



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el
tratamiento de aguas residuales*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Jorge Ruiz de Almirón Denia

DIRECTORES: Rosa Devesa Rey
Jesús del Val García

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el
tratamiento de aguas residuales*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El uso de microalgas para la eliminación de contaminantes en medios de tipo acuoso ha suscitado un interés cada vez mayor, no sólo en el ámbito científico también en su aplicación a escala industrial. Este interés se fundamenta principalmente en su elevado potencial para procesos de absorción, bioacumulación y biodegradación, que pueden realizar como material de origen natural y con capacidad de adaptación al entorno. En el presente trabajo se llevará a cabo un estudio y diseño de filtros biodegradables, que se doparán con distintas concentraciones de algas, con un enfoque específico en su aplicación para el tratamiento en aguas residuales y su posible aplicación en la eliminación eficiente de diversos contaminantes seleccionados.

Para ello, se desarrollarán diferentes tipos de filtros con una base de policaprolactona (PCL), durante su fabricación, variarán parámetros clave como el porcentaje de PCL, el voltaje aplicado, la concentración de microalgas y la velocidad de inyección de la disolución, mediante una bomba de jeringa. Esta tecnología no sólo representa una estrategia altamente sostenible y ambientalmente responsable para la eliminación de contaminantes en aguas, sino que también permite evaluar detalladamente sus propiedades físicas fundamentales que posibiliten, en un futuro, su aplicación mediante técnicas de fabricación a mayor escala.

PALABRAS CLAVE

Electrohilado, biodegradable, PCL, microalgas

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría agradecerles a mis tutores, el Dr. del Val y la Dra. Devesa por haber estado en todo momento y mostrar interés y dedicación en el desarrollo del trabajo. Han sido de gran apoyo y gracias a ellos he podido dar lo mejor de mí.

También quiero agradecer a mis padres, Antonio y Mari, que desde que entré en la escuela han sido un apoyo incondicional y han estado siempre ahí transmitiéndome fuerzas para hacer frente a los obstáculos que se me han presentado durante el camino.

A mi hermano Antonio por ser un referente para mí y por ser tan buena persona conmigo. A Valentina, por aguantarme siempre y su constante amor desde la distancia.

Por último, a mi abuela Yaya, que desde que nos dejó todos sentimos su cariño desde arriba.

CONTENIDO

Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	7
1 Introducción y objetivos	8
1.1 Contexto y motivación	8
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura	9
2 Estado del arte	10
2.1 Contaminación del agua.....	10
2.1.1 Principales contaminantes del agua	11
2.1.2 Distintos métodos de tratamientos de aguas	12
2.1.3 Algas como agentes de biorremediación	13
2.1.4 Cultivo y manejo de algas para su aplicación.....	14
2.1.5 Algas naturales.....	14
2.2 Técnica de electrospinning.....	15
2.2.1 Antecedentes recientes.....	16
2.2.2 Aplicaciones de la tecnología	17
2.2.3 Avances e innovaciones.....	18
2.3 Diferentes sistemas de electrospinning en la actualidad	19
3 Materiales y métodos.....	21
3.1 Materiales.....	21
3.1.1 PCL	21
3.1.2 Acetona	22
3.1.3 Alga cultivada en laboratorio.....	23
3.1.4 Alga comercial.....	23
3.2 Métodos de fabricación	23
3.2.1 Sistema de electrohilado para la fabricación de fibra	23
3.2.2 Fuente de alta tensión Genvolt 73030	24
3.2.3 Jeringa de infusión	25
3.2.4 Tubos flexibles de poliamida.....	25
3.2.5 Cámara de procesamiento.....	26
3.2.6 Bomba de jeringa KDS LEGATO 100	26
3.2.7 Electrodo.....	27
3.2.8 Termohigrómetro	27

3.2.9 Contraelectrodo.....	27
3.2.10 Lanza de descarga.....	28
3.2.11 Plataforma de elevación.....	28
3.2.12 Sistema de iluminación LED	29
3.3 Métodos.....	29
3.3.1 Metodología para la fabricación de fibras	29
3.3.2 Metodología para la fabricación de filtros con algas comerciales.....	31
3.3.3 Diseño Box-Behnken.....	32
3.3.4 Cultivo de algas en el laboratorio	35
3.3.5 Fitoplancton vivo 250 mL	36
3.3.6 Matraz de 2L.....	37
3.3.7 Aireador EHEIM air200	37
3.3.8 Temporizador.....	37
3.3.9 Luz LED	37
3.3.10 Metodología para la fabricación de filtros con algas cultivadas en laboratorio.	37
3.4 Métodos de caracterización de muestras.....	38
3.4.1 Caracterización morfológica de las muestras	38
3.4.2 Ensayos de adsorción de las membranas con disoluciones contaminadas	39
3.4.3 Medición del fosfato, nitrato y cobre en soluciones líquidas	39
3.4.4 Evaluación de las propiedades hidrofóbicas.....	41
3.4.5 Caracterización química de las fibras	41
4 Resultados	43
4.1 Análisis de los ensayos	43
4.1.1 Ensayos de filtros.....	43
4.1.2 Influencia de la cantidad de PCL.....	45
4.1.3 Efecto de la velocidad de inyección de la bomba en el proceso.....	46
4.1.4 Impacto del voltaje aplicado	47
4.1.5 Condiciones óptimas preliminares.....	48
4.1.6 Resultados globales ensayos PCL	48
4.2 Evaluación de parámetros de ensayo y su influencia en propiedades.....	48
4.3 Diseño experimental con algas comerciales	49
4.3.1 Efecto de las fibras en la eliminación de fosfato (1 hora)	50
4.3.2 Efecto de las fibras en la eliminación de fosfato (6 horas).....	52
4.3.3 Efecto de las fibras en la eliminación de nitratos (6 horas).....	55
4.3.4 Efecto de las fibras en la eliminación de cobre (6 horas).....	57
4.4 Caracterización química de las muestras	59

4.5 Propiedades hidrofóbicas	60
4.6 Diseño experimental con algas cultivadas en el laboratorio	61
4.6.1 Comparación de resultados con alga espirulina.....	62
4.7 Rediseño del sistema colector para el proceso de electrohilado	63
5 Conclusiones y líneas futuras	65
5.1 Conclusiones	65
5.2 Líneas futuras	66
6 Bibliografía.....	69
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	75
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	76
Anexo III: KIT LED ICA	77
Anexo IV: MÁQUINA KDS LEGATO 100.....	78
Anexo V: AIREADOR EHEIM AIR200	79
Anexo VI: Fuente de alimentación serie 7000	80
Anexo VII: PLANOS	81
Anexo VIII: PRESUPUESTO.....	85
Anexo IX: PLIEGO DE CONDICIONES	86
6.1 Requisitos del montaje	86
6.2 Condiciones de funcionamiento.....	86
6.3 Recomendaciones de mantenimiento.....	86
6.4 Metodología de fabricación	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Consumo de agua dulce por sector	11
Figura 2-2 Eutrofización del mar menor[17]	12
Figura 2-3 Esquema planta de tratamiento aguas residuales [20]	13
Figura 2-4 Factores de influencia para el proceso de biorremediación.....	14
Figura 2-5 Granja de algas tropicales [32]	15
Figura 2-6 Esquema proceso de electrospinning [40]	16
Figura 2-7 Número de patentes electrospinning [45]	17
Figura 2-8 Mascarilla quirúrgica [47]	18
Figura 2-9 Aplicaciones nanofibras.....	19
Figura 3-1 Polimerización de e-caprolactona a policaprolactona [56].....	21
Figura 3-2 PCL en pellets.....	22
Figura 3-3 Acetona	22
Figura 3-4 Cápsulas de Espirulina.....	23
Figura 3-5 Visión general del sistema de electrohilado	24
Figura 3-6 Fuente generadora de alta tensión.....	25
Figura 3-7 Jeringa de 20 mL [59].....	25
Figura 3-8 Cámara de procesamiento.....	26
Figura 3-9 Bomba KDS LEGATO 100.....	26
Figura 3-10 Aguja electrodo con conexión a tubo flexible de poliamida	27
Figura 3-11 Termohigrómetro	27
Figura 3-12 Lanza de descarga.....	28
Figura 3-13 Sistema de posicionamiento vertical	28
Figura 3-14 Luces LED	29
Figura 3-15 Mezcla PCL y acetona 50 gramos	30
Figura 3-16 Papel de aluminio durante ensayo en la cámara	31
Figura 3-17 Papel de aluminio con malla de filtro	31
Figura 3-18 Alga en mezcla inicial	32
Figura 3-19 Espirulina junto PCL	32
Figura 3-20 Filtro con algas	33
Figura 3-21 Sistema natural de fabricación de algas(derecha) Frascos de nutrientes(izquierda)	35
Figura 3-22 Algas naturales filtradas	36
Figura 3-23 Frasco de fitoplacton vivo 250 mL	36
Figura 3-24 Aireador EHEIM air200	37
Figura 3-25 25 gramos de disolución con alga cultivada	38

Figura 3-26 Filtro postratamiento algas	38
Figura 3-27 Microscopio Dino-lite High Magnification	39
Figura 3-28 Filtro pretratamiento	40
Figura 3-29 Muestras con 1 hora de agitación	40
Figura 3-30 Fotómetro multiparámetro	41
Figura 3-31 Goniómetro Ossila	41
Figura 3-32 Sistema de caracterización FTIR. Cortesía Laseron (Uvigo)	42
Figura 4-1 Ensayo con 14000 PCL, 5%wt(izquierda) Ensayo con 80000 PCL, 5%wt (derecha) ...	45
Figura 4-2 Influencia de la cantidad de % wt PCL, de izquierda a derecha (5% wt PCL,10%wt PCL,15% wt PCL,20% wt PCL).....	45
Figura 4-3 2 ml/h (izquierda) 4 ml/h(Derecha)	46
Figura 4-4 Evolución de la morfología de las fibras en función del voltaje aplicado (de izquierda a derecha;5kV,10kV,15kV y 20kV)	47
Figura 4-5 Taponamiento del fluido en electrodo	47
Figura 4-6 Ensayo PCL 80000, 25 kV	48
Figura 4-7 Resultados valores observados vs valores predichos (fosfato 1 hora).....	50
Figura 4-8 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 1 hora, variable el voltaje	51
Figura 4-9 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 1 hora, variable el PCL	51
Figura 4-10 Resultados observados vs resultados predichos (fosfato 6 horas).....	53
Figura 4-11 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 6 horas, variable el voltaje	53
Figura 4-12 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 6 horas, variable el alga	54
Figura 4-13 Resultados observados vs resultados predichos (nitrato 6 horas).....	55
Figura 4-14 Superficie de contorno para la eliminación de nitrato en 6 horas, variable el PCL	56
Figura 4-15 Superficie de contorno para la eliminación de nitrato en 6 horas, variable el alga	56
Figura 4-16 Resultados observados vs resultados predichos (cobre 6 horas)	57
Figura 4-17 Superficie de contorno para la eliminación de cobre en 6 horas, variable el PCL	58
Figura 4-18 Espectro FTIR de muestra de PCL al 15% en peso con los picos principales	59
Figura 4-19 Comparativa de los espectros FTIR de las muestras de PCL al 5%wt, 10%wt y 15%wt	59
Figura 4-20 Espectro FTIR muestras de PCL con dopaje al 2% en peso de alga	60
Figura 4-21 Ensayo de la gota sobre PCL sin dopar, de izquierda a derecha al 10 % wt, 15 %wt y 20 %wt) sin dopar	60
Figura 4-22 Ensayo de la gota con fibras de PCL dopadas con algas (izquierda) y sin dopar (derecha)	61
Figura 4-23 Vista general	63
Figura 4-24 Colector	64
Figura A0-1 KIT LET ICA [70].....	77

Figura A0-2 KDS LEGATO 100 78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Configuraciones electrohilado	20
Tabla 3-1 Tabla de variables dependientes e independientes y rangos analizados	34
Tabla 4-1 Configuraciones ensayos	43
Tabla 4-2 Ensayos experimentales	45
Tabla 4-3 Parámetros de ensayo.....	49
Tabla 4-4 Ensayos realizados mediante el procedimiento Box-Behnken	50
Tabla 4-5 Diagrama de Pareto de efecto estandarizado	52
Tabla 4-6 Diagrama de Pareto de efecto estandarizado	55
Tabla 4-7 Diagrama de Pareto estandarizado	57
Tabla 4-8 Resultados medición del alga cultivada en laboratorio tras 6 horas de agitación.....	62

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Contexto y motivación

El crecimiento exponencial de la actividad industrial en estas últimas décadas ha supuesto un aumento significativo en la generación de efluentes con altas concentraciones de contaminantes como aguas residuales ricas en nitrógeno, fósforo, metales pesados, compuestos orgánicos o coloreados, entre otros. La descarga incontrolada de compuestos, sin recibir el tratamiento adecuado, puede desencadenar fenómenos de eutrofización, afectando gravemente la biodiversidad y la calidad del agua.

Actualmente, las técnicas más habituales, como por ejemplo, la filtración y uso de reactivos químicos [1] son los que obtienen mejores resultados pero también presentan una serie de limitaciones que les resta eficacia, tales como la obturación de los filtros o la toxicidad de los reactivos empleados. En este trabajo, las microalgas, han surgido como una posible alternativa innovadora y sostenible para abordar desafíos relacionados con las aguas residuales y sus postratamientos, con la ventaja de ofrecer un tratamiento de baja toxicidad y con posibilidad de implementación in situ, lo que supone una gran ventaja frente a los métodos tradicionales.

En los últimos años se ha incrementado el interés en el uso de las algas para la eliminación de residuos ya que presentan una gran capacidad para la bioadsorción y bioasimilación de nutrientes, y además de su contribución a la fijación de dióxido de carbono [2]. Además, la biomasa algal generada puede valorizarse para la producción de biocombustibles y fertilizantes, contribuyendo a una mayor sostenibilidad del proceso.

Sin embargo, el uso de esta tecnología puede llevar consigo problemas en el rendimiento industrial, considerando factores que suponen un incremento significativo en los costes operacionales como: la tasa de sedimentación de microalgas, la optimización de los medios de cultivo y la influencia de las condiciones ambientales [3]. Estas dificultades muestran la necesidad de seguir investigando y desarrollando formas para maximizar el potencial de microalgas, con el fin de garantizar su viabilidad económica y la sostenibilidad a largo plazo.

1.2 Objetivos

El presente Trabajo Fin de Grado, tiene como objetivo el uso de la técnica de electrospinning (electrohilado) en combinación con métodos avanzados de remediación de aguas para desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles en el tratamiento de contaminantes específicos en aguas. Para ello, se plantean diferentes objetivos.

- Optimización de la técnica de electrohilado para la formación de fibras absorbentes: se analizarán los fundamentos y parámetros que influyen en la formación de las fibras, tales como la viscosidad de la disolución polimérica, el voltaje aplicado y la distancia entre la aguja y el colector. Se

buscará optimizar el proceso para obtener resultados con propiedades específicas, como alta porosidad, homogeneidad y control en el diámetro de las fibras.

- Evaluación del potencial de las microalgas en tratamientos para la eliminación de contaminantes en aguas: se estudiará la capacidad para eliminación de contaminantes en ensayos controlados de laboratorio. Este objetivo se centrará en la evaluación del rendimiento de estos cultivos en laboratorio y en sistemas acuáticos para la posterior aplicación y eliminación de determinados contaminantes en aguas.
- Exploración de la integración de esta tecnología en la industria a escala de laboratorio: se evaluará el dopaje de las fibras con algas comerciales y obtenidas en el laboratorio, evaluando el resultado obtenido mediante técnicas de diseño de respuesta.

1.3 Estructura

El presente trabajo, se ha organizado de manera que facilite una lectura fluida y comprensible, permitiendo al lector seguir una progresión lógica del contenido. La estructura del documento ha sido diseñada para garantizar una exposición clara de los objetivos a abordar, el desarrollo metodológico y las conclusiones obtenidas.

A continuación, el capítulo 2 aborda una revisión del actual estado del arte. En este apartado, se dará una visión general sobre la relevancia del tema abordado y la motivación para su desarrollo.

En el capítulo 3 se explica los métodos y materiales utilizados para la realización del presente TFG. Se explica los métodos de fabricación de filtros, los materiales empleados en las mezclas y las pruebas de caracterización realizadas en los laboratorios de investigación de mecánica y química del CUD-ENM.

Por último, se expondrán los resultados obtenidos, los cuáles serán analizados e interpretados de una forma crítica. Se proporcionará una comparación con estudios previos y la relevancia de los hallazgos en el contexto del problema planteado. Además, el trabajo contará con un apartado de conclusiones y líneas futuras, donde se propondrán posibles direcciones para futuras investigaciones en la fabricación y optimización de filtros biocompatibles y biodegradables para el tratamiento de aguas residuales.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Contaminación del agua

La contaminación del agua es un problema ambiental crítico y esencial en la vida, pero su calidad se ve amenazada por diversas fuentes de contaminación que impactan de modo negativo en la salud humana y ecosistemas acuáticos. Esta contaminación se origina por actividades en sectores agrícolas, industriales y domésticos que introducen sustancias tóxicas en mares y océanos. Entre los diferentes contaminantes se encuentran metales pesados, fertilizantes y residuos orgánicos, entre otros [4].

El crecimiento industrial ha incrementado significativamente la producción de desechos químicos, muchos de ellos acabando en cuerpos de agua sin ser tratados [5]. El impacto de vertidos industriales ha generado una disminución en la calidad del agua en múltiples regiones alrededor del mundo. Asimismo, la contaminación agrícola, derivada del uso de fertilizantes y pesticidas, contribuye a la proliferación de algas nocivas y a la eutrofización [6].

El agua es un recurso indispensable, pero su disponibilidad y calidad se ven alteradas por la actividad humana. Aunque el planeta está formado por un 70% agua, sólo el 2,5% es dulce y un porcentaje aún menor es para el consumo. Por lo tanto, la contaminación de fuentes superficiales y subterráneas representa un desafío tanto en contextos urbano como rurales [7].

Según un informe mundial de las Naciones Unidas [8], alrededor de 2000 millones de personas no tienen acceso a agua potable, mientras que el 46% carece de sistemas de saneamiento adecuados. A nivel mundial, el 69% del agua dulce se destina al sector agropecuario, el 19% a la industria y el 12% consumo doméstico. El cambio climático agrava la crisis hídrica a través de lluvias y sequías prolongadas. Las precipitaciones extremas pueden generar inundaciones y aumentar la concentración de contaminantes en el agua.

En cuanto a la calidad del agua, los sectores industriales, la agricultura y el desarrollo humano destacan como los principales responsables de su deterioro (Figura 2-1). La industria libera una gran cantidad de productos químicos, tóxicos y perjudiciales para el ser humano, haciéndola insegura. La agricultura es otro vector de contaminación por el uso de fertilizantes y pesticidas, que, al depositarse en tierras y zonas de cultivo acaban, por arrastre, en ríos, lagos y pantanos. Además, con el desarrollo de infraestructuras afectan la escorrentía de aguas pluviales que puede arrastrar desde aceite de motor hasta basura [9].

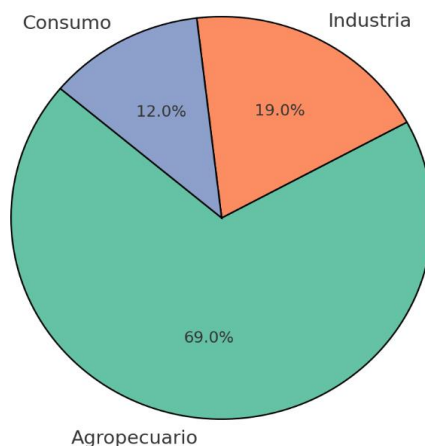


Figura 2-1 Consumo de agua dulce por sector

2.1.1 Principales contaminantes del agua

La contaminación del agua proviene de diversas fuentes y puede clasificarse en contaminación puntual y difusa [10]. La contaminación puntual se refiere a unas cargas en concreto y localizadas, como las aguas residuales provenientes de fábricas o plantas de tratamientos.

La contaminación difusa es un poco más difícil de controlar ya que involucra transporte y la transformación de desechos a través de diferentes métodos y medios (por ejemplo: deposición atmosférica, aplicación de un contaminante en el suelo y la transformación química en suelos, involucrando el aire, suelo y agua) [11].

Se pueden clasificar de diferentes maneras los contaminantes del agua:

- **Microorganismos patógenos:** incluyen diferentes tipos de bacterias, protozoos y virus que pueden transmitir cólera, tifus y hepatitis, entre otros. Estos microorganismos suelen llegar al agua a través de heces y residuos infectados. La Organización Mundial de la Salud (OMS) [12] recomienda que el agua potable no contenga bacterias coliformes por cada 100 ml de muestra[13].
- **Desechos orgánicos:** pueden contener bacterias aeróbicas que, en exceso, hace inviable la vida de los organismos que requieren oxígeno[14].
- **Sustancias químicas inorgánicas:** incluyen ácidos y metales tóxicos. Estos contaminantes pueden causar graves daños a los seres vivos y, aunque se suelen descomponer fácilmente, su presencia en grandes cantidades es perjudicial.
- **Nutrientes vegetales:** sustancias solubles que favorecen el desarrollo de las plantas. Sin embargo, en cantidades excesivas, podrían causar el crecimiento descontrolado de algas y, en consecuencia, la eutrofización del medio (Figura 2-2).
- **Compuestos orgánicos:** incluyen plásticos, plaguicidas y otros compuestos con estructuras moleculares complejas. Estos contaminantes son difíciles de eliminar y pueden persistir en el medioambiente. Se estima que entre 3 y 4 millones de toneladas de hidrocarburos se vierten al año y actualmente se cierran acuerdos internacionales para evacuar desechos en zonas restringidas de carga y descarga de petróleo [15].
- **Sedimentos y materiales en suspensión:** partículas depositadas en los suelos y otros materiales en suspensión son la mayor fuente de contaminación, creando un ambiente turbio que dificulta la vida acuática.

- Contaminación térmica: la vida de los organismos muchas veces se ve comprometida al disminuir la cantidad de oxígeno. La energía térmica liberada por las fábricas hacen que afecten de manera considerable en ríos, mares, embalses [16].



Figura 2-2 Eutrofización del mar menor[17]

2.1.2 Distintos métodos de tratamientos de aguas

A continuación, se presenta el método clásico de tratamiento del agua en las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR), tomando como base una estación completa que libera el agua lista para su consumo incluyendo, por lo tanto, la etapa de potabilización. El tiempo de procesamiento suele oscilar entre 1 y 2 días desde su llegada hasta su devolución al medioambiente.

En las estaciones depuradoras de aguas residuales (Figura 2-3) pasarán por tres fases principalmente:

- Pretratamiento: es la primera fase del proceso y tiene como objetivo principal eliminar los sólidos de mayor tamaño y materiales flotantes que podrían dañar u obstruir equipos en etapas posteriores. Una de las primeras operaciones son las rejillas donde retienen sólidos gruesos, como plásticos, trapos y otros desechos grandes. También destacan los desarenadores que son dispositivos que eliminan partículas minerales pesadas, como arena y grava, y que podrían causar abrasiones en equipos mecánicos. Por último, otro proceso fundamental son los desengrasadores, que se encargan de eliminar grasas y aceites que flotan en la superficie del agua. Estos compuestos pueden formar capas que dificultan la transferencia de oxígeno.
- Tratamiento primario: tiene como objetivo reducir sólidos en suspensión sedimentables. Esta etapa puede eliminar aproximadamente el 50-70% de sólidos suspendidos y un 25-40% de la DBO presente inicialmente en las aguas residuales [18]. En esta etapa, el agua residual se introduce en tanques de sedimentación donde, la velocidad del agua se reduce notablemente, facilitando la sedimentación gravitatoria. Los clarificadores deben diseñarse cuidadosamente para optimizar parámetros y asegurar una eficiencia adecuada en la eliminación de contaminantes [19]. Algunas plantas de tratamiento también implementan la flotación como técnica complementaria en esta fase, para eliminar partículas flotantes o grasas que no sedimentan fácilmente. Estos procesos son insuficientes para reducir contaminantes disueltos o eliminar microorganismos patógenos, siendo de vital importancia para el agua continuar con tratamientos más avanzados.

- Tratamiento secundario: es un proceso esencialmente biológico destinado a la remoción de materia orgánica disuelta y coloidal que no fue disuelta totalmente en el tratamiento primario. La tecnología más común es el sistema de lodos activos. Este proceso involucra airear intensamente el agua residual en presencia de microorganismos aerobios, que utilizan oxígeno para descomponer la materia orgánica. Otro método habitual son los biofiltros donde las aguas residuales se percolan lentamente a través de medios filtrantes cargados de microorganismos adheridos a su superficie, facilitando la degradación biológica de contaminantes [20].
- Tratamiento terciario: esta etapa busca la completa desinfección mediante eliminación de agentes patógenos. Entre las técnicas destacan la filtración avanzada mediante membranas como ultrafiltración, nanofiltración u ósmosis inversa. Además la desinfección mediante cloración, ozonización o radiación es indispensable para eliminar microorganismos patógenos [21]. La eliminación de nutrientes como nitrógeno y fósforo se logra mediante procesos biológicos avanzados, incluyendo nitrificación y precipitación química. Estos tratamientos minimizan impactos ambientales como la eutrofización en cuerpos de agua receptores [22].

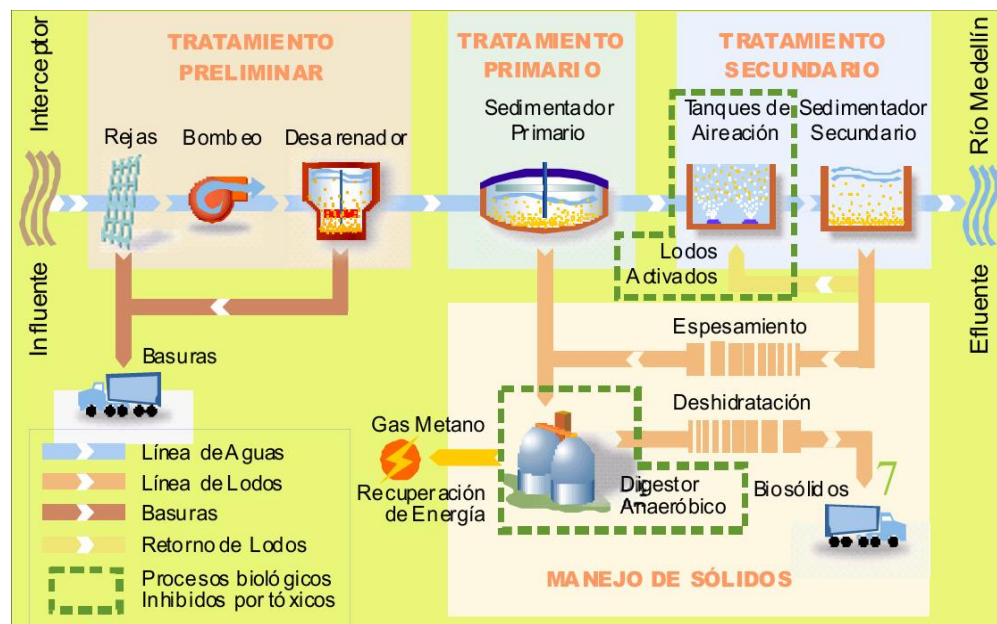


Figura 2-3 Esquema planta de tratamiento aguas residuales [20]

2.1.3 Algas como agentes de biorremediación

La biorremediación con algas es un método que aprovecha la capacidad natural de las algas para absorber, degradar o transformar contaminantes presentes en el agua, contribuyendo así a la limpieza y recuperación de ecosistemas acuáticos contaminados [23]. Las algas son organismos ideales para la biorremediación debido a su alta tasa de crecimiento, capturando y metabolizando una amplia variedad de contaminantes.

La recuperación de aguas contaminadas mediante algas se basa principalmente en tres enfoques (Figura 2-4): la degradación o transformación del agente contaminante [24] mediante cambios en su composición química. Este proceso puede incluir la biodegradación de compuestos orgánicos complejos en otros más simples y de menor toxicidad, como los hidrocarburos, la remoción o segregación del contaminante, ya sea por vaporización, disolución o a través de procesos que aprovechen sus propiedades eléctricas para promover la eliminación física del contaminante en el entorno acuático. Este proceso puede aplicarse para absorber contaminantes en las algas a través de sus paredes celulares, acumulándolos en su biomasa y eliminándolos del medio acuático; la fijación del contaminante,

empleando técnicas que permiten estabilