graduación.
Mi asesora	PhD. Susana Arrechea, por compartirme sus conocimientos, por ser un ejemplo inspirador de superación y por apoyarme en la realización del presente informe.

Mi coasesora

Licda. Ingrid Benítez, por brindarme su ayuda y apoyo durante la realización de la fase experimental, por permitirme un espacio para su ejecución y por ser un ejemplo a seguir como persona.

Laboratorio de Análisis Físicoquímicos -LAFIQ

Por proveerme el espacio físico, los materiales y el equipo para la realización de la etapa experimental de la presente investigación.

Área de Físicoquímica ESIQ

Ing. Ariel Villela, Ing. William Fagiani, Inga. Ana Herrera, Ing. Julio Vargas y Luis Zarat, por brindarme su apoyo, su ayuda y sus conocimientos en la realización de la fase experimental y el presente informe final.

Jason Agüero

Por proveerme el equipo de electrohilado para la realización de la etapa experimental del presente trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS.....	XIII
HIPÓTESIS.....	XV
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Poliestireno.....	7
2.1.1. Historia	7
2.1.2. Síntesis del poliestireno	7
2.1.3. Propiedades del poliestireno.....	8
2.1.4. Tipos de poliestireno.....	9
2.1.4.1. Poliestireno cristal.....	9
2.1.4.2. Poliestireno de alto impacto.....	10
2.1.4.3. Poliestireno expandido	10
2.1.4.4. Poliestireno extruido	10
2.1.4.5. Poliestireno sindiotáctico	10
2.1.5. Aplicaciones del poliestireno.....	11
2.2. Nanofibras	11
2.2.1. Definición de nanofibras	11
2.2.2. Métodos y técnicas de producción de nanofibras ...	12

2.2.2.1.	Electrohilado.....	12
2.2.2.2.	Centrifugal spinning.....	14
2.2.3.	Parámetros de síntesis que influyen en las características de las nanofibras resultantes.....	15
2.2.3.1.	Naturaleza de la materia prima	15
2.2.3.2.	Concentración de la solución	16
2.2.3.3.	Voltaje aplicado	16
2.2.3.4.	Tipo de disolvente	16
2.2.3.5.	Distancia entre la jeringa y el colector.....	17
2.2.4.	Características especiales que otorgan las nanofibras.....	17
2.2.4.1.	Hidrofobicidad	18
2.2.4.2.	Reflectancia.....	18
2.2.4.3.	Protección contra rayos ultravioleta	18
2.2.4.4.	Tenacidad.....	18
2.2.4.5.	Resistencia a la tracción.....	19
2.2.4.6.	Flexibilidad	19
2.2.4.7.	Propiedades antimicrobianas	19
2.2.4.8.	Autolimpieza.....	19
2.2.4.9.	Resistencia a las arrugas	20
2.2.5.	Aplicaciones de las nanofibras	20
2.3.	Hidrofobicidad	20
2.3.1.	Ángulo de contacto.....	21
2.4.	Transmitancia óptica	23
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables	25
3.1.1.	Variables independientes	25

3.1.2.	Variables dependientes	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio	25
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	26
3.4.	Recursos materiales disponibles	27
3.4.1.	Equipo	27
3.4.2.	Cristalería	28
3.4.3.	Reactivos.....	28
3.5.	Técnica cuantitativa.....	29
3.5.1.	Preparación de disolución polimérica	29
3.5.2.	Proceso de electrohilado	29
3.5.3.	Prueba de hidrofobicidad.....	30
3.5.4.	Prueba de porcentaje de transmitancia de rayos UV.....	31
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	32
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	33
3.8.	Análisis estadístico	39
3.8.1.	Media aritmética	39
3.8.2.	Ángulo de contacto	40
3.8.2.1.	Prueba de hipótesis.....	40
3.8.2.2.	Análisis de varianza de dos factores ...	41
3.8.3.	Porcentaje de transmitancia	42
4.	RESULTADOS.....	45
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	55
	CONCLUSIONES	65
	RECOMENDACIONES.....	67

BIBLIOGRAFÍA.....69
APÉNDICES.....77

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Vista microscópica de nanofibras.....	12
2.	Técnica de electrohilado	14
3.	Ángulo de contacto	22
4.	Fibras de poliestireno sintetizadas empleando cloroformo como disolvente.....	45
5.	Fibras de poliestireno sintetizadas empleando dimetilformamida como disolvente	46
6.	Fibras de poliestireno sintetizadas empleando tolueno como disolvente.....	47
7.	Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente.....	48
8.	Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando dimetilformamida como disolvente ..	49
9.	Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente	50
10.	Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente.....	51
11.	Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando dimetilformamida como disolvente	52

12.	Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente.....	53
-----	---	----

TABLAS

I.	Ángulo de contacto medido para las fibras de poliestireno	33
II.	Porcentaje de transmitancia de rayos UV medido para las fibras de poliestireno sintetizadas.....	35
III.	Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando cloroformo como disolvente.....	41
IV.	Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando dimetilformamida como disolvente	41
V.	Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando tolueno como disolvente.....	42
VI.	Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando cloroformo como disolvente	43
VII.	Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando dimetilformamida como disolvente	43
VIII.	Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando tolueno como disolvente.....	44

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
θ	Ángulo de contacto ($^{\circ}$)
n	Cantidad de datos de la población
cc	Centímetros cúbicos
C	Concentración (% en peso)
S	Desviación estándar
σ	Error respecto a la media
$^{\circ}$	Grados
H₁	Hipótesis alternativa
H₀	Hipótesis nula
kV	Kilovoltios
\bar{X}	Media aritmética
nm	Nanómetros
α	Nivel de significancia
μ	Parámetro estadístico
PS	Poliestireno
%T	Porcentaje de transmitancia
x_i	Repetición de un tratamiento
V	Voltaje aplicado (kV)
Z	Z calculada o de prueba

GLOSARIO

Absorbancia	Medida de la cantidad de ondas de luz que absorbe un cuerpo.
Cohesión	Unión entre las moléculas de un cuerpo, debida a la fuerza de atracción molecular.
Dipolo eléctrico	Conjunto de dos polos eléctricos de signos opuestos y cercanos entre sí.
Electrohilado	Técnica de producción de nanofibras que consiste en someter soluciones de polímero a fuertes campos eléctricos que ocasiona la ruptura de las fuerzas de cohesión y reducción de la tensión superficial.
Electrostática	Parte de la física que estudia las interacciones entre cuerpos que poseen cargas eléctricas cuando estas se encuentran en reposo.
Hidrofobicidad	Propiedad de sustancia que no es miscible con el agua; las moléculas de ambas no interaccionan mediante ion-dipolo ni puentes de hidrógeno.

Nanofibras	Estructuras alargadas y esbeltas de diámetros inferiores a 100 nanómetros (nm) según la American National Science Foundation, e inferiores a 500 nm de acuerdo a otras instituciones.
Poliestireno	Termoplástico producido por medio de la polimerización de estireno.
Reología	Parte de la física que estudia la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y el derrame de la materia.
Transmitancia	Medida de la cantidad de ondas de luz que un cuerpo deja traspasar a través de su estructura.
Viscoelasticidad	Propiedad que indica que el material presenta características tanto viscosas como elásticas al deformarse.

RESUMEN

Se sintetizaron fibras de poliestireno mediante la técnica de electrohilado, con la finalidad de establecer el efecto de las condiciones de fabricación (concentración en la matriz polimérica, solvente y voltaje) sobre la hidrofobicidad y el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras. Se sintetizaron veintidós diferentes grupos de fibras de poliestireno empleando cloroformo, dimetilformamida y tolueno; y aplicando tres voltajes: 5 kV, 10 kV y 15 kV.

Al emplear cloroformo se utilizaron concentraciones de 15 %, 20 % y 25 % en peso de poliestireno; para la dimetilformamida se emplearon concentraciones de 20 %, 25 % y 30 %; y para el tolueno concentraciones de 30 % y 40 % de PS en peso. Posteriormente, se realizó la medición del ángulo de contacto entre las fibras sintetizadas y una gota de agua destilada; y mediante espectrofotometría se midió el porcentaje de transmitancia de las fibras a una longitud de onda de 350 nm. Se determinó el comportamiento del ángulo de contacto y el porcentaje de transmitancia respecto a la variación del porcentaje de poliestireno en peso a diferentes voltajes aplicados empleando cada disolvente.

La dimetilformamida fue el solvente que proporcionó las mejores características a las fibras obtenidas, basándose en un contexto para el empleo textil, en el cual resulta más conveniente emplear fibras con mayor hidrofobicidad y menor transmitancia de rayos ultravioleta. El máximo ángulo de contacto medido fue de $129,301^\circ$ a 25 % PS en peso y 10 kV utilizando este disolvente.

OBJETIVOS

General

Evaluar el efecto de la variación de las condiciones de fabricación en las propiedades fisicoquímicas de fibras elaboradas mediante transformación de residuos sólidos de poliestireno (PS) a través de la técnica de electrohilado.

Específicos

1. Implementar un sistema de bajo costo para la técnica de electrohilado en la síntesis de fibras de poliestireno.
2. Sintetizar fibras de poliestireno (PS) mediante la técnica de electrohilado combinando diferentes niveles de los factores: concentración de disolución polimérica, tipo de disolvente y voltaje aplicado.
3. Establecer el efecto que causa la concentración de la solución polimérica en la hidrofobicidad y transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno (PS) sintetizadas a partir de la variación del porcentaje en peso de poliestireno empleando disolvente y voltajes constantes.
4. Evaluar el efecto que ocasiona el tipo de disolvente en la hidrofobicidad y transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno (PS) sintetizadas a partir del empleo de cloroformo, dimetilformamida y tolueno como disolventes, a una concentración y voltaje constantes.

5. Comparar el efecto que ocasiona el voltaje en la hidrofobicidad y transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno (PS) sintetizadas a partir de la variación de voltaje, a concentración y disolvente constantes.

HIPÓTESIS

Es factible sintetizar y caracterizar las fibras de poliestireno mediante la técnica de electrohilado como aprovechamiento de residuos sólidos.

Hipótesis nula:

H_{0, 1}: las fibras de poliestireno sintetizadas no presentan carácter hidrófobo.

H_{0, 2}: el ángulo de contacto de las fibras de poliestireno sintetizadas no varía al aumentar la concentración de polímero en su fabricación.

H_{0, 3}: el ángulo de contacto de las fibras de poliestireno sintetizadas no varía al aumentar el voltaje en su fabricación.

H_{0, 4}: el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno sintetizadas no varía al aumentar la concentración de polímero en su fabricación.

H_{0, 5}: el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno sintetizadas no varía al aumentar el voltaje en su fabricación.

Hipótesis alternativa:

H_{1, 1}: las fibras de poliestireno sintetizadas presentan carácter hidrófobo.

H_{2, 2}: el ángulo de contacto de las fibras de poliestireno sintetizadas varía al aumentar la concentración de polímero en su fabricación.

H_{1, 3}: el ángulo de contacto de las fibras de poliestireno sintetizadas varía al aumentar el voltaje en su fabricación.

H_{1, 4}: el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno sintetizadas varía al aumentar la concentración de polímero en su fabricación.

H_{1, 5}: el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras de poliestireno sintetizadas varía al aumentar el voltaje en su fabricación.

INTRODUCCIÓN

“El poliestireno (PS) es una resina termoplástica sintetizada y comercializada desde el año 1937 aproximadamente; se obtiene mediante polimerización por adición del monómero estireno y presenta propiedades como baja densidad, buena resistencia mecánica, estabilidad térmica, rigidez y fragilidad; es moldeable fácilmente por inyección a temperaturas superiores a 90 °C.”¹

Debido a su gran aplicación en la industria (alimenticia, medicinal y eléctrica), se ha ocasionado la alta proliferación de sus residuos. “Aproximadamente el 8,1 % de desechos sólidos domiciliarios en el área metropolitana de Guatemala son plásticos.”² El problema de contaminación comienza con una falta de conciencia de la sociedad y el desconocimiento de los problemas que conllevan la inadecuada deposición de los residuos sólidos. A ello se suma el inconveniente de la ausencia de la infraestructura necesaria para un manejo adecuado de los residuos generados, tanto a nivel industrial como domiciliar en el país actualmente.

Una alternativa innovadora para evitar la proliferación de los residuos de plásticos es la producción de nanofibras mediante la transformación de residuos sólidos de polímeros. Según la American National Science Foundation, las nanofibras son estructuras con diámetros inferiores a 100 nanómetros (nm), y de acuerdo a otras instituciones son estructuras con diámetro inferior a 500 nm; su

¹ SOLÍS JARA, M. E.; LISPERGUER MUÑOZ, J. H. y ARENCIBIA SILVA, L. F. *Compuestos mixtos poliestireno y pino radiata*. p. 1.

² IARNA. *Perfil ambiental de Guatemala*. <https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=41022>. Consulta: 04 de abril de 2017.

importancia radica en las propiedades especiales que se otorga a los materiales fabricados a partir de estas: alta hidrofobicidad, reflectancia de rayos ultravioleta, propiedades antimicrobianas, autolimpieza de los materiales, entre otros.

Las nanofibras han sido implementadas principalmente en la industria textil, la industria medicinal y la industria tecnológica; permitiendo la creación de textiles superhidrofóbicos y antimicrobianos, filtros de alto rendimiento, dispositivos nanoelectrónicos, entre muchos otros productos.

Una de las técnicas más conocidas para la producción de nanofibras es el electrohilado (*electrospinning*). “El electrohilado consiste en someter disoluciones poliméricas a altos voltajes, lo que ocasiona el rompimiento de las fuerzas de cohesión del polímero, transformándolo en hilos ultrafinos (nanofibras).”³

En el presente estudio es de interés la fabricación de fibras de poliestireno, a partir de diferentes condiciones, mediante la técnica de electrohilado; para así evaluar el efecto que ocasiona la variación de las condiciones de fabricación en las propiedades fisicoquímicas de las fibras resultantes; las condiciones por variar son: el disolvente, la concentración de poliestireno en la solución y el voltaje. El equipo empleado para la técnica de electrohilado fue diseñado y construido con colaboración a nivel centroamericano, específicamente en Costa Rica.

³ ROLDÁN, Sebastián; VARGAS, Carlos; MEJÍA, Mónica; ZAPATA, Jenniffer y MONCADA, María. *Ingeniería de tejidos y aplicaciones*. p. 26.

1. ANTECEDENTES

En los siguientes trabajos de investigación se han realizado estudios en la temática de nanofibras procedentes de polímeros.

En 2019, Abdul Rajak, Dian Ahmad Hapidin, Ferry Iskandar, Muhammad Miftahul Munir y Khairurrijal Khairurrijal realizaron un artículo de investigación para *Polymers* titulado *Controlled morphology of electrospun nanofibers from waste expanded polystyrene for aerosol filtration*, en el cual fabricaron tejidos de nanofibras a base de residuos de poliestireno expandido mediante la técnica de electrohilado; emplearon como disolvente la mezcla de dimetilformamida y disolventes de d-limoneno a diferentes proporciones; obtuvieron fibras lisas, fibras arrugadas y fibras moldeadas. Determinaron que el diámetro de las fibras oscilaba entre 314 nm y 3 506 nm; la fibra moldeada presentó mayor resistencia a la tracción y la menor elasticidad en comparación a la fibra arrugada y lisa; según la medición del ángulo de contacto, las nanofibras obtenidas se clasificaron como ultra-hidrófobas.

En 2018, Yuansheng Zheng, Na Meng y Binjie Xin realizaron un artículo científico titulado *Effects of jet path on electrospun polystyrene fibers* en el cual se expone que al aumentar la concentración del poliestireno en la solución empleada para el proceso de electrohilado las longitudes de chorro rectas son más largas, los conos de envoltura son más pequeños y las frecuencias de batido son más bajas. Además, se observó que las fibras hiladas con concentraciones más altas de solución exhibían diámetros y distribuciones de diámetro mayores.

En 2018, Nurul Husna Rosdi, Nafeesa Mohd Kanafi y Norizah Abdul Rahman elaboraron un artículo de investigación para *Pertanika Journals*, llamado *Preparation and thermal properties of cellulose acetate/polystyrene blend nanofibers via electrospinning technique*. En este se expone la comparación entre las propiedades de las nanofibras sintetizadas con acetato de celulosa (CA) y las nanofibras sintetizadas a partir de la mezcla acetato de celulosa y poliestireno (CA/PS) a diferentes proporciones mediante la técnica de electrohilado. El diámetro de las fibras se ubicó en el rango de 100 nm a 800 nm. En una alta proporción de poliestireno se formaron fibras CA/PS sin o con menos *beads* y la estabilidad térmica de las nanofibras de CA/PS fue mayor a las de CA puro.

En 2018, Jafar Torfifard, Erfan Norian, Ramin Ahmadi, Mohamad Taghi Ahmadi y Razali Ismail elaboraron un artículo científico para *Polymer Sciences* titulado *Polymer concentration effect on nanofiber growth using pulsed electrospinning*, en el cual se presentan los resultados obtenidos al variar la concentración y el voltaje en la elaboración de nanofibras de poliestireno mediante la técnica de electrohilado a base de pulsaciones. Mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) determinaron que el espesor de las nanofibras aumentó con respecto al incremento de la concentración de polímero y disminuyó respecto al incremento del voltaje aplicado.

En 2015, José Vicente Alonso Felipe realizó un estudio titulado *Manual de control de calidad en productos textiles y afines* para la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. En este se expone que mediante la nanotecnología se han desarrollado tejidos con nuevas propiedades, llamados *smart textiles* o textiles inteligentes. Además, las nanofibras y fibras huecas permiten un buen aislamiento acústico.

En 2015, Diego Trepianca realizó un trabajo de investigación para optar al título de cirujano-dentista en la Facultad de Odontología de la Universidad de Chile. En la investigación realizó la síntesis de suspensiones de nanopartículas de cobre y quitosano, y comprobó sus propiedades antimicrobianas frente a *streptococcus mutans*.

En 2014, Cornelia Loos y otros autores realizaron un artículo de investigación para Beilstein Journal of Nanotechnology llamado *Functionalized polystyrene nanoparticles as a platform for studying bio-nano interactions*. En esta investigación se utilizaron nanopartículas de poliestireno funcionalizados para estudiar las interacciones bio-nano e identificar el destino de las nanopartículas después de su absorción por las células. El estudio reveló la toxicidad del material de las nanopartículas que a nivel macro es fabricado para ser no tóxico, pero se comporta de manera diferente del material a granel. Las nanopartículas fabricadas a partir de poliestireno biocompatible inerte se pueden utilizar para parámetros biomédicos y permitir el diseño de nuevos sistemas de administración de fármacos.

En 2013, Antonio Ferreira Ávila y otros autores realizaron una investigación para el programa de Estudios de Posgrado en Ingeniería Mecánica de la Universidad Federal de Minas Gerais titulado *A nano-modified superhydrophobic membrane*. La investigación se centró en la síntesis de membranas superhidrofóbicas a base de poliestireno (PS) mediante la técnica de *electrospinning*, empleando N. Dimetilformamida (DMF) como disolvente en soluciones de diferentes concentraciones. Fueron dispersadas nanopartículas de sílice, grafeno, cadmio y zinc. La relación en peso de 20/80 condujo a ángulos de contacto de agua de 148 °, el cual es mayor que el ángulo de contacto para la relación de 35/65, de 143 °. Este hecho parece ser debido a la presencia de no-disolvente evaporado en la superficie PS.

En 2013, Mohammad Madani y otros autores publicaron un artículo de investigación titulado *PS/TiO₂ (Polystyrene/Titanium Dioxide) composite nanofibers with higher surface-to-volume ratio prepared by electrospinning: morphology and thermal properties*, en el cual expusieron las diferencias entre nanofibras de poliestireno y nanofibras de poliestireno/óxido de titanio. Concluyeron que el óxido de titanio ejercía gran influencia en la morfología de las nanofibras, tornándolas más irregulares; y alteraba las propiedades térmicas de las mismas.

En 2013, Lina Marcela Duque Sánchez, Leonardo Rodríguez y Marcos López elaboraron el artículo de investigación titulado *Electrospinning: la era de las nanofibras* para la Revista Iberoamericana de Polímeros de Colombia. En el estudio se expuso la técnica de electrohilado, se verificó la influencia e interrelación de algunas variables en el proceso y las aplicaciones. La técnica de *electrospinning* permite la utilización de fibras en áreas como ingeniería de tejidos donde mimetizan las funciones de algunos tejidos y liberación controlada de fármacos en la cual permiten la entrega oportuna de medicamentos. También se puede controlar los estímulos a cambios de temperatura o pH.

En 2010, Ahmed Asran, Volker Seydewitz y Goerg Hannes Michler realizaron un estudio acerca de las propiedades mecánicas de las nanofibras de poliestireno sintetizadas mediante la técnica de electrohilado. Sus resultados fueron publicados en 2012 por la revista Journal of Applied Polymer Science bajo el título *Micromechanical properties and ductile behavior of electrospun polystyrene nanofibers*. En él se expuso que, según el tamaño y diámetro de la nanofibra surgen diferentes transiciones de deformación; también, a diámetros menores aumenta la movilidad y ductilidad.

En 2008, Tamer Uyar y Flemming Besenbacher realizaron un artículo de investigación para Elsevier llamado *Electrospinning of uniform polystyrene fibers: the effect of solvent conductivity*, en el cual elaboraron nanofibras de poliestireno en un rango de 20 % w/v a 30 % w/v de PS empleando dimetilformamida como solvente a diferentes grados, con lo cual varió la conductividad de la dimetilformamida. Determinaron que las nanofibras sintetizadas presentaron menos defectos o *beads* cuando la solución de polímero tenía más alta conductividad; por lo tanto, la conductividad del solvente es un parámetro clave para obtener nanofibras con menos defectos.

En 2007, Yanzhe Wu, King-Tong Lau y Shirley Coyle realizaron un estudio de investigación titulado *Smart nanotextiles: a review of materials and applications* para la Universidad de Wollongong de Australia. En el estudio se implementaron y evaluaron los efectos de las propiedades de los nanotextiles, enfocándose en la salud, los deportes, la protección UV y los beneficios de la implementación de componentes de silicones y metales.

En 2006, Wong, Yuen, Leung, Ku y Lam realizaron un estudio de investigación titulado *Selected applications of nanotechnology in textiles* para la Universidad Politécnica de Hong Kong. En el estudio se expusieron diferentes métodos de producción de textiles mediante el uso de nanotecnología enfocando las diferentes propiedades otorgadas a los textiles como hidrofobia, protección contra rayos UV, propiedades antibacterianas antiestáticas y resistencia a las arrugas.

En 2000, Joseph Deitzel, James Kleinmeyer, Douglas Harris y Nora Beck Tan realizaron un estudio de investigación para la revista Elsevier Science, titulado *The effect of processing variables on the morphology electrospun nanofibers and textiles*. En este expusieron las diferencias en la morfología de las

nanofibras de óxido de polietileno (PEO) sintetizadas a diferentes concentraciones y un rango de voltajes de 5 kV a 11 kV. El diámetro y el área superficial de las nanofibras aumentaba a concentraciones mayores y la densidad aumentaba al incrementar el voltaje.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Poliestireno

El poliestireno (PS) es una de las resinas termoplásticas sintetizadas más antiguas, su monómero base es el estireno.

2.1.1. Historia

“El poliestireno fue sintetizado en la década de 1930 por primera vez, a cargo de la industria alemana conocida en ese entonces con el nombre de Interessen-Gemeinschaft Farbenindustrie A.G.. Para ello se instaló una planta de producción de poliestireno con capacidad de producir 100 ton/año.”⁴ La comercialización de poliestireno de uso general o poliestireno cristal comenzó en 1938 en Estados Unidos y la del poliestireno de alto impacto comenzó en el año 1948. En el mismo año se generó el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) a partir de mezclas de estireno/acrilonitrilo con acrilonitrilo/butadieno.

Durante la Segunda Guerra Mundial se obtuvo el hule sintético como sustituto del caucho natural mediante injertos de poliestireno en polibutadieno.

2.1.2. Síntesis del poliestireno

“El poliestireno es un compuesto orgánico de cadena larga, que contiene un grupo fenilo unido de manera alterna cada dos átomos de carbono. Se produce

⁴ QuimiNet. *Historia del poliestireno*. <https://www.quiminet.com/articulos/historia-del-poliestireno-2681667.htm>. Consulta: 05 de abril de 2017.

mediante la polimerización del monómero estireno o vinilbenceno ($\text{CH}_2=\text{CHC}_6\text{H}_5$), a través de una polimerización vinílica de radicales libres.”⁵

El estireno se obtiene a través del calentamiento de etilbenceno (C_8H_{10}) en presencia de un catalizador. Un compuesto llamado iniciador, el cual es generalmente un peróxido, se rompe generando radicales libres. Estos radicales se unen a las moléculas de monómero causando la formación de radicales libres más grandes que se unen a nuevas moléculas de monómero de manera sucesiva hasta que se completa la polimerización de estireno.

A nivel industrial el proceso de polimerización es realizado en un tanque con un agitador. Se alimentan el estireno y los respectivos aditivos químicos, generando una solución, la cual se bombea hacia un desvolatizador, donde los residuos de estireno son reciclados. El poliestireno resultante fluye hacia un moldeador en el cual se crea la forma deseada y posteriormente se refrigera, seca y se almacena.

Se pueden utilizar reactores de la misma geometría para la producción de diferentes tipos de poliestireno, pero se debe controlar más rigurosamente los parámetros de reacción que influyen en la morfología de las partículas resultantes. Otro punto de control importante es la temperatura de desvolatilización pues en ella se basa la reticulación.

2.1.3. Propiedades del poliestireno

“El poliestireno es un polímero lineal y amorfo cuya densidad es aproximadamente $1,06 \text{ g/cm}^3$. Presenta buena transparencia, dureza y

⁵ QuimiNet. *Todo sobre el poliestireno*. <https://www.quiminet.com/articulos/todo-sobre-el-poliestireno-3337.htm>. Consulta: 05 de abril de 2017.

resistencia pero también fragilidad.”⁶ Es moldeable a temperaturas aproximadas a 140 °C, con lo cual puede ser sometido a procesos de moldeo por inyección. Sin embargo, se degrada a temperaturas elevadas, produciendo una mezcla de compuestos entre los cuales alrededor del 50 % es estireno.

Sus propiedades eléctricas son satisfactorias y no se ven afectadas por la humedad del medio ambiente. “El poliestireno es útil para la fabricación de componentes ópticos debido a su índice de refracción de aproximadamente 1,6. Es estable químicamente ante la presencia de ácidos, álcalis, alcoholes y aceites minerales. Presenta inestabilidad ante hidrocarburos clorados, ésteres, cetonas, y otros compuestos orgánicos.”⁷

2.1.4. Tipos de poliestireno

A continuación, se presentan las características principales de diferentes tipos de poliestireno.

2.1.4.1. Poliestireno cristal

“El poliestireno cristal, también llamado poliestireno de uso general (GPPS), tiene estructura amorfa y es altamente transparente, presenta alta rigidez y fragilidad. Su peso molecular puede variar de 2×10^5 a 3×10^5 g/mol; es de baja densidad e hidrofóbico; es un buen aislante eléctrico y posee estabilidad térmica.”⁸

A temperaturas superiores a 100 °C es fácilmente moldeable, con lo cual es considerado uno de los termoplásticos de más sencillo procesamiento.

⁶ BILURBINA, Luis y LIESA, Francisco. *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. p. 33.

⁷ *Ibíd.* p. 34.

⁸ Nexant. *PERP Program – polystyrene new report alert*. p. 2.

2.1.4.2. Poliestireno de alto impacto

“El poliestireno de alto impacto, HIPS por sus siglas en inglés, es un tipo de plástico de apariencia opaca que presenta alta resistencia mecánica a fuertes impactos.”⁹

2.1.4.3. Poliestireno expandido

“El poliestireno expandido (EPS) es menos denso que los dos tipos de poliestireno mencionados anteriormente debido a que su estructura consiste principalmente de poliestireno y un porcentaje mínimo de gas, el cual forma burbujas disminuyendo la densidad.”¹⁰ Se utiliza generalmente como aislante en diferentes estructuras, y en embalaje para protección de mercadería frágil.

2.1.4.4. Poliestireno extruido

“El poliestireno extruido (XPS) es obtenido a partir del poliestireno cristal, este último se somete a fundición y posteriormente se le inyecta un gas formando de esa manera una espuma rígida que tiene propiedades aislantes tanto térmicas como eléctricas.”¹¹

2.1.4.5. Poliestireno sindiotáctico

“En el poliestireno sindiotáctico los grupos fenilo se encuentran unidos a ambos lados de la cadena de forma alternativa, siguiendo un orden característico

⁹ Nexant. *PERP Program – polystyrene new report alert*. p. 3.

¹⁰ *Ibíd.* p. 4.

¹¹ Construmática. *Poliestireno extruido*. https://www.construmatica.com/construpedia/Poliestireno_Extruido. Consulta: 10 de abril de 2017.

que lo diferencia de otros tipos de poliestireno en los cuales los grupos fenilo se encuentran unidos a la cadena polimérica de manera aleatoria.”¹²

2.1.5. Aplicaciones del poliestireno

El poliestireno en sus diferentes formas tiene aplicaciones en diversos ámbitos. Por ejemplo: embalaje, producción de envases desechables de alimentos y de medicamentos, tuberías, láminas, utensilios médicos, entre muchos otros productos.

2.2. Nanofibras

A continuación, se presenta el concepto general de nanofibras, se describen dos diferentes métodos para la fabricación de estas, se indican los parámetros más relevantes que deben ser controlados durante el proceso de producción y se describen algunas de las propiedades que las nanofibras pueden otorgar a diferentes materiales al ser implementadas dentro de su estructura.

2.2.1. Definición de nanofibras

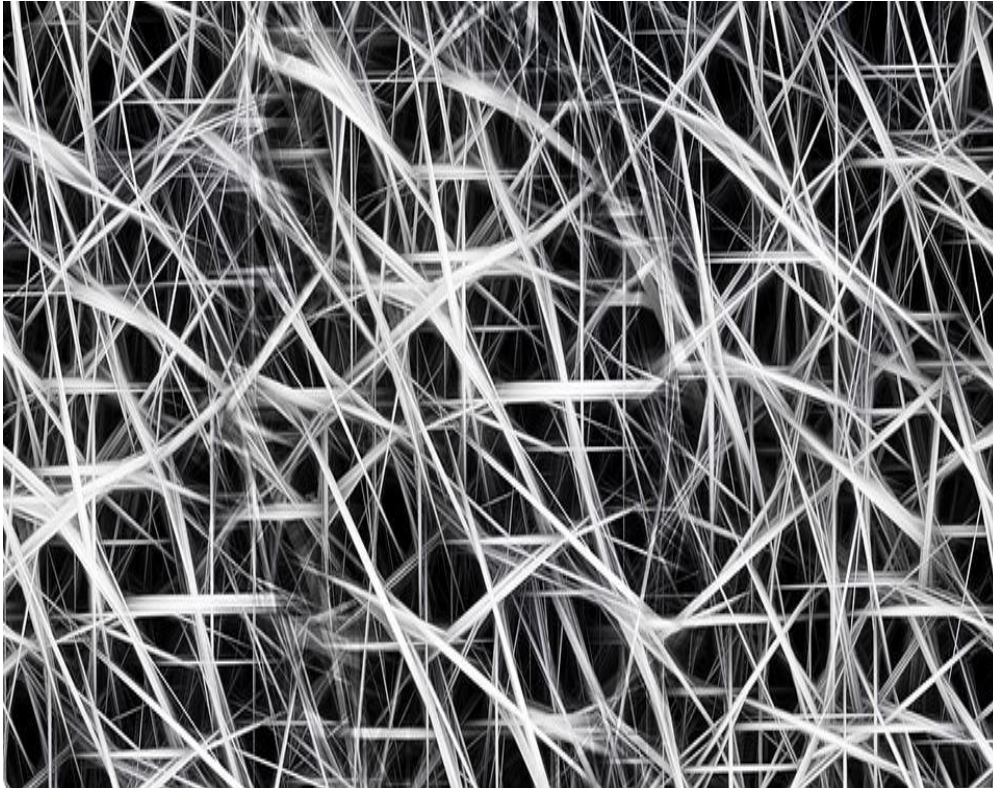
Las nanofibras son estructuras esbeltas y alargadas, de origen natural o sintético, cuyo diámetro es inferior a 100 nanómetros (nm) según la American National Science Foundation. “Sin embargo, algunas instituciones consideran que son nanofibras aquellas estructuras con diámetros inferiores a 500 nm.”¹³

En la figura 1 se presenta la vista microscópica de una muestra de nanofibras que a nivel macroscópico no es factible visualizar.

¹² Nexant. *PERP Program – polystyrene new report alert*. p. 4.

¹³ CARACCIOLO, Pablo; CORTEZ, Pablo y BUFFA, Fabian. *Pequeñas fibras, grandes aplicaciones*. p. 2.

Figura 1. **Vista microscópica de nanofibras**



Fuente: Pixabay. <https://pixabay.com/id/illustrations/serat-struktur-hitam-putih-wol-892694/>.

Consulta: 04 de julio de 2019.

2.2.2. Métodos y técnicas de producción de nanofibras

Existen diversos métodos para producir nanofibras sintéticas, algunos de ellos se explican a continuación.

2.2.2.1. Electrohilado

“El proceso de electrohilado, comúnmente llamado *electrospinning*, consiste principalmente en la síntesis de nanofibras mediante el empleo de altos

diferenciales de potencial eléctrico.”¹⁴ Una solución polimérica es sometida a altas fuerzas electrostáticas que producen el rompimiento de las fuerzas de cohesión que mantienen unidas las moléculas de polímero, lo cual conduce a un reordenamiento de las mismas en estructuras finas y delgadas, es decir, fibras. Las fibras son recolectadas finalmente en un dispositivo denominado colector.

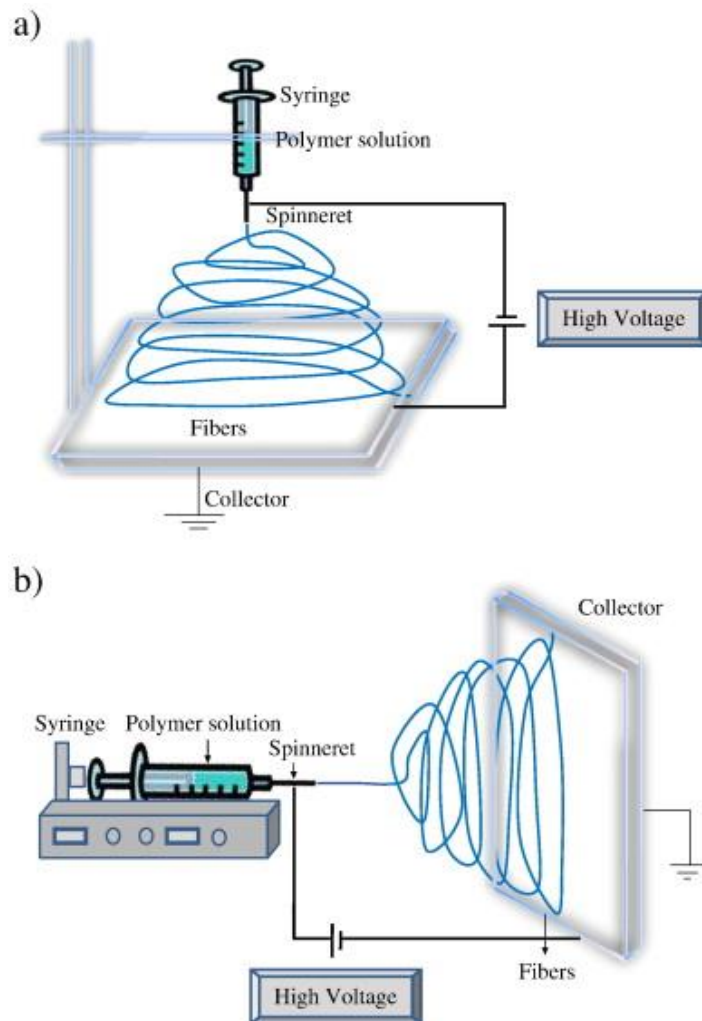
El mecanismo consiste en colocar una jeringa cuya punta metálica es conectada al polo positivo de una fuente de alimentación de alto voltaje, en rangos de kilovoltios, y el polo negativo es conectado al plato colector o colector rotatorio. Se coloca la solución polimérica dentro de la jeringa y por medio del impulso de una bomba de inyección se expulsa dicha solución por la punta de la aguja, que provoca que sea sometida a la diferencia de potencial eléctrico, lo que conduce a la formación de dipolos eléctricos dentro de la estructura del polímero, que genera la atracción de una de las cargas hacia el polo positivo de la fuente y la repulsión de la otra carga.

Por lo tanto, la masa acumulada por la repulsión forma una gota que adquiere forma cónica y es llamada cono de Taylor. La fuerza de repulsión eventualmente produce un desprendimiento lineal formando un flujo continuo y fino de solución hacia el plato colector. Durante el trayecto del flujo el solvente se evapora lo que genera una masa seca en el colector, lo cual son las nanofibras. El colector puede ser una placa metálica, o bien un cilindro metálico rotatorio, dependiendo de la forma en que se desean recolectar las fibras.

En la figura 2 se encuentra representada de manera gráfica la técnica de electrohilado en sus dos formas posibles (horizontal y vertical). Además, se indica el nombre de cada una de las partes que conforman el sistema.

¹⁴ DUQUE, Lina; RODRÍGUEZ, Leonardo y LÓPEZ, Marcos. *Electrospinning: la era de las nanofibras*. p. 2.

Figura 2. **Técnica de electrohilado**



Fuente: BHARDWAJ, Nandana; KUNDU, Subhas C. *File: Electrospinning apparatus.jpg*.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrospinning_apparatus.jpg. Consulta: 4 de julio de 2019.

2.2.2.2. **Centrifugal spinning**

“La técnica de *centrifugal spinning* consiste en someter una solución de polímero a una fuerza centrífuga capaz de superar la tensión superficial y

viscosidad de la solución y de esa forma romper las fuerzas de cohesión que unen las moléculas de polímero y formar fibras.”¹⁵

La técnica se basa en inyectar una solución de polímero a un disco giratorio con dos o más orificios. La acción de la fuerza centrífuga del disco generará que la solución se desplace hacia las paredes internas del disco. Al momento de superar las fuerzas de cohesión la solución polimérica será expulsada por los orificios y será alargada hasta llegar al colector, que generalmente es un cilindro instalado alrededor de la cámara giratoria.

2.2.3. Parámetros de síntesis que influyen en las características de las nanofibras resultantes

“En la técnica de electrohilado existen diferentes condiciones de fabricación de nanofibras que deben ser controladas para obtener nanofibras con las propiedades y características deseadas.”¹⁶ A continuación, se mencionan las más importantes.

2.2.3.1. Naturaleza de la materia prima

La selección del material adecuado es uno de los principales parámetros a fijar para obtener nanofibras que se ajusten a los requerimientos del fabricante. Generalmente, los materiales dieléctricos son adecuados para la técnica de electrohilado pues poseen la tendencia a formar dipolos eléctricos, lo cual favorece la separación de las cargas eléctricas y consecuente formación del cono de Taylor y de las fibras requeridas.

¹⁵ STOJANOVSKA, Elena; CANBAY, Emine; SERIFE PAMPAL, Esra y CALISIR, Mehmet. *A review on non-electro nanofibre spinning techniques*. p. 10.

¹⁶ DUQUE, Lina; RODRÍGUEZ, Leonardo y LÓPEZ, Marcos. *Electrospinning: la era de las nanofibras*. p. 4.

2.2.3.2. Concentración de la solución

La concentración del material en la solución resultante es de gran importancia pues influye en la viscosidad y tensión superficial del material. Si estos valores son muy elevados las fuerzas electrostáticas provenientes de la fuente de alimentación no son capaces de romper las fuerzas de cohesión entre las moléculas del material y, por el contrario, si son valores muy bajos las fuerzas de cohesión se rompen con tanta facilidad que no se forma un flujo continuo sino un flujo discontinuo de gotas.

2.2.3.3. Voltaje aplicado

El voltaje o diferencia de potencial eléctrico aplicado da la pauta para definir y controlar la fuerza electrostática que se ejercerá sobre la solución del material. Si es una fuerza muy débil es posible que las moléculas de material no se reordenen de manera uniforme y no formen fibras definidas y, por el contrario, si es muy elevada es posible que se transporte mayor cantidad de material desde la jeringa hacia el colector, generando fibras más gruesas. La elección del voltaje óptimo depende de cada material y solvente.

2.2.3.4. Tipo de disolvente

Otro parámetro importante es el solvente empleado para realizar la solución. El primer requerimiento es que debe disolver por completo el material, si este no se disuelve podría ocurrir un taponamiento en la aguja de la jeringa y con ello la interrupción de la formación de nanofibras. El segundo requerimiento es que el solvente debe poseer características dieléctricas, pues de esta manera comparte y refuerza la capacidad dieléctrica del material y con ello mejora la formación de

dipolos eléctricos en su estructura. Una medida de la capacidad dieléctrica de un solvente es su constante dieléctrica.

2.2.3.5. Distancia entre la jeringa y el colector

La distancia entre la aguja de la jeringa y el colector influye en el tamaño y calidad de las fibras pues si la distancia es muy corta no se permite la evaporación completa del solvente, con lo cual las fibras resultantes contienen residuos de solvente y son impuras, disminuyendo su calidad. Por otra parte, si la distancia es muy grande es posible que el estiramiento coaxial del cono de Taylor no sea lo suficientemente largo para llegar hacia el plato colector y la fibra se rompería antes de llegar a este.

2.2.4. Características especiales que otorgan las nanofibras

Las propiedades de los materiales difieren dependiendo del tamaño de los mismos. Un material a escala nanométrica posee características diferentes en comparación al mismo material a escala macrométrica debido principalmente a que la relación entre el área superficial que posee respecto al volumen que ocupa es diferente, siendo considerablemente mayor a escala nano. “Las nanofibras son capaces de formar materiales altamente porosos que otorgan diversas propiedades altamente favorables para determinadas aplicaciones que en eras anteriores a la nanotecnología no eran posibles.”¹⁷

A continuación, se describen algunas de las propiedades que es posible mejorar en los materiales al implementar nanofibras en sus estructuras, las cuales son de gran importancia en diversos campos de la ciencia.

¹⁷ CARACCIOLO, Pablo; CORTEZ, Pablo y BUFFA, Fabian. *Pequeñas fibras, grandes aplicaciones*. p. 1.

2.2.4.1. Hidrofobicidad

“La hidrofobicidad es la capacidad de un material para ser impenetrable por el agua. Las moléculas del material no establecen interacciones ion-dipolo ni puentes de hidrógeno con las moléculas de agua.”¹⁸

2.2.4.2. Reflectancia

“La reflectancia es la medida de la cantidad de energía que un cuerpo refleja en relación a la cantidad de energía electromagnética a la que es expuesto inicialmente.”¹⁹

2.2.4.3. Protección contra rayos ultravioleta

En los últimos años, la capa de ozono de la Tierra está más deteriorada, lo que permite el mayor paso de rayos ultravioleta provenientes del sol. Esto puede conllevar a problemas de la piel, e incluso enfermedades crónicas como el cáncer. Por lo tanto, la protección contra rayos ultravioleta cobra importancia.

2.2.4.4. Tenacidad

“La tenacidad se define generalmente como la resistencia de un material a romperse o deformarse; es la energía que es capaz de absorber un cuerpo antes de romperse.”²⁰

¹⁸ BioRom. *Interacciones hidrofóbicas*. <http://www.biorom.uma.es/contenido/JCorzo/temas completos/InteraccionesNC/agua/hidrofobicos.htm>. Consulta: 06 de julio de 2019.

¹⁹ Alma Labs. *Reflectancia*. <http://almalaboratorios.com/reflectancia/>. Consulta: 03 de julio de 2019.

²⁰ Prontubeam. *Propiedades mecánicas de los materiales*. http://www.prontubeam.com/articulos/12_2015_PROP_MAT/12_2015_PROP_MAT_articulo.pdf. Consulta: 07 de julio de 2019.

2.2.4.5. Resistencia a la tracción

“La resistencia a la tracción se refiere al esfuerzo máximo de tracción que es capaz de soportar un material antes de romperse. Tracción se refiere al estiramiento de un cuerpo por la acción de dos fuerzas en sentido opuesto.”²¹

2.2.4.6. Flexibilidad

“La flexibilidad es la capacidad de un material de poder ser doblado sin riesgo a romperse.”²² Esta característica es difícil de combinar con otras características en materiales convencionales; sin embargo, es factible mediante el empleo de nanofibras.

2.2.4.7. Propiedades antimicrobianas

“Las nanofibras pueden ser revestidas con compuestos químicos cuyos iones producen la inhibición de la actividad microbiana. Además, por su estructura las nanofibras impiden el paso de las bacterias a través de sus intersticios.”²³

2.2.4.8. Autolimpieza

“Las nanofibras pueden ordenarse de tal manera que los intersticios entre ellas son de tan reducido tamaño que impiden el paso de partículas de suciedad

²¹ Motorgiga. *Resistencia a la tracción – definición – significado*. <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/resistencia-a-la-traccion-definicion-significado/gmx-niv15-con195386.htm>. Consulta: 08 de julio de 2019.

²² GRASSO, Florencia. *Flexibilidad de los materiales*. <https://florenciagrassoimd2014.wordpress.com/2014/09/01/flexibilidad-de-los-materiales/>. Consulta: 05 de julio de 2019.

²³ ESPINOZA, Carlos. *Preparación y caracterización de nanofibras antimicrobianas compuestas de copolímeros asociativos-nanopartículas de plata y PVA, por el proceso de electrohilado*. p. 56.

de mayor tamaño. Eventualmente, el agua del lavado las arrastra, con lo cual la acción de un jabón o detergente no es tan necesaria.”²⁴

2.2.4.9. Resistencia a las arrugas

La firmeza del ordenamiento de las nanofibras permite una mayor resistencia a la formación de arrugas en los textiles elaborados con estas.

2.2.5. Aplicaciones de las nanofibras

“Las nanofibras sintéticas se emplean actualmente en una gran variedad de ámbitos: la construcción, textiles, medicina, entre otros.”²⁵ En construcción se utilizan como agentes de refuerzo de los morteros de cemento para mejorar sus propiedades mecánicas, y no solamente el cemento sino también para reforzar otros materiales de construcción. En los textiles se han utilizado para crear hilos que provean a los tejidos propiedades como hidrofobicidad, reflectancia de rayos ultravioleta, autolimpieza, entre muchas otras. En medicina se han utilizado como sustituto de las nanofibras de colágeno naturales que se encuentran en los tejidos humanos, cuando estos han sido lesionados; también, en medicamentos para la liberación controlada de fármacos en áreas específicas del cuerpo sin afectar otras áreas.

2.3. Hidrofobicidad

La hidrofobicidad es la capacidad de un material a ser impenetrable por el agua. Esta característica es beneficiosa pues existen materiales que se corroen

²⁴ FERNÁNDEZ, Agustín. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. p. 9.

²⁵ CARACCILO, Pablo; CORTEZ, Pablo y BUFFA, Fabian. *Pequeñas fibras, grandes aplicaciones*. p. 2.

al ser penetrados por las partículas de agua, o ciertos materiales bajan su calidad al humedecerse. Por ello es importante mantenerlos secos.

Esta capacidad en las nanofibras se debe a la estructura de la superficie que forman, la cual posee intersticios de menor tamaño en comparación a las microestructuras y macroestructuras, con lo cual las moléculas de agua no encuentran espacio suficiente para penetrar. Esta característica trata de imitarse basándose en las hojas de loto.

2.3.1. Ángulo de contacto

La técnica más empleada para determinar la hidrofobicidad de un material es la medición del ángulo de contacto formado entre el material y una gota de agua suspendida sobre el mismo. Para ello existen en la industria diferentes equipos electrónicos que son conectados a un programa de software para el procesamiento digital de imágenes.

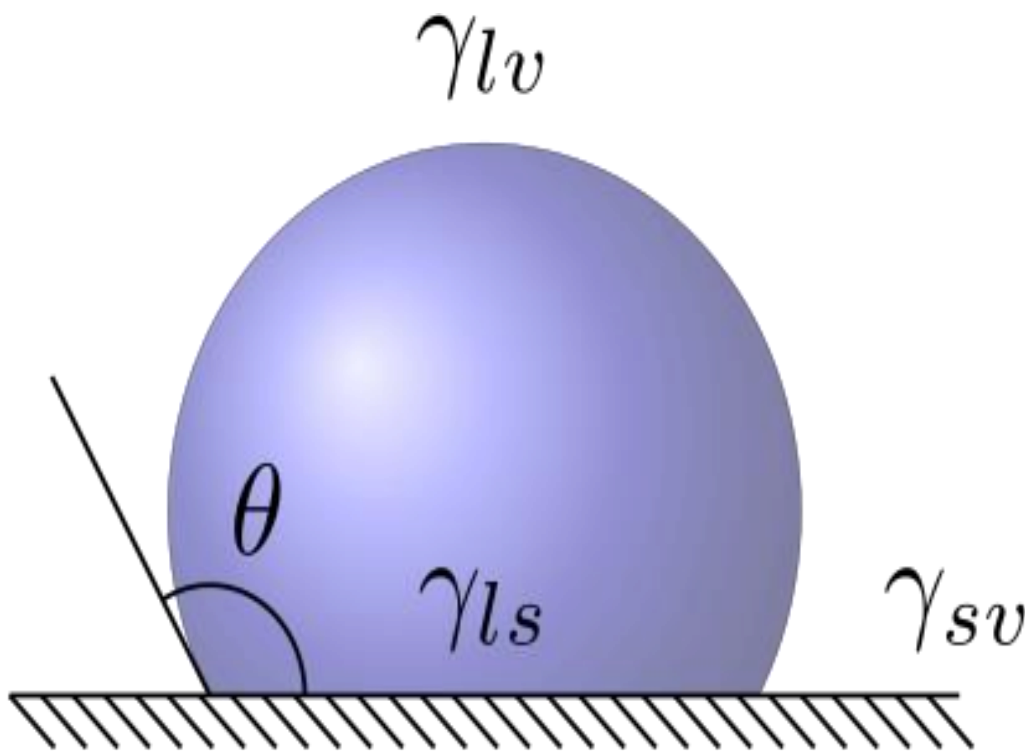
Generalmente, la técnica consiste en colocar el material de interés sobre una plataforma destinada para el efecto, la cual es completamente horizontal y tiene ubicada una cámara fotográfica de alta resolución y enfoque a pocos centímetros de distancia, se suspende una gota de agua sobre el material por medio de un gotero y posteriormente se efectúa la fotografía. Esta fotografía es importada al programa de software para realizar la medición del ángulo.

Este ángulo se mide trazando una recta tangente al contorno de la gota. La recta se traza desde la superficie horizontal del material en el último punto de contacto entre el material y la gota, hasta el primer punto en el cual la recta toca el contorno de la gota, y puede extenderse más allá de este punto. Para una

mejor comprensión se muestra de manera gráfica la medición del ángulo de contacto (θ) en la figura 3.

“Si el ángulo de contacto es mayor a 90° el material será considerado hidrófobo, si está entre 120° a 150° es ultrahidrófobo, y si es mayor a 150° es considerado superhidrófobo. Un ángulo de contacto menor a 90° representa a un material hidrófilo.”²⁶

Figura 3. **Ángulo de contacto**



Fuente: OTTESEN, Vegar. *File: Contact Angle and surface tension.svg*.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Contact_Angle_and_surface_tension.svg. Consulta: 4 de julio de 2019.

²⁶ FERNÁNDEZ, Agustín. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. p. 10.

2.4. Transmitancia óptica

La transmitancia es la medida de la capacidad de un cuerpo o material para dejar pasar a través de su superficie las ondas electromagnéticas que son incididas sobre él a determinadas longitudes de onda. Para determinarla se lanza un rayo u onda electromagnética de magnitud conocida sobre el material y posteriormente a través de un detector se mide la magnitud de la fracción del rayo que atravesó la superficie del cuerpo y alcanzó el detector. “La transmitancia es entonces la relación entre la cantidad de energía transmitida que llega al detector luego de atravesar al material (I), y la cantidad de energía inicial que incidió sobre este (I_0).”²⁷ Generalmente, se expresa en porcentaje.

²⁷ GALLIK, Stephen. *Transmittance and absorbance*. <http://cellbiologyolm.stevegallik.org/node/7>. Consulta: 05 de julio de 2019.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

A continuación, se enlistan las variables dependientes e independientes por medio de las cuales se realizó el análisis fisicoquímico de las nanofibras de poliestireno.

3.1.1. Variables independientes

- Concentración de poliestireno en la solución polimérica (% en peso)
- Voltaje (volt)
- Tipo de disolvente

3.1.2. Variables dependientes

- Ángulo de contacto (°)
- Porcentaje de transmitancia

3.2. Delimitación del campo de estudio

El presente estudio es de carácter cuantitativo-experimental-comparativo. Se sintetizaron fibras de poliestireno (PS) utilizando como materia prima residuos sólidos de dicho material; específicamente, bandejas desechables.

El procedimiento experimental se realizó en el siguiente laboratorio de la Universidad de San Carlos de Guatemala:

- Laboratorio de Análisis Fisicoquímicos (LAFIQ), Sección de Química Industrial, Centro de Investigaciones de Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala.

Para la síntesis de las fibras se utilizó un equipo de electrohilado construido mediante un sistema de bombeo para la inyección de polímero hacia un rotor colector de aluminio. Se variaron las condiciones de fabricación para estudiar el efecto de dichas variaciones sobre las propiedades de las fibras sintetizadas. Los factores a variar fueron: concentración de poliestireno en la disolución polimérica, tipo de disolvente y voltaje aplicado.

Se determinó el efecto de la variación de los factores mencionados anteriormente sobre la hidrofobicidad de las fibras. Para ello se realizó una captura fotográfica de una gota de agua destilada suspendida sobre la superficie de cada grupo de fibras; la fotografía posteriormente se importó al software ImageJ y mediante el *plugin dropsnake* se determinó el ángulo de contacto entre la gota de agua y la superficie de las fibras.

Se midió, mediante espectrofotometría, el porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta a una longitud de onda de 350 nm para cada grupo de fibras sintetizadas, esto con la finalidad de determinar si existía variación dependiendo de las diferentes condiciones de fabricación.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Per. Cont. Helen Yessenia Escobar Ramos

- Asesora: PhD. Marlene Susana Arrechea Alvarado
- Co-asesora: MSc. Licda Q. Ingrid Lorena Benítez Pacheco

3.4. Recursos materiales disponibles

A continuación, se presentan los materiales empleados en la realización de la fase experimental.

3.4.1. Equipo

- Equipo de electrohilado constituido por:
 - Fuente de alimentación de voltaje
 - Sistema de bombeo para inyección
 - Rotor colector
- Cámara fotográfica de alta resolución
- Espectrofotómetro
- Computador con el software ImageJ instalado
- Balanza analítica
- Campana de extracción de gases

3.4.2. Cristalería

- Jeringas desechables de 20 cc
- Beakers de 50 mL
- Varillas de agitación
- Pipetas serológicas de 5 mL
- Probetas de 10 mL
- Celdas para espectrofotómetro, de plástico
- Goteros

3.4.3. Reactivos

- Poliestireno
- Cloroformo
- Dimetilformamida
- Tolueno
- Acetona
- Agua destilada

3.5. Técnica cuantitativa

A continuación, se detalla el procedimiento realizado durante la fase experimental.

3.5.1. Preparación de disolución polimérica

- La materia prima de poliestireno fue debidamente limpiada y tratada para no contener residuos.
- Se cortaron trozos de poliestireno provenientes de la materia prima.
- Los trozos de poliestireno fueron pesados en una balanza analítica de modo que se recolectó la cantidad requerida en peso para alcanzar la concentración de interés en 100 mL del respectivo disolvente, la concentración y el solvente fueron seleccionados de manera aleatoria.
- Se disolvieron los trozos de poliestireno en 100 mL del solvente respectivo, que formó una solución polimérica.

3.5.2. Proceso de electrohilado

- Se vertieron 5 mL de la solución de polímero en una jeringa plástica de 20 cc.
- Se conectó la jeringa a la bomba de inyección en el equipo de electrohilado.

- Se conectaron dos cables tipo lagarto: uno desde la parte positiva de la fuente de alimentación hacia la punta de la jeringa y el segundo desde la parte negativa de la fuente hacia el rotor colector de aluminio, de manera que quedara cerrado el circuito eléctrico.
- Se reguló el voltaje de manera aleatoria (5 kV, 10 kV o 15 kV) en el equipo de electrohilado.
- Se reguló la velocidad de la bomba de inyección.
- Se encendió el equipo de electrohilado comenzando de esa manera el proceso de formación de fibras.
- Se recolectaron fibras durante un tiempo de 15 minutos.
- Se extrajeron las fibras del rotor colector y se almacenaron para su posterior análisis.
- Se repitieron los procedimientos de preparación de solución polimérica y proceso de electrohilado hasta recolectar una muestra de cada grupo de fibras, variando solvente, voltaje y concentración; se obtuvo un total de 22 grupos de fibras.

3.5.3. Prueba de hidrofobicidad

- Se preparó un soporte con fondo negro para tomar fotografías.
- Se cortó una muestra del primer grupo de fibras sintetizadas.

- Se colocó la muestra en la plataforma horizontal del soporte.
- Con ayuda de un gotero se vertió una gota de agua destilada sobre la superficie de las fibras.
- Se fotografió la gota en contacto con las fibras.
- Se importó la fotografía al software libre ImageJ y mediante el *plugin* DropSnake se midió el ángulo de contacto entre la gota y la superficie de las fibras; este procedimiento se realizó de acuerdo al procedimiento planteado por Agustín Fernández en su proyecto final de carrera *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*.
- Se repitió el mismo procedimiento con dos muestras más del mismo grupo de fibras.
- Se repitió todo el procedimiento anterior con los 21 grupos de fibras restantes.

3.5.4. Prueba de porcentaje de transmitancia de rayos UV

- En el espectrofotómetro UV-VIS se fijó una longitud de onda de 350 nm, debido a que se encuentra dentro de la región ultravioleta.
- Se fijó el blanco a esa longitud de onda con una celda espectrofotométrica de plástico vacía.

- Se realizó una medida de referencia con la celda espectrofotométrica vacía.
- Se colocó una muestra del primer grupo de fibras en la celda plástica y se introdujo al espectrofotómetro.
- Se midió el porcentaje de transmitancia.
- Se repitió el mismo procedimiento con cinco muestras más del mismo grupo de fibras.
- Se repitió todo el procedimiento anterior con los 21 grupos de fibras restantes.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Para cada unidad experimental se efectuó la técnica de electrohilado y con las fibras obtenidas se realizó un ensayo de hidrofobicidad y de transmitancia de rayos ultravioleta. Se midió el ángulo de contacto y el porcentaje de transmitancia de las fibras sintetizadas mediante cada combinación trifactorial.

Inicialmente se consideró al reactivo acetona como disolvente para la síntesis de fibras; sin embargo, se observó durante la fase experimental que al utilizar este disolvente la fuerza electrostática proveniente de la fuente de alimentación del equipo de electrohilado no era lo suficientemente fuerte para romper las fuerzas de cohesión dentro de las moléculas de poliestireno. Esto perjudicó la obtención de fibras a tal punto que no fue posible sintetizar ningún grupo de fibras utilizando acetona como solvente, a ninguna concentración o voltaje aplicado. Por ello se optó por tolueno como solvente alternativo.

Al emplear las combinaciones trifactoriales, 25 % PS – 5 kV – cloroformo y 25 % PS – 15 kV – dimetilformamida no fue posible la obtención de fibras, lo que conllevó a no obtener mediciones de ángulo de contacto ni porcentaje de transmitancia para estas combinaciones.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

A continuación, se muestran tabulados los datos recolectados para el ángulo de contacto y el porcentaje de transmitancia de las fibras sintetizadas.

Tabla I. **Ángulo de contacto medido para las fibras de poliestireno**

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	Ángulo de contacto (°)		Ángulo de contacto promedio (°)
				Izquierdo	Derecho	
1	15	Cloroformo	5	87,520	87,520	93,061
2	15	Cloroformo	5	99,585	86,537	
3	15	Cloroformo	5	97,038	100,166	
1	15	Cloroformo	10	90,476	90,476	92,124
2	15	Cloroformo	10	91,432	91,432	
3	15	Cloroformo	10	94,464	94,464	
1	15	Cloroformo	15	99,411	99,411	97,724
2	15	Cloroformo	15	99,672	95,776	
3	15	Cloroformo	15	96,037	96,037	
1	20	Cloroformo	5	91,140	87,043	88,005
2	20	Cloroformo	5	88,838	87,564	
3	20	Cloroformo	5	86,424	87,018	
1	20	Cloroformo	10	91,952	94,272	87,185
2	20	Cloroformo	10	70,082	77,359	
3	20	Cloroformo	10	93,587	95,858	
1	20	Cloroformo	15	96,226	89,912	91,960
2	20	Cloroformo	15	88,434	88,646	
3	20	Cloroformo	15	90,340	98,201	

Continuación de la tabla I.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	Ángulo de contacto (°)		Ángulo de contacto promedio (°)
				Izquierdo	Derecho	
1	25	Cloroformo	10	81,408	80,151	88,603
2	25	Cloroformo	10	92,457	93,945	
3	25	Cloroformo	10	97,294	86,360	
1	25	Cloroformo	15	101,059	100,788	100,601
2	25	Cloroformo	15	111,216	105,129	
3	25	Cloroformo	15	95,700	89,716	
1	20	Dimetilformamida	5	93,835	117,871	105,241
2	20	Dimetilformamida	5	114,575	100,761	
3	20	Dimetilformamida	5	100,999	103,407	
1	20	Dimetilformamida	10	103,723	105,587	114,720
2	20	Dimetilformamida	10	129,358	112,903	
3	20	Dimetilformamida	10	125,396	111,353	
1	20	Dimetilformamida	15	104,436	111,996	107,875
2	20	Dimetilformamida	15	103,517	110,773	
3	20	Dimetilformamida	15	113,897	102,629	
1	25	Dimetilformamida	5	102,726	99,252	104,026
2	25	Dimetilformamida	5	116,636	99,554	
3	25	Dimetilformamida	5	104,630	101,360	
1	25	Dimetilformamida	10	139,856	121,966	129,301
2	25	Dimetilformamida	10	147,603	132,031	
3	25	Dimetilformamida	10	121,141	113,206	
1	30	Dimetilformamida	5	103,709	91,277	98,157
2	30	Dimetilformamida	5	104,189	107,974	
3	30	Dimetilformamida	5	97,835	83,956	
1	30	Dimetilformamida	10	92,249	88,891	106,460
2	30	Dimetilformamida	10	126,405	111,716	
3	30	Dimetilformamida	10	96,326	123,171	
1	30	Dimetilformamida	15	107,067	118,955	99,296
2	30	Dimetilformamida	15	88,684	89,462	
3	30	Dimetilformamida	15	90,714	100,893	
1	30	Tolueno	5	86,321	87,315	92,818
2	30	Tolueno	5	109,377	96,105	
3	30	Tolueno	5	89,788	88,003	

Continuación de la tabla I.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	Ángulo de contacto (°)		Ángulo de contacto promedio (°)
				Izquierdo	Derecho	
1	30	Tolueno	10	107,664	131,849	115,330
2	30	Tolueno	10	116,500	107,135	
3	30	Tolueno	10	116,335	112,494	
1	30	Tolueno	15	137,685	130,678	124,481
2	30	Tolueno	15	107,223	116,701	
3	30	Tolueno	15	133,198	121,403	
1	40	Tolueno	5	83,222	84,735	86,254
2	40	Tolueno	5	96,985	84,959	
3	40	Tolueno	5	86,071	81,552	
1	40	Tolueno	10	96,218	97,022	87,455
2	40	Tolueno	10	80,825	80,422	
3	40	Tolueno	10	88,782	81,461	
1	40	Tolueno	15	119,451	95,307	93,699
2	40	Tolueno	15	81,685	83,115	
3	40	Tolueno	15	90,089	92,547	

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Porcentaje de transmitancia de rayos UV medido para las fibras de poliestireno sintetizadas**

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	% Transmitancia	% Transmitancia promedio
1	15	Cloroformo	5	1,82	1,77
2	15	Cloroformo	5	1,76	
3	15	Cloroformo	5	1,74	
4	15	Cloroformo	5	1,73	
5	15	Cloroformo	5	1,82	
6	15	Cloroformo	5	1,76	
1	15	Cloroformo	10	4,70	
2	15	Cloroformo	10	4,71	
3	15	Cloroformo	10	4,72	
4	15	Cloroformo	10	4,24	

Continuación de la tabla II.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	% Transmitancia	% Transmitancia promedio
5	15	Cloroformo	10	4,26	4,48
6	15	Cloroformo	10	4,24	
1	15	Cloroformo	15	6,04	6,04
2	15	Cloroformo	15	6,02	
3	15	Cloroformo	15	6,02	
4	15	Cloroformo	15	6,03	
5	15	Cloroformo	15	6,09	
6	15	Cloroformo	15	6,06	
1	20	Cloroformo	5	4,74	4,80
2	20	Cloroformo	5	3,43	
3	20	Cloroformo	5	4,47	
4	20	Cloroformo	5	5,30	
5	20	Cloroformo	5	5,41	
6	20	Cloroformo	5	5,43	
1	20	Cloroformo	10	9,08	9,10
2	20	Cloroformo	10	9,13	
3	20	Cloroformo	10	9,12	
4	20	Cloroformo	10	9,03	
5	20	Cloroformo	10	9,14	
6	20	Cloroformo	10	9,10	
1	20	Cloroformo	15	4,00	3,95
2	20	Cloroformo	15	4,06	
3	20	Cloroformo	15	3,94	
4	20	Cloroformo	15	3,96	
5	20	Cloroformo	15	3,81	
6	20	Cloroformo	15	3,95	
1	25	Cloroformo	10	16,00	16,02
2	25	Cloroformo	10	16,00	
3	25	Cloroformo	10	16,10	
4	25	Cloroformo	10	16,20	
5	25	Cloroformo	10	16,30	
6	25	Cloroformo	10	15,50	
1	25	Cloroformo	15	30,27	
2	25	Cloroformo	15	30,22	
3	25	Cloroformo	15	27,35	

Continuación de la tabla II.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	% Transmitancia	% Transmitancia promedio
4	25	Cloroformo	15	27,32	28,29
5	25	Cloroformo	15	27,32	
6	25	Cloroformo	15	27,26	
1	20	Dimetilformamida	5	0,05	0,03
2	20	Dimetilformamida	5	0,02	
3	20	Dimetilformamida	5	0,03	
4	20	Dimetilformamida	5	0,02	
5	20	Dimetilformamida	5	0,02	
6	20	Dimetilformamida	5	0,02	
1	20	Dimetilformamida	10	0,33	0,31
2	20	Dimetilformamida	10	0,33	
3	20	Dimetilformamida	10	0,29	
4	20	Dimetilformamida	10	0,29	
5	20	Dimetilformamida	10	0,33	
6	20	Dimetilformamida	10	0,31	
1	20	Dimetilformamida	15	0,00	0,01
2	20	Dimetilformamida	15	0,00	
3	20	Dimetilformamida	15	0,00	
4	20	Dimetilformamida	15	0,05	
5	20	Dimetilformamida	15	0,00	
6	20	Dimetilformamida	15	0,02	
1	25	Dimetilformamida	5	0,32	0,33
2	25	Dimetilformamida	5	0,32	
3	25	Dimetilformamida	5	0,33	
4	25	Dimetilformamida	5	0,34	
5	25	Dimetilformamida	5	0,33	
6	25	Dimetilformamida	5	0,33	
1	25	Dimetilformamida	10	1,79	1,85
2	25	Dimetilformamida	10	1,85	
3	25	Dimetilformamida	10	1,83	
4	25	Dimetilformamida	10	2,02	
5	25	Dimetilformamida	10	1,83	
6	25	Dimetilformamida	10	1,78	
1	30	Dimetilformamida	5	0,04	
2	30	Dimetilformamida	5	0,04	
3	30	Dimetilformamida	5	0,04	

Continuación de la tabla II.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	% Transmitancia	% Transmitancia promedio
4	30	Dimetilformamida	5	0,04	0,04
5	30	Dimetilformamida	5	0,04	
6	30	Dimetilformamida	5	0,04	
1	30	Dimetilformamida	10	1,76	1,90
2	30	Dimetilformamida	10	1,94	
3	30	Dimetilformamida	10	1,81	
4	30	Dimetilformamida	10	1,99	
5	30	Dimetilformamida	10	1,99	
6	30	Dimetilformamida	10	1,90	
1	30	Dimetilformamida	15	18,00	17,90
2	30	Dimetilformamida	15	17,90	
3	30	Dimetilformamida	15	17,70	
4	30	Dimetilformamida	15	18,00	
5	30	Dimetilformamida	15	17,90	
6	30	Dimetilformamida	15	17,90	
1	30	Tolueno	5	0,52	0,53
2	30	Tolueno	5	0,53	
3	30	Tolueno	5	0,56	
4	30	Tolueno	5	0,52	
5	30	Tolueno	5	0,52	
6	30	Tolueno	5	0,52	
1	30	Tolueno	10	17,10	12,65
2	30	Tolueno	10	12,40	
3	30	Tolueno	10	11,50	
4	30	Tolueno	10	12,00	
5	30	Tolueno	10	11,30	
6	30	Tolueno	10	11,60	
1	30	Tolueno	15	26,80	28,53
2	30	Tolueno	15	28,60	
3	30	Tolueno	15	29,10	
4	30	Tolueno	15	29,10	
5	30	Tolueno	15	28,90	
6	30	Tolueno	15	28,70	
1	40	Tolueno	5	0,37	
2	40	Tolueno	5	0,34	
3	40	Tolueno	5	0,35	

Continuación de la tabla II.

No. repetición	Concentración (% en peso)	Solvente	Voltaje (kV)	% Transmitancia	% Transmitancia promedio
4	40	Tolueno	5	0,34	0,35
5	40	Tolueno	5	0,33	
6	40	Tolueno	5	0,35	
1	40	Tolueno	10	1,16	1,65
2	40	Tolueno	10	1,17	
3	40	Tolueno	10	1,23	
4	40	Tolueno	10	1,17	
5	40	Tolueno	10	2,50	
6	40	Tolueno	10	2,65	
1	40	Tolueno	15	10,90	4,96
2	40	Tolueno	15	5,28	
3	40	Tolueno	15	3,46	
4	40	Tolueno	15	2,11	
5	40	Tolueno	15	2,10	
6	40	Tolueno	15	5,89	

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

A continuación, se presenta el análisis estadístico de los resultados experimentales obtenidos.

3.8.1. Media aritmética

Las variables respuesta serán los promedios de las repeticiones de cada combinación trifactorial:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{[Ecuación 1]}$$

3.8.2. Ángulo de contacto

A continuación, se presenta el análisis estadístico realizado para los resultados de los ángulos de contacto obtenidos experimentalmente.

3.8.2.1. Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realizó con la finalidad de comprobar si la media de los datos del ángulo de contacto es igual o mayor a 90° , esto con el fin de confirmar si las fibras resultantes presentan carácter hidrófobo.

Para ello se plantearon las siguientes hipótesis:

$$H_0: \mu \geq 90$$

$$H_1: \mu < 90$$

Se utilizó la siguiente ecuación:

$$z = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad [\text{Ecuación 2}]$$

Al sustituir los valores de $\bar{x} = 100,199$, $\mu = 90$, $\sigma = 14,456$ y $n = 132$, se obtuvo una z calculada igual a 8,1059. Al analizarlo con un nivel de significancia de 0,05 se obtiene que la z crítica es -1,64.

Debido a que z calculada es mayor a z crítica se acepta la hipótesis nula con un nivel de confianza de 95 %. El ángulo de contacto de las fibras de poliestireno sintetizadas es igual o mayor a 90° y por consiguiente son hidrófobas.

3.8.2.2. Análisis de varianza de dos factores

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de dos factores, por cada disolvente utilizado.

Tabla III. **Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando cloroformo como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Concentración	256,5555	2	128,2777	3,8330	0,0290	3,2043
Voltaje	626,7941	2	313,3970	9,3646	0,0003	3,2043
Interacción	149,9956	4	37,4989	1,1205	0,3587	2,5787
Dentro del grupo	1 505,9670	45	33,4659			
Total	2 539,3130	53				

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando dimetilformamida como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	F crítico
Concentración	1 162,4790	2	581,2398	5,4357	0,0076	3,2043
Voltaje	2 295,2880	2	1 147,6440	10,7328	0,0001	3,2043
Interacción	835,6083	4	208,9020	1,9536	0,1179	2,5787
Dentro del grupo	4 811,7750	45	106,9283			
Total	9 105,1510	53				

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Análisis de varianza de dos factores para ángulo de contacto, empleando tolueno como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Concentración	4 253,7788	1	4 253,7788	44,9021	2,0027E-07	4,1708
Voltaje	2 328,7551	2	1 164,3775	12,2909	0,0001	3,3158
Interacción	1 049,1054	2	524,5526	5,5370	0,0089	3,3158
Dentro del grupo	2 842,0326	30	94,7344			
Total	10 473,6720	35				

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a las tablas III, IV y V, se rechaza la hipótesis nula para ambos factores, debido a que, en todos los casos, F calculada es mayor a F crítica para la variable concentración y también para la variable voltaje. Por medio de ello se puede concluir que tanto el voltaje como la concentración influyen en la magnitud del ángulo de contacto; es decir, al variar uno de estos dos factores, el ángulo de contacto varía significativamente con un nivel de confianza de 95 %.

3.8.3. Porcentaje de transmitancia

Se realizó un ANOVA de dos factores, por cada solvente empleado, para determinar si la variación de voltaje y concentración incide en el porcentaje de transmitancia de las fibras sintetizadas.

Tabla VI. **Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando cloroformo como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Concentración	2 126,1588	2	1 063,0794	2 978,4562	1,5338E-48	3,2043
Voltaje	459,3310	2	229,6655	643,4596	7,8800E-34	3,2043
Interacción	691,9907	4	172,9976	484,6919	2,3188E-36	2,5787
Dentro del grupo	16,0615	45	0,3569			
Total	3 293,5421	53				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando dimetilformamida como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Concentración	463,2949	2	231,6474	70 093,9415	2,4726E-79	3,2043
Voltaje	341,4003	2	170,7001	51 651,9668	2,3735E-76	3,2043
Interacción	827,6106	4	206,9026	62 606,4325	1,2481E-83	2,5787
Dentro del grupo	0,1487	45	0,0033			
Total	1 632,4547	53				

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Análisis de varianza de dos factores para porcentaje de transmitancia, empleando tolueno como disolvente**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Concentración	1 208,3734	1	1 208,3734	422,7387	3,1102E-19	4,1708
Voltaje	1 612,2634	2	806,1317	282,0180	3,5451E-20	3,3158
Interacción	822,5232	2	411,2616	143,8762	4,2217E-16	3,3158
Dentro del grupo	85,7532	30	2,8584			
Total	3 728,9133	35				

Fuente: elaboración propia.

Con base en las tablas VI, VII y VIII, se rechaza la hipótesis nula para ambos factores, debido a que en todos los casos F de Fisher calculada es mayor a F crítica para la variable concentración y también para la variable voltaje. Por medio de ello se puede concluir que, al variar el voltaje, o la concentración, varía significativamente el porcentaje de transmitancia de las fibras sintetizadas, con un nivel de confianza de 95 %.

4. RESULTADOS

Figura 4. **Fibras de poliestireno sintetizadas empleando cloroformo como disolvente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. **Fibras de poliestireno sintetizadas empleando dimetilformamida como disolvente**



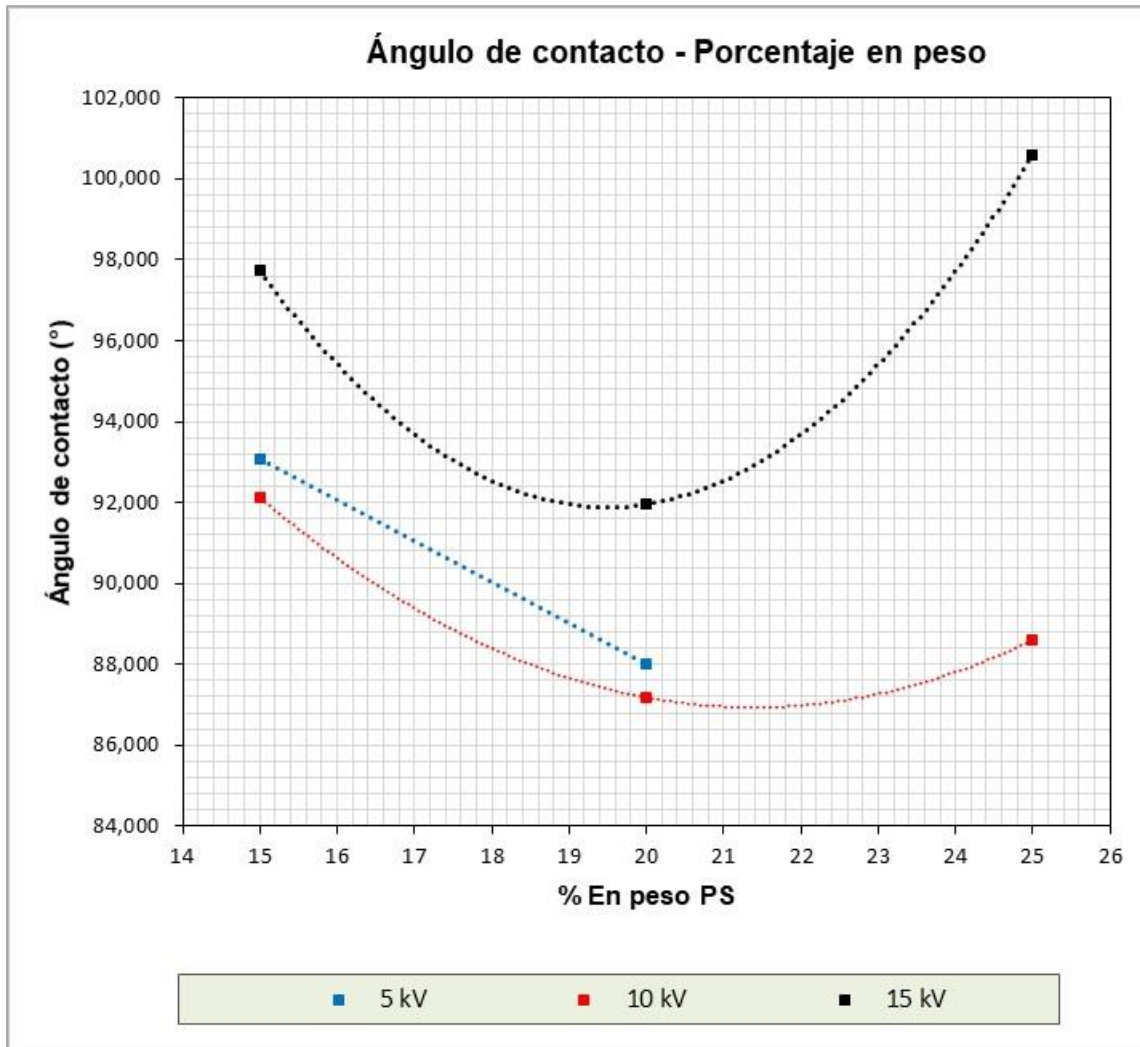
Fuente: elaboración propia.

Figura 6. **Fibras de poliestireno sintetizadas empleando tolueno como disolvente**



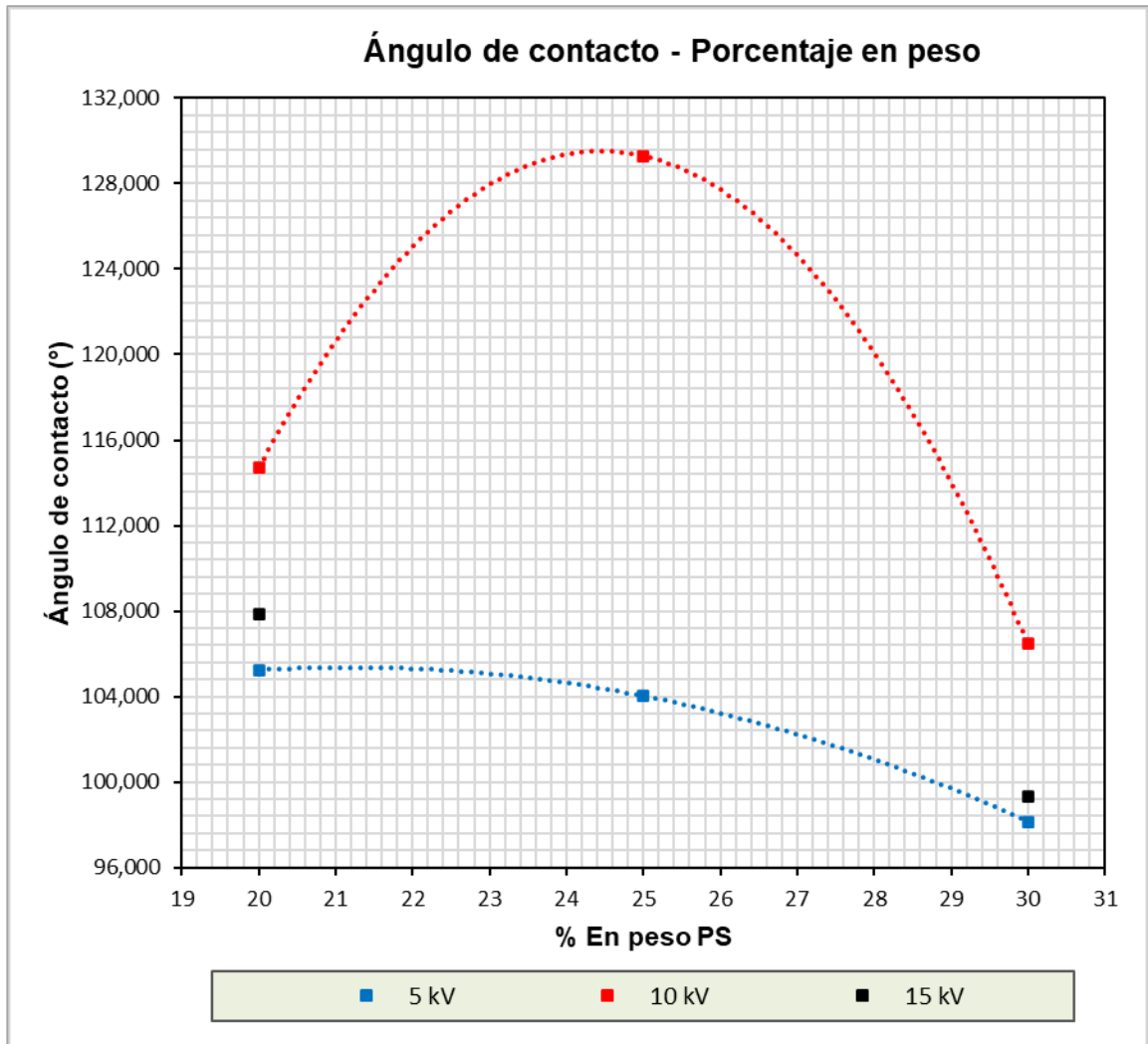
Fuente: elaboración propia.

Figura 7. **Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente**



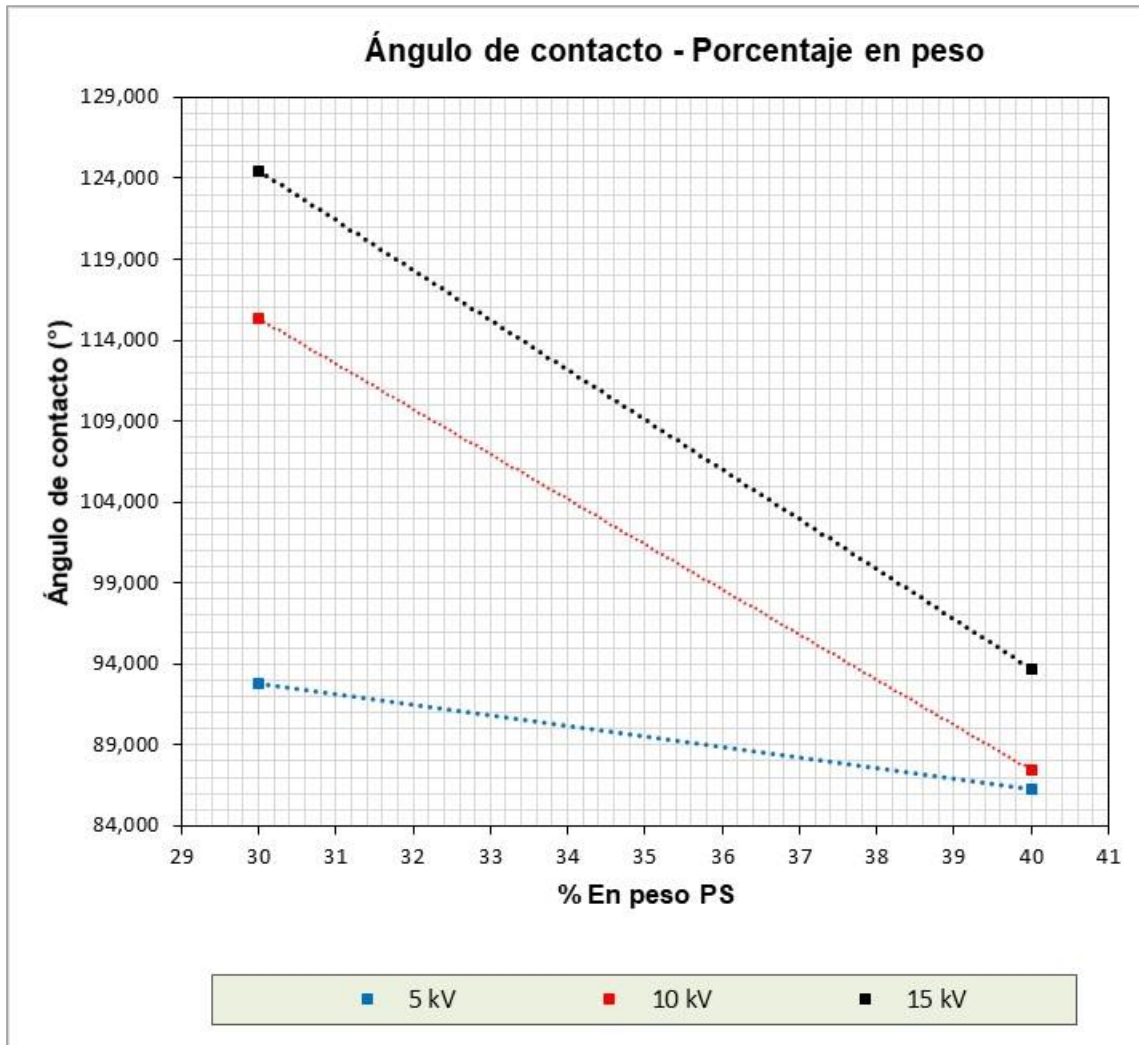
Fuente: elaboración propia.

Figura 8. **Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando dimetilformamida como disolvente**



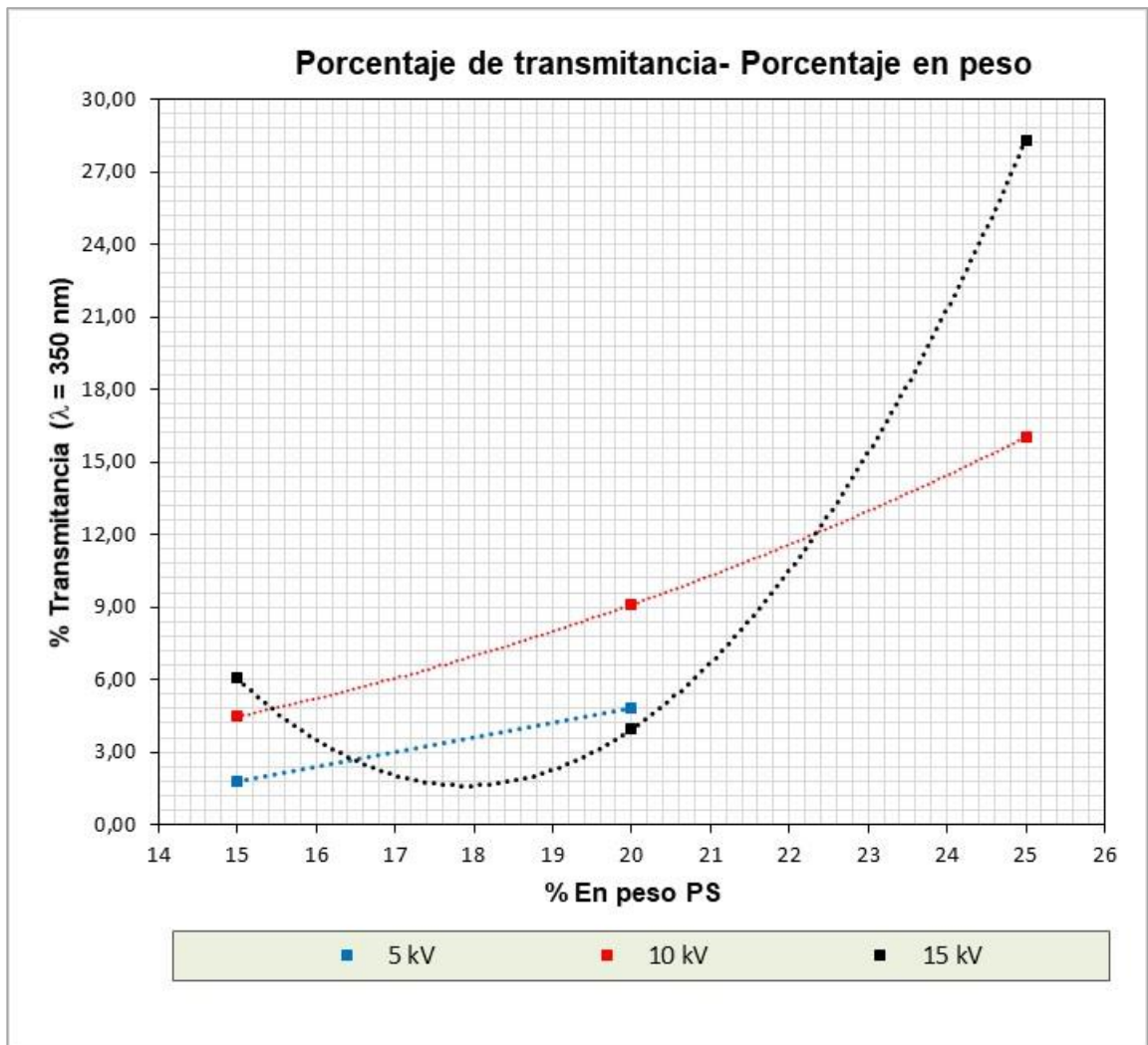
Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente**



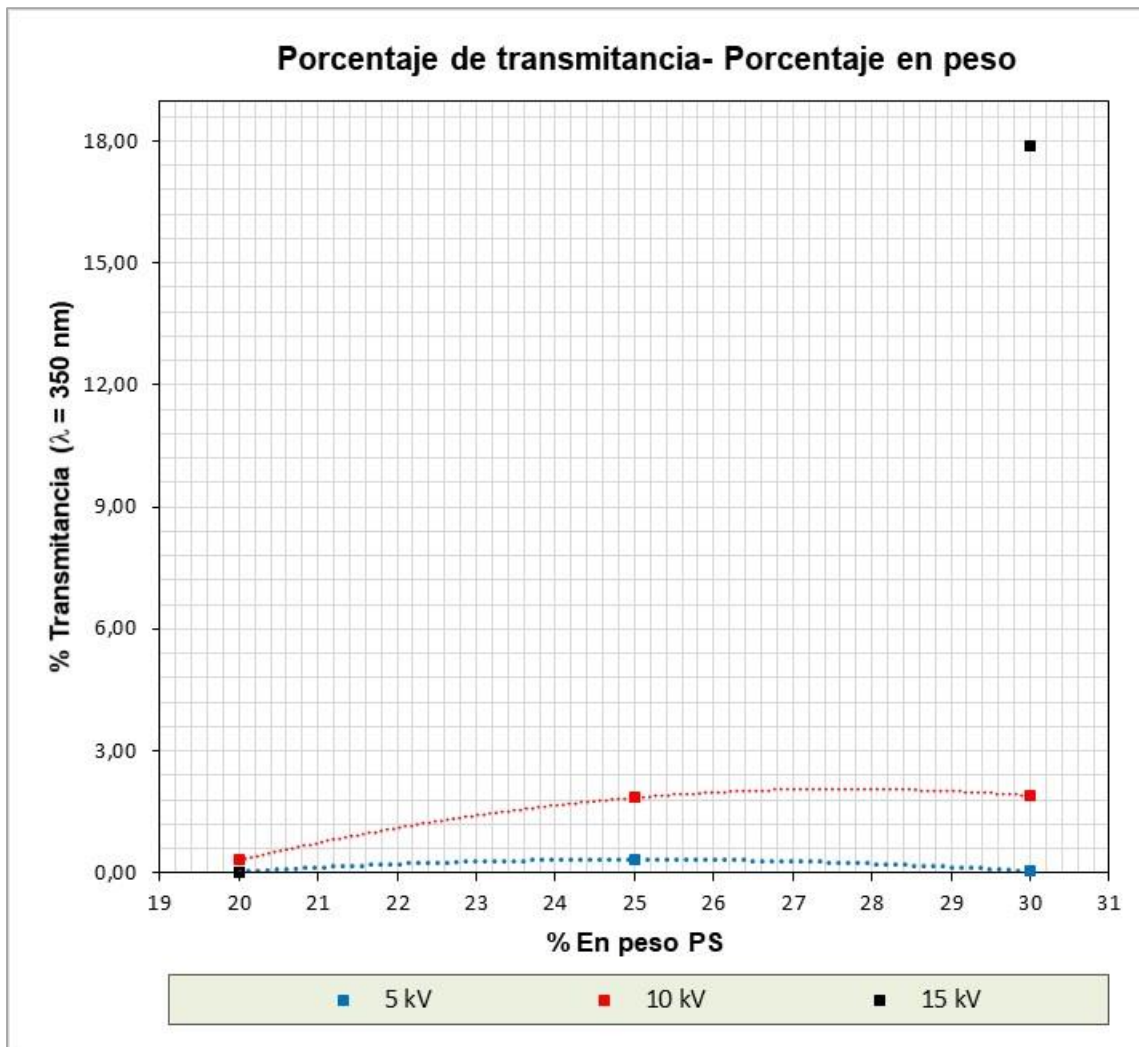
Fuente: elaboración propia.

Figura 10. **Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente**



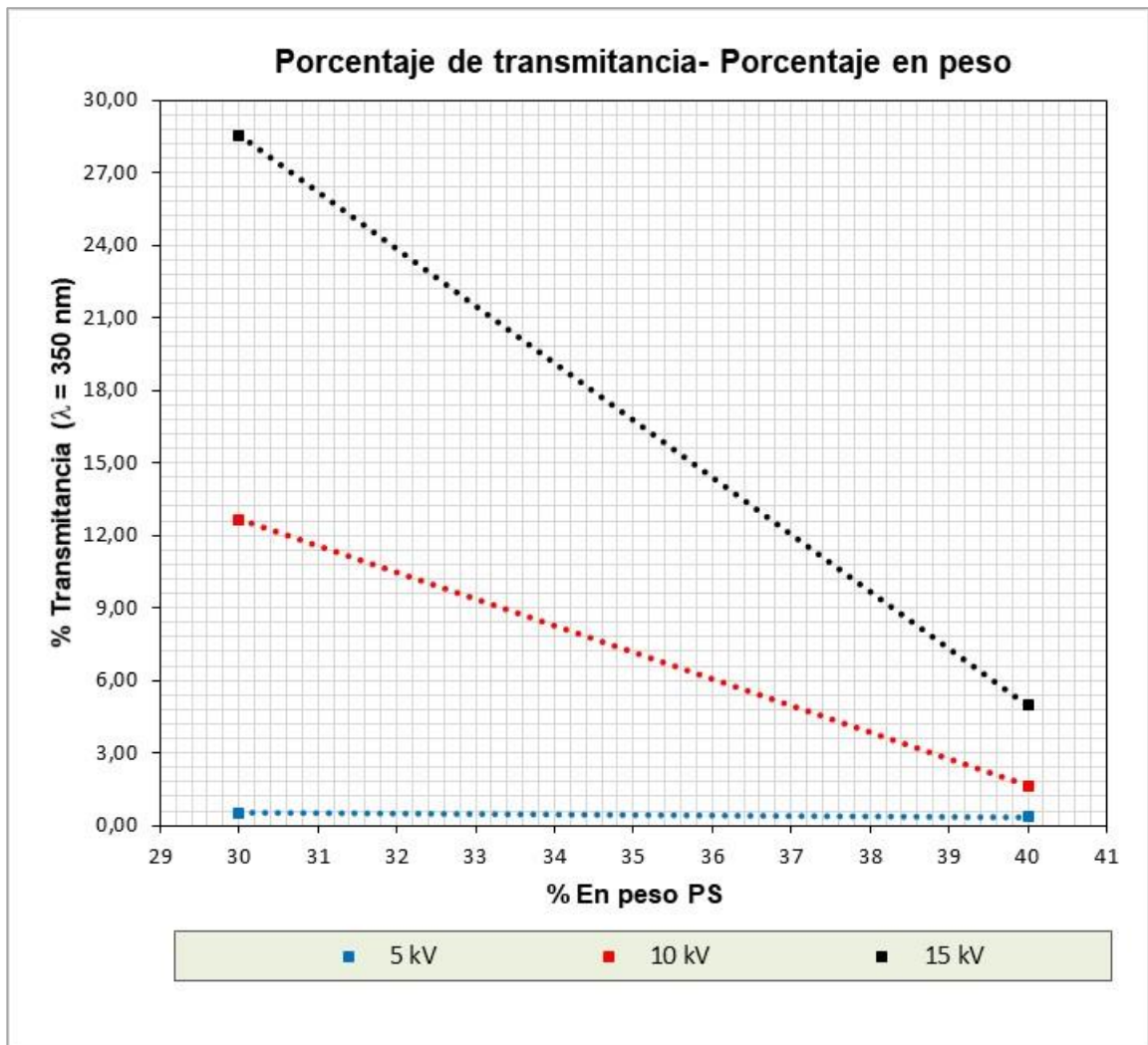
Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando dimetilformamida como disolvente**



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. **Porcentaje de transmitancia en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente**



Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La síntesis de fibras de poliestireno se realizó mediante el empleo de un equipo de electrohilado diseñado y construido para la presente investigación, el cual representó un costo de Q 4 200,00 y se muestra en los apéndices 23 y 24. De acuerdo a un estudio de mercado, el costo del equipo de electrohilado convencional es de Q 18 000,00 aproximadamente; el precio varía según las diferentes funciones y la finalidad de su uso; con lo cual se obtuvo un ahorro monetario de 76,67 % en la producción de fibras.

En la figura 4 se presentan las fibras elaboradas empleando cloroformo como disolvente. Las que fueron elaboradas a una concentración de 20 % en peso de poliestireno presentaron una distribución con mayor uniformidad y rigidez, también, un menor tiempo en su elaboración en comparación a las otras. Aquellas elaboradas a 25 % de poliestireno también presentaron uniformidad, pero durante el proceso de electrohilado se observó mayor resistencia a la formación de las fibras, con lo cual el tiempo y la cantidad resultante se vieron afectados; incluso a un voltaje de 5 kV no fue posible obtener fibras. Finalmente, se observó que a 15 % de poliestireno las fibras resultantes presentaron mayor irregularidad en su distribución, mayor flexibilidad a 5 kV y 15 kV; y mayor riesgo de rotura a un voltaje de 10 kV.

Las desigualdades presentadas podrían atribuirse a las propiedades reológicas y eléctricas de las soluciones poliméricas empleadas en la elaboración de cada conjunto de fibras. Para una misma concentración se observó que el espesor de las fibras resultantes fue mayor al aplicar 5 kV en comparación a los demás voltajes; esto podría deberse a la resistencia al cambio de forma ejercida

por la viscoelasticidad y tensión superficial, que indica que la fuerza electrostática ejercida sobre las fibras a 5 kV fue más débil para romper las fuerzas intermoleculares del poliestireno en solución, con lo cual la gota de solución presentó un menor estiramiento coaxial en comparación a voltajes más altos. A un voltaje de 15 kV se generó un espesor menor que a 5 kV, pero mayor que a 10 kV.

En algunas ocasiones a mayores voltajes, en este caso 15 kV, “la capacidad de transportar la solución de polímero desde la aguja hasta el plato colector se incrementa debido a la mayor atracción entre las cargas eléctricas proporcionadas por la fuente de alimentación y las cargas de los dipolos eléctricos formados en las moléculas de poliestireno”²⁸, con lo cual se transporta mayor fluido a mayor voltaje, generando fibras de espesor superior a las que fueron elaboradas a 10 kV.

“Además, cada polímero con su respectivo disolvente puede presentar comportamientos distintos ante la influencia del voltaje debido a las propiedades viscoelásticas del material base.”²⁹ Mediante estas observaciones se puede inferir que al emplear cloroformo como disolvente no existe un comportamiento lineal del espesor respecto al voltaje sino existe un voltaje óptimo en el cual el diámetro es menor.

En la figura 5 se presentan las fibras elaboradas empleando dimetilformamida como disolvente. En este caso, el espesor de las fibras resultantes ascendió en función del porcentaje de poliestireno en peso, lo cual se puede comparar con otro experimento realizado previamente por diferentes investigadores, en el cual “al emplear poliestireno y dimetilformamida obtuvieron

²⁸ DUQUE, Lina; RODRÍGUEZ, Leonardo y LÓPEZ, Marcos. *Electrospinning: la era de las nanofibras*. p. 6.

²⁹ *Ibíd.* p. 7.

un incremento en el diámetro de las fibras al aumentar la concentración de polímero en la solución.”³⁰ En la presente investigación las fibras que fueron elaboradas a una concentración de 20 % de poliestireno presentaron la característica de distribuirse de manera yuxtapuesta, de tal forma que era imperceptible ante el ojo humano observar cada una de las fibras de manera aislada, y no se observó una distinción aparente en el espesor de las fibras al emplear diferentes voltajes. Además, el tiempo de producción de las fibras de dimetilformamida a 20 % de poliestireno fue el menor de todos. Esto puede deberse a que a esta concentración la tensión superficial de la solución polimérica sea lo suficientemente débil para permitir que la fuerza electrostática de los tres voltajes rompa las fuerzas de cohesión sin suponer mayor dificultad.

A las concentraciones de 25 % y 30 % se observó una disminución del espesor de las fibras al incrementar el voltaje, esto puede deberse, como se mencionó anteriormente, a que a mayor voltaje existe una fuerza electrostática con capacidad superior para romper las fuerzas de cohesión dentro de la solución polimérica, y nuevamente puede compararse con el otro experimento indicado previamente, en el cual “obtuvieron una disminución del diámetro de las fibras al incrementar el voltaje aplicado en el proceso de electrohilado.”³¹

En la figura 6 se presentan las fibras elaboradas empleando tolueno como disolvente. Nuevamente a concentración constante, al incrementar el voltaje disminuyó el diámetro de las fibras resultantes.

Respecto al efecto de variar el solvente, la principal característica fue la incapacidad de emplear las mismas concentraciones al elaborar las fibras con diferentes solventes.

³⁰ TORFIFARD, Jafar; NORIAN, Erfan; AHMADI, Ramin; ISMAIL, Razali y TAGHI, Mohamad. *Polymer concentration effect on nanofiber growth using pulsed electrospinning*. p. 1.

³¹ *Ibíd.*

Empleando cloroformo se determinó que era posible obtener fibras, con propiedades medibles, en un rango de 15 % a 25 % de poliestireno en peso; para dimetilformamida el rango fue de 20 % a 30 %, y para el tolueno entre 30 % y 40 %.

A concentraciones menores a las mencionadas, la solución polimérica presentaba muy baja resistencia a la fuerza electrostática, con lo cual la separación de las moléculas ocurría de manera súbita, que genera la dispersión aleatoria de gotas de solución sobre el plato colector; es decir, no era posible obtener fibras, o se obtenían fibras con demasiados defectos impidiendo la medición de sus propiedades. Y para una concentración superior la solución presentaba una viscosidad que impedía el rompimiento de las fuerzas intermoleculares, por lo cual no se formaba el cono de Taylor en la aguja y ocurría un taponamiento de la misma.

Este fenómeno, se debe a que “al emplear bajas concentraciones de polímero el enredo de las cadenas moleculares en la solución es insuficiente por lo que el chorro se desintegra antes de llegar al plato colector y se dispersa la solución en forma de gotas; mientras que en soluciones muy concentradas la cantidad de solvente es insuficiente y se evapora rápidamente impidiendo que el chorro se forme.”³²

La variación de los rangos de concentración que pueden emplearse en cada caso puede deberse a la naturaleza misma de los solventes, y su interacción con las moléculas de poliestireno. “Una propiedad importante es la constante dieléctrica de los solventes, la cual es 4,81 para el cloroformo, 36,7 para la

³² CARACCIOLO, Pablo; CORTEZ, Pablo y BUFFA, Fabian. *Pequeñas fibras, grandes aplicaciones*. p. 3.

dimetilformamida, y 2,38 para el tolueno.”³³ Al ser diferentes, también difiere la formación de los dipolos eléctricos de polímero.

Podría inferirse que la dimetilformamida favorece la producción de fibras de menor diámetro debido a su constante dieléctrica superior, generando una mayor formación de dipolos eléctricos en el polímero, lo cual ocasiona una mayor atracción entre las cargas del dipolo y las cargas electrostáticas del campo eléctrico aplicado. “La conductividad de la solución de polímero ejerce un rol importante para la obtención de fibras de mejor calidad.”³⁴

En la figura 7 se presenta gráficamente el comportamiento del ángulo de contacto entre una gota de agua destilada y la superficie de las fibras sintetizadas en función de la concentración de poliestireno en la solución polimérica, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente. Se observa que para los tres voltajes aplicados el ángulo de contacto presenta un valor mínimo al emplear una concentración de 20 % de poliestireno.

El ángulo de contacto a 5 kV y 15 kV es mayor que a 10 kV. Este comportamiento puede deberse al espesor de las fibras. Como se mencionó anteriormente, las fibras sintetizadas a 5 kV y 15 kV presentaron mayor espesor que las sintetizadas a 10 kV. El diámetro mayor de las fibras y su distribución al ser recolectadas influye en que el conjunto de estas, presente menor cantidad de intersticios, con lo cual la gota de agua destilada queda suspendida sobre las mismas.

³³ Quiored. *Propiedades y constantes físicas*. <https://www.ugr.es/~quiorred/lab/ctes/ctes.htm>. Consulta: 06 de junio de 2019.

³⁴ UYAR, Tamer y BESENBACHER, Flemming. *Electrospinning of uniform polystyrene fibers: the effect of solvent conductivity*. p. 1.

Asimismo, para cualquier concentración empleada, a 15 kV el ángulo de contacto es superior a los 90°, por lo cual, “las fibras son hidrófobas pues generan ángulos de contacto superiores al ángulo recto”³⁵, y para los voltajes de 5 kV y 10 kV únicamente son hidrófobas al sintetizarlas con una concentración de 15 %.

En la figura 8 se presenta el comportamiento del ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno a diferentes voltajes, empleando dimetilformamida como disolvente. Se observa que el ángulo de contacto es mayor aplicando un voltaje de 10 kV al emplear cualquier concentración y tiene un valor máximo en 25 % en peso de poliestireno; este es de 129,301°, por lo cual las fibras sintetizadas a estas condiciones son ultrahidrófobas. También, se observa que de manera general el ángulo de contacto a cualquier concentración y voltaje trabajados en el experimento es mayor a 90° al emplear dimetilformamida como solvente.

Esto puede deberse a la propiedad que le otorga a la solución de polímero de formar mayor cantidad de dipolos eléctricos debido a su elevada constante dieléctrica, que genera que estos dipolos sean atraídos a las cargas electrostáticas y rompan más fácilmente las fuerzas de cohesión; forma un mayor estiramiento coaxial y resulta en fibras más delgadas y más unidas, es decir, con intersticios de menor tamaño.

Además, podría otorgarles a las fibras resultantes ya recolectadas la propiedad de ser repelidas electrostáticamente por la gota de agua, debido a que esta tiene a su vez dipolos eléctricos y se polariza por la diferencia de electronegatividad entre sus átomos de hidrógeno y el átomo de oxígeno. Esto conllevaría a que las moléculas de agua repelan la superficie de las fibras, en

³⁵ FERNÁNDEZ, Agustín. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. p. 32.

lugar de penetrarlas, lo que ocasionaría una mayor estabilidad en la forma de la gota y un mayor ángulo de contacto.

En la figura 9 se presenta gráficamente el comportamiento del ángulo de contacto en función de la concentración de poliestireno a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente. Las fibras resultaron hidrófobas a una concentración de 30 % de poliestireno para los voltajes de 5 kV y 10 kV; y ultrahidrófobas a esa misma concentración para un voltaje aplicado de 15 kV. Por el contrario, resultaron hidrófilas a 40 % de poliestireno para voltajes de 5 kV y 10 kV. Se observa que el ángulo de contacto disminuye en función de la concentración y aumenta en función del voltaje al emplear tolueno como solvente.

Con base en lo analizado anteriormente se infiere que el comportamiento del ángulo de contacto es afectado de forma irregular por el tipo de solvente empleado, debido a que las tres gráficas presentaron comportamientos diferentes. De manera general, se observa que los valores de ángulo de contacto son superiores al emplear dimetilformamida como solvente en comparación a los medidos al utilizar cloroformo y tolueno, por lo cual, de los tres solventes seleccionados la dimetilformamida es el que les otorga mayor carácter hidrofóbico a las fibras sintetizadas.

Con base en el análisis estadístico se puede afirmar que de manera global las fibras resultantes para los tres solventes son hidrófobas, pues con un nivel de confianza de 95 % se comprobó que el ángulo de contacto es mayor o igual a 90°. Asimismo, mediante el análisis de varianza se demostró que la magnitud del ángulo de contacto es afectada directamente por la variación de la concentración y/o del voltaje aplicado, lo cual indica que el ángulo es dependiente y sujeto a los cambios en la concentración o el voltaje.

En la figura 10 se presenta gráficamente el comportamiento del porcentaje de transmitancia de las fibras, a una longitud de onda de 350 nm, en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando cloroformo como disolvente.

Para los voltajes de 5 kV y 10 kV el porcentaje de transmitancia incrementa en función del porcentaje en peso, así como también en función del voltaje. Esto puede deberse a que al aumentar el voltaje el espesor de las fibras es menor, generando mayores intersticios entre las moléculas, permitiendo el paso de los rayos ultravioleta.

Por el contrario, para el voltaje de 15 kV se presenta un comportamiento polinómico en el cual se obtiene un mínimo al emplear una concentración de poliestireno de 20 %, este valor es 3,95 %. Cuanto menor sea el porcentaje de transmitancia, son de mayor utilidad las fibras, pues indica una protección frente a los rayos ultravioleta. Por lo cual las fibras de mayor interés corresponderían a aquellas sintetizadas a 15 %, 5 kV y a 20 %, 15 kV.

En la figura 11 se presenta el comportamiento del porcentaje de transmitancia de las fibras, a una longitud de onda de 350 nm, en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, que emplea dimetilformamida como disolvente.

El porcentaje de transmitancia presenta un comportamiento polinómico para 5 kV y 10 kV; presenta a 25 % en peso de poliestireno sus valores máximos, estos son 0,33 % y 1,85 % respectivamente. Para el voltaje de 15 kV el porcentaje de transmitancia presenta un incremento súbito con el incremento de la concentración; su valor máximo es 17,90 % a 30 % en peso de

poliestireno. También, se observa un incremento del porcentaje de transmitancia en función del voltaje.

En la figura 12 se presenta el comportamiento del porcentaje de transmitancia de las fibras en función de la concentración de poliestireno, a diferentes voltajes, empleando tolueno como disolvente. El porcentaje de transmitancia disminuye en función de la concentración de poliestireno e incrementa en función del voltaje.

Nuevamente como ocurrió con el ángulo de contacto, los tres disolventes generaron un comportamiento diferente en el porcentaje de transmitancia, con lo cual no se puede establecer una tendencia fija dependiendo del tipo de solvente. Sin embargo, de manera general se observa que los porcentajes de transmitancia medidos al emplear dimetilformamida son menores a los de las fibras sintetizadas con cloroformo y tolueno.

Con base en el análisis estadístico, se comprobó con un nivel de confianza de 95 % que el porcentaje de transmitancia varía en función del cambio de concentración y en función del cambio de voltaje aplicado.

Finalmente, se realiza la observación que en el presente experimento se considera que las fibras de poliestireno más aptas y adecuadas para ser utilizadas en la industria, en especial en la textilera, son aquellas que presenten mayor hidrofobicidad y menor porcentaje de transmitancia de rayos ultravioleta, las cuales resultaron al emplear dimetilformamida como solvente, una concentración de 25 % de poliestireno en peso y un voltaje aplicado de 10 kV, obteniendo un ángulo de contacto de $129,301^\circ$. Esto puede compararse con otro experimento realizado previamente por diferentes investigadores, en el cual se expone que “el máximo ángulo de contacto obtenido fue de 148° a partir de la

mezcla de poliestireno-dimetilformamida a una concentración de 40 % w/v de poliestireno y aplicando un voltaje de 15 kV.”³⁶ La diferencia puede deberse a la conductividad de la solución, la cual depende del grado del solvente y de la naturaleza de la materia prima utilizada.

³⁶ HUAN, Siqu; LIU, Guoxiang; HAN, Guangping y CHENG, Wanli. *Effect of experimental parameters on morphological, mechanical and hydrophobic properties of electrospun polystyrene fibers*. p. 1.

CONCLUSIONES

1. Según un estudio de mercado el costo del equipo de electrohilado convencional es de Q 18 000,00, aproximadamente; sin embargo, el equipo diseñado que ha sido empleado en la presente investigación representó un costo de Q 4 200,00, con lo cual se obtuvo un ahorro monetario de 76,67 % en la producción de fibras.
2. El poliestireno es un polímero propicio para la síntesis de fibras mediante la técnica de electrohilado, debido a su carácter dieléctrico y su afinidad con diferentes solventes dieléctricos.
3. El ángulo de contacto de las fibras de poliestireno presentó un valor mínimo a 20 % de poliestireno en peso para los tres voltajes aplicados al emplear cloroformo como solvente; al emplear dimetilformamida el ángulo de contacto presentó un valor máximo de 129,301° a 25 % PS en peso y 10 kV; y al emplear tolueno el ángulo de contacto disminuyó en función de la concentración para los tres voltajes aplicados.
4. El porcentaje de transmitancia de las fibras de poliestireno incrementó en función de la concentración de poliestireno a 5 kV y 10 kV al emplear cloroformo como disolvente. Al utilizar dimetilformamida el porcentaje de transmitancia presentó un valor máximo a 25 % PS en peso para los voltajes de 5 kV y 10 kV, siendo estos 0,33 % y 1,85 % respectivamente. Al emplear tolueno el porcentaje de transmitancia disminuyó respecto a la concentración de poliestireno para los tres voltajes.

5. Las fibras sintetizadas empleando dimetilformamida como disolvente presentaron ángulos de contacto superiores a los presentados por las fibras sintetizadas con cloroformo y tolueno.
6. Las fibras sintetizadas empleando dimetilformamida como disolvente presentaron porcentajes de transmitancia inferiores a los presentados por las fibras sintetizadas con cloroformo y tolueno, con excepción del porcentaje de transmitancia de 17,90 % a 30 % PS en peso y 15 kV.
7. Se determinó que el ángulo de contacto de las fibras sintetizadas es menor a un voltaje de 10 kV al emplear cloroformo, es mayor a 10 kV al emplear dimetilformamida, e incrementa en función del voltaje al emplear tolueno a cualquier concentración de poliestireno.
8. El porcentaje de transmitancia de las fibras incrementó en función del voltaje para cada concentración de poliestireno y disolvente empleados.
9. La variación de la concentración de polímero y de voltaje aplicado en la síntesis de fibras de poliestireno incidió de manera significativa en la hidrofobicidad y transmitancia de rayos ultravioleta de las fibras sintetizadas, con un nivel de confianza de 95 %.
10. Las fibras de poliestireno sintetizadas presentaron carácter hidrofóbico, con un nivel de confianza de 95 %.

RECOMENDACIONES

1. Analizar las fibras sintetizadas por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM) para determinar el diámetro de las fibras y la variación en su morfología al modificar las condiciones de fabricación y conocer si se formaron las nanofibras.
2. Combinar las fibras de poliestireno con nanofibras o nanopartículas de otras sustancias, como carbono, para mejorar sus propiedades.
3. Evaluar diferentes métodos de producción de fibras de poliestireno, como la técnica de *forcespinning*.
4. Emplear las fibras sintetizadas en diferentes aplicaciones como elaboración de membranas para ósmosis o filtración.
5. Ejecutar la técnica de electrohilado en un ambiente con ventilación adecuada, utilizando el debido equipo de protección personal para evitar la exposición a los gases emitidos por los diferentes solventes pues estos son perjudiciales para la salud.
6. Almacenar los solventes orgánicos en recipientes color ámbar para evitar su exposición a la luz, pues esta exposición conlleva a la degradación química y consecuente pérdida de las propiedades dieléctricas de los solventes.

7. Emplear diferentes solventes a los utilizados en la presente investigación para ampliar el análisis del comportamiento de las propiedades de las fibras sintetizadas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Alma Labs. *Reflectancia*. 2017. [en línea]. <<http://almalaboratorios.com/reflectancia/>>. [Consulta: 03 de julio de 2019].
2. ALONSO FELIPE, José Vicente. *Manual de control de calidad en productos textiles y afines*. Madrid, España: Escuela Politécnica de Madrid. 2015. 287 p.
3. ASRAN, Ahmed; SEYDEWITZ, Volker y MICHLER, Goerg. *Micromechanical properties and ductile behavior of electrospun polystyrene nanofibers*. Vol. 125. EE. UU: Wiley Periodicals, Inc., DOI: 10.1002/app.34847. 2012. 11 p.
4. BILURBINA, Luis y LIESA, Francisco. *Materiales no metálicos resistentes a la corrosión*. España: Marcombo Boixareu Editores. 1990. 153 p.
5. BioRom. *Interacciones hidrofóbicas*. [en línea]. <<http://www.biorom.uma.es/contenido/JCorzo/temascompletos/InteraccionesNC/agua/hidrofobicos.htm>>. [Consulta: 06 de julio de 2019].
6. CARACCIOLO, Pablo; CORTEZ, Pablo y BUFFA, Fabian. *Pequeñas fibras, grandes aplicaciones*. Research Gate. Vol. 20, no. 121. 2011. 8 p.

7. Construmática. *Poliestireno extruido*. [en línea]. <https://www.construmatica.com/construpedia/Poliestireno_Extruido>. [Consulta: 10 de abril de 2017].
8. DEITZEL, Joseph; KLEINMEYER, James; HARRIS, Douglas y BECK, Nora. *The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles*. Polymer. Países Bajos: Elsevier, no. 42, DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00250-0. 2000. 12 p.
9. DUQUE, Lina; RODRÍGUEZ, Leonardo y LÓPEZ, Marcos. *Electrospinning: la era de las nanofibras*. Revista Iberoamericana de Polímeros. Vol. 14(1), España. 2013. 18 p.
10. ESPINOZA, Carlos. *Preparación y caracterización de nanofibras antimicrobianas compuestas de copolímeros asociativos-nanopartículas de plata y PVA, por el proceso de electrohilado*. Trabajo de graduación de Maestría en Tecnología de Polímeros. Centro de Investigación en Química Aplicada. 2008. 179 p.
11. FENG, Lin; LI, Shuhong; LI, Yingshun y LI, Huanjun. *Super-hydrophobic surfaces: From natural to artificial*. Advanced Materials. 14, no. 24, DOI: 10.1002/adma.200290020. 2002. 4 p.
12. FERNÁNDEZ, Agustín. *Estudio de la hidrofobicidad y autolimpieza en materiales con nanotratamientos superficiales*. Proyecto final de la carrera de Ingeniería de Materiales. Universidad Autónoma de Barcelona. 2013. 73 p.

13. FERREIRA, Antonio; MARQUES, Aline; RIBEIRO, Glenda y MUNHOZ, Viviane. *A nano-modified superhydrophobic membrane*. Materials Research. 16(3), DOI 10.1590/S1516-14392013005000028. 2013. 5 p.
14. GALLIK, Stephen. *Transmittance and absorbance*. 2011. [en línea]. <<http://cellbiologyolm.stevegallik.org/node/7>>. [Consulta: 05 de julio de 2019].
15. GRASSO, Florencia. *Flexibilidad de los materiales*. 2014. [en línea]. <<https://florenciagrassoimd2014.wordpress.com/2014/09/01/flexibilidad-de-los-materiales/>>. [Consulta: 05 de julio de 2019].
16. HASHEMI, Razieh; BORHANI, Sedigheh; ABDOLKARIM, Seyed y AKBAR, Ali. *The Influence of Solvent Type and Polymer Concentration on the Physical Properties of Solid State Polymerized PA66 Nanofiber Yarn*. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 000. EE. UU: Wiley Periodicals, Inc., DOI: 10.1002/app.36871. 2012. 9 p.
17. HUAN, Siqi; LIU, Guoxiang; HAN, Guangping y CHENG, Wanli. *Effect of experimental parameters on morphological, mechanical and hydrophobic properties of electrospun polystyrene fibers*. Materials, no. 8, ISSN: 1996-1944. 2015. 17 p.
18. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente - IARNA. *Perfil ambiental de Guatemala*. 2006. [en línea]. <<https://www.url.edu.gt/publicacionesurl/FileCS.ashx?Id=41022>>. [Consulta: 04 de abril de 2017].

19. LOOS, Cornelia; SYROVETS, Tatiana; MUSYANOVYCH, Anna y MAILÄNDER, Volker. *Functionalized polystyrene nanoparticles as a platform for studying bio–nano interactions*. Beilstein Journal of Nanotechnology. Alemania, no. 5, DOI: 10.3762/bjnano.5.250. 2014. 10 p.
20. MADANI, Mohammad; SHARIFI-SANJANI, Naser; HASAN-KAVIAR, Ahmad y CHOGHAZARDI, Mossayeb. *PS/TiO₂ (Polystyrene/Titanium Dioxide) composite nanofibers with higher surface-to-volume ratio prepared by electrospinning: morphology and thermal properties*. Polymer Engineering and Science. EE. UU., DOI: 10.1002/pen.23493. 2013. 5 p.
21. MENÉNDEZ VELÁZQUEZ, Amador. *Historia del futuro, tecnologías que cambiarán nuestras vidas*. Madrid, España: Ediciones Nobel. 2017. 273 p.
22. Motorgiga. *Resistencia a la tracción – definición – significado*. [en línea]. <<https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/resistencia-a-la-traccion-definicion-significado/gmx-niv15-con195386.htm>>. [Consulta: 08 de julio de 2019].
23. Nexant. *PERP Program – polystyrene new report alert*. Nexant Chem Systems, no. 4. 2006. 11 p.
24. Prontubeam. *Propiedades mecánicas de los materiales*. [en línea]. <http://www.prontubeam.com/articulos/12_2015_PROP_MAT/12_2015_PROP_MAT_articulo.pdf>. [Consulta: 07 de julio de 2019].

25. QuimiNet. *Todo sobre el poliestireno*. 2005. [en línea]. <<https://www.quiminet.com/articulos/todo-sobre-el-poliestireno-3337.htm>>. [Consulta: 05 de abril de 2017].
26. QuimiNet. *Historia del poliestireno*. 2012. [en línea]. <<https://www.quiminet.com/articulos/historia-del-poliestireno-2681667.htm>>. [Consulta: 05 de abril de 2017].
27. QuimiNet. *Métodos de transformación del poliestireno*. 2012. [en línea]. <<https://www.quiminet.com/articulos/metodos-de-transformacion-del-poliestireno-2681623.htm>>. [Consulta: 05 de abril de 2017].
28. Quiored. *Propiedades y constantes físicas*. [en línea]. <<https://www.ugr.es/~quiorred/lab/ctes/ctes.htm>>. [Consulta: 06 de junio de 2019].
29. RAJAK, Abdul; AHMAD, Dian; ISKANDAR, Ferry; MIFTAHUL, Muhammad y KHAIRURRIJAL, Khairurrijal. *Controlled morphology of electrospun nanofibers from waste expanded polystyrene for aerosol filtration*. Nanotechnology. IOP Science, DOI: 10.1088/1361-6528/ab2e3b. 2019. 16 p.
30. RAMAKRISHNA, Seeram; FUJIHARA, Kazutoshi; TEO, Wee-Eong; LEEM, Teik-Cheng y MA, Zuwei. *An introduction to electrospinning and nanofibers*. Singapur: National University of Singapore. 2005. 383 p.
31. ROLDÁN, Sebastián; VARGAS, Carlos; MEJÍA, Mónica; ZAPATA, Jenniffer y MONCADA, María. *Ingeniería de tejidos y aplicaciones*.

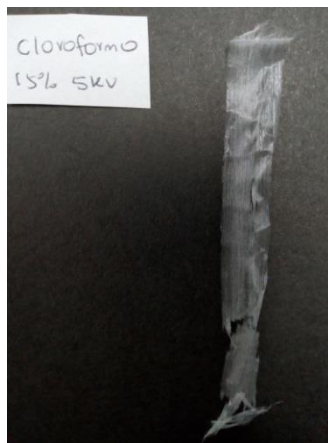
Medellín, Colombia: Instituto Tecnológico Metropolitano. 2016. 376 p.

32. ROSDI, Nurul; MOHD KANAFI, Nafeesa y ABDUL RAHMAN, Norizah. *Preparation and thermal properties of cellulose acetate/polystyrene blend nanofibers via electrospinning technique*. *Pertanika Journals*, ISSN: 0128-7680. 2018. 12 p.
33. SOLÍS JARA, M. E.; LISPERGUER MUÑOZ, J. H. y ARENCIBIA SILVA, L. F. *Compuestos mixtos poliestireno y pino radiata*. *Revista Cubana de Química*. Vol. XVII. Cuba: Universidad de Oriente, no. 3, ISSN: 0258-5995. 2005. 5 p.
34. STOJANOVSKA, Elena; CANBAY, Emine; SERIFE PAMPAL, Esra y CALISIR, Mehmet. *A review on non-electro nanofibre spinning techniques*. *RSC Advances*. Royal Society of Chemistry, DOI: 10.1039/C6RA16986D. 2016. 34 p.
35. SURESH, Palaniswamy; JAYARAMAN, Sundaramurthy y SINGH, Gurdev. *Polymer and composite nanofibers: electrospinning parameters and rheology properties*. *Rheology and Processing of Polymer Nanocomposites*. Primera edición. Sabu Thomas, Rene Muller y Jiji Abraham, DOI: 10.1002/9781118969809.ch9. 2016. 26 p.
36. TORFIFARD, Jafar; NORIAN, Erfan; AHMADI, Ramin; ISMAIL, Razali y TAGHI, Mohamad. *Polymer concentration effect on nanofiber growth using pulsed electrospinning*. *Polymer Sciences*. Vol. 4, no. 2:14, DOI: 10.4172/2471-9935.100041. 2018. 7 p.

37. UYAR, Tamer y BESENBACHER, Flemming. *Electrospinning of uniform polystyrene fibers: the effect of solvent conductivity*. Polymer. Elsevier, no. 49, DOI: 10.1016/j.polymer.2008.09.025. 2008. 8 p.
38. WONG, Y.; YUEN, C.; LEUNG, M.; KU, S. y LAM, H. *Selected applications of nanotechnology in textiles*. AUTEX Research Journal. Vol. 6, no. 1. 2006. 8 p.
39. WALLACE, Gordon; DE ROSSI, Danilo; WU, Yanzhe; LAU, King-Tong y COYLE, Shirley. *Smart nanotextiles: a review of materials and applications*. University of Wollongong Research Online. Australia. 2007. 9 p.
40. ZHENG, Yuansheng; MENG, Na y XIN, Binjie. *Effects of jet path on electrospun polystyrene fibers*. Polymers, DOI: 10.3390/polym10080842. 2018. 12 p.

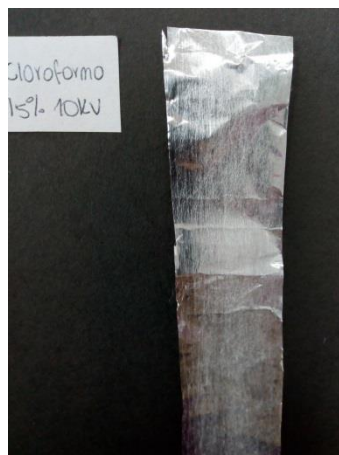
APÉNDICES

Apéndice 1. **Fibras elaboradas con cloroformo, 15 % PS en peso y 5 kV**



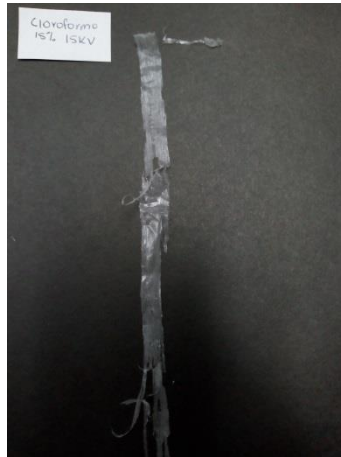
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. **Fibras elaboradas con cloroformo, 15 % PS en peso y 10 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Fibras elaboradas con cloroformo, 15 % PS en peso y 15 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Fibras elaboradas con cloroformo, 20 % PS en peso y 5 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. **Fibras elaboradas con cloroformo, 20 % PS en peso y 10 kV**



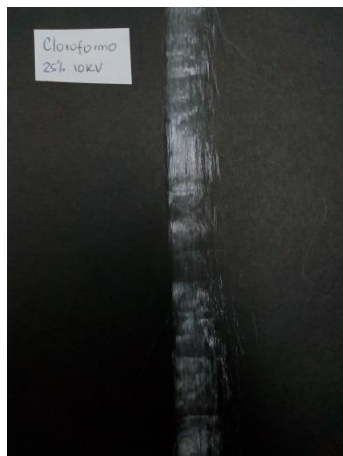
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 6. **Fibras elaboradas con cloroformo, 20 % PS en peso y 15 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7. **Fibras elaboradas con cloroformo, 25 % PS en peso y 10 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 8. **Fibras elaboradas con cloroformo, 25 % PS en peso y 15 kV**



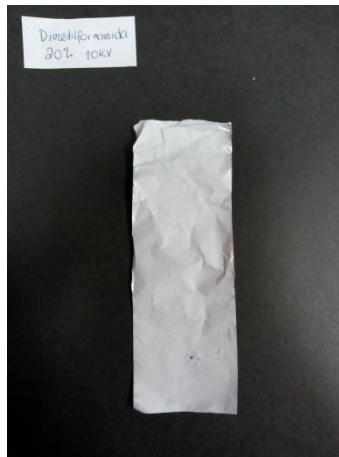
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 9. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 20 % PS en peso y 5 kV**



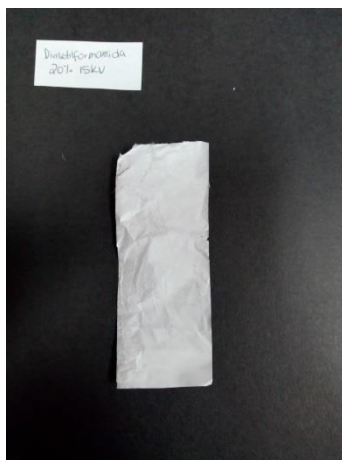
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 10. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 20 % PS en peso y 10 kV**



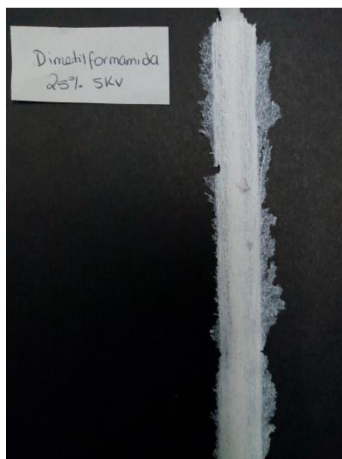
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 11. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 20 % PS en peso y 15 kV**



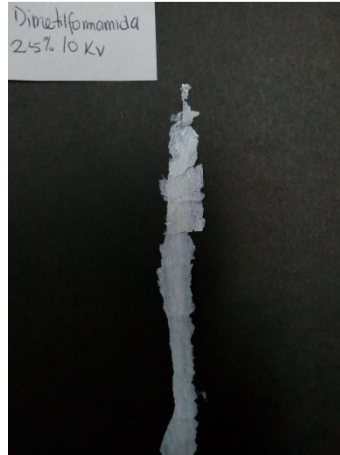
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 12. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 25 % PS en peso y 5 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 13. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 25 % PS en peso y 10 kV**



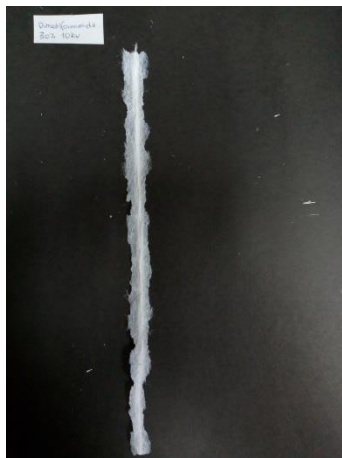
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 14. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 30 % PS en peso y 5 kV**



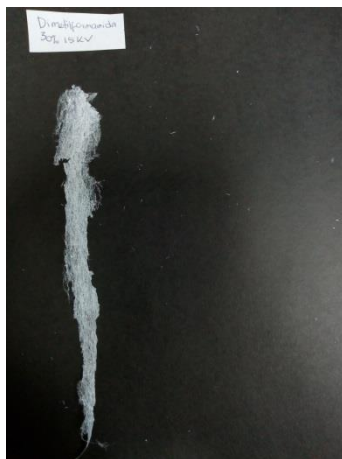
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 15. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 30 % PS en peso y 10 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 16. **Fibras elaboradas con dimetilformamida, 30 % PS en peso y 15 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 17. **Fibras elaboradas con tolueno, 30 % PS en peso y 5 kV**



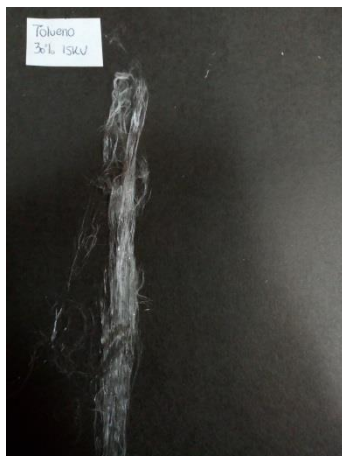
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 18. **Fibras elaboradas con tolueno, 30 % PS en peso y 10 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 19. **Fibras elaboradas con tolueno, 30 % PS en peso y 15 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 20. **Fibras elaboradas con tolueno, 40 % PS en peso y 5 kV**



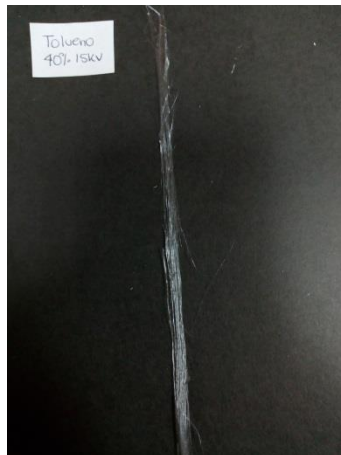
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 21. **Fibras elaboradas con tolueno, 40 % PS en peso y 10 kV**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 22. **Fibras elaboradas con tolueno, 40 % PS en peso y 15 kV**



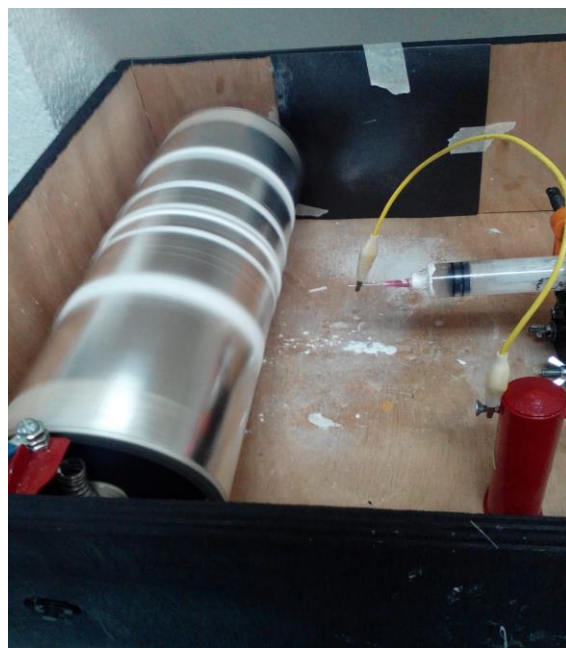
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 23. **Proceso de elaboración de fibras de poliestireno**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 24. **Recolección de fibras de poliestireno**



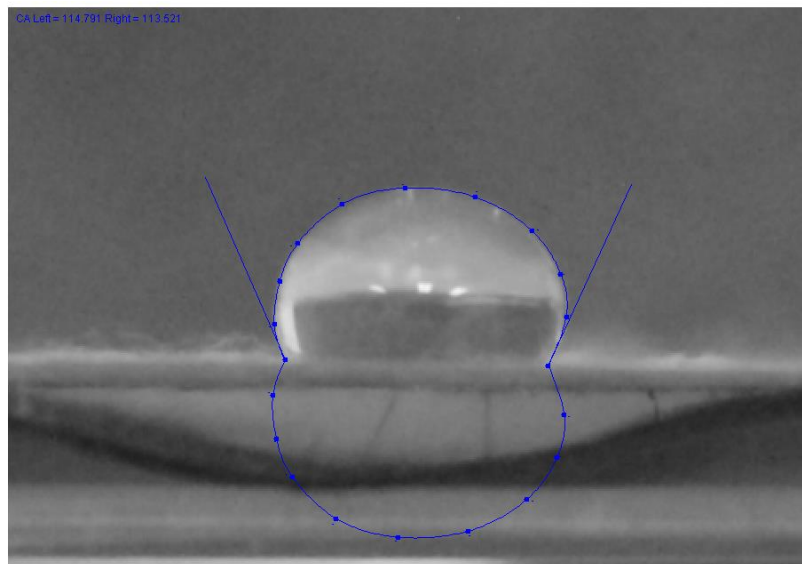
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 25. **Sesión fotográfica para la determinación del ángulo de contacto de las fibras sintetizadas**



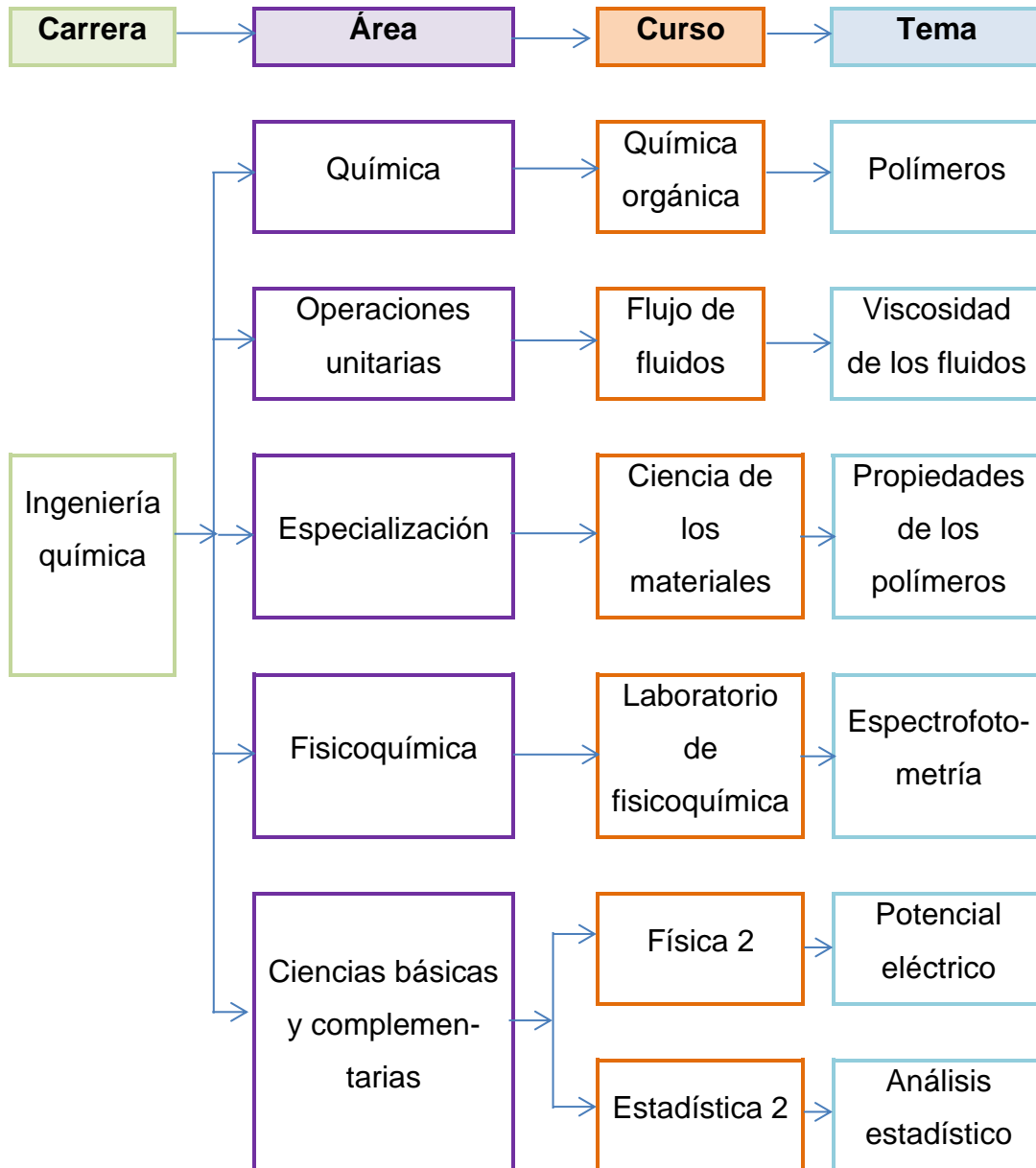
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 26. **Medición del ángulo de contacto**



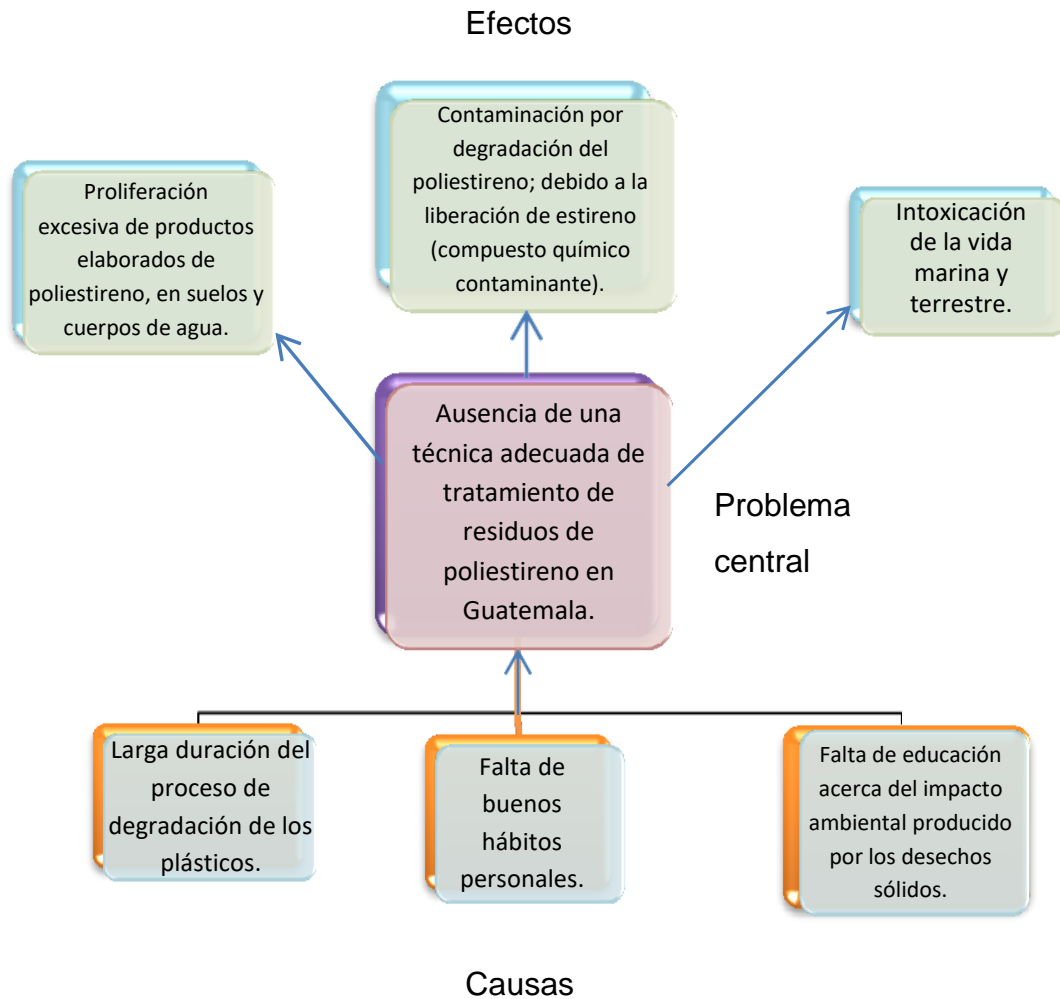
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 27. **Tabla de requisitos académicos**



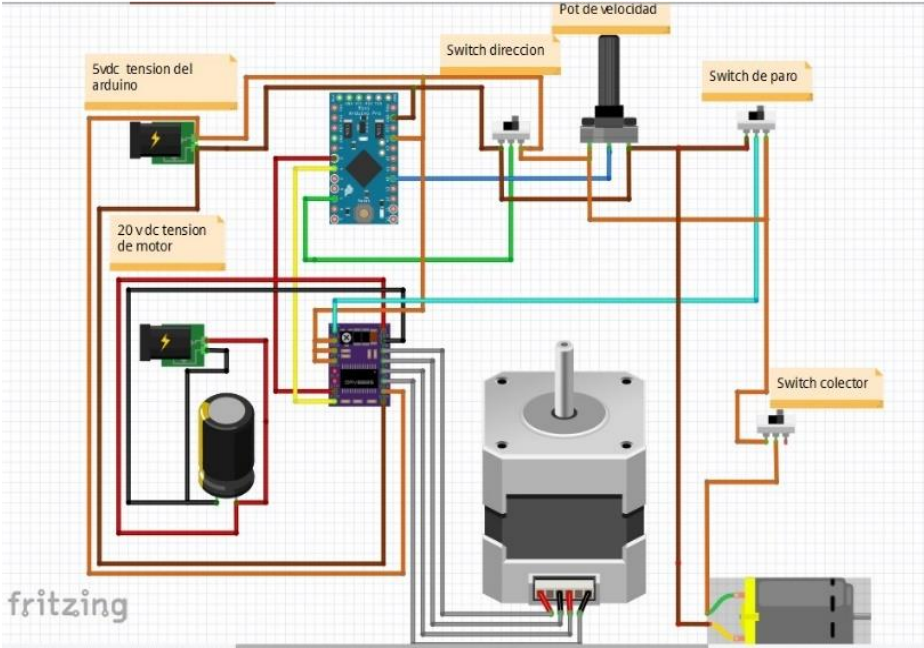
Fuente: elaboración propia.

Apéndice 28. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 29. Esquema del circuito eléctrico del equipo de electrohilado



Fuente: elaboración propia, empleando programa Fritzing.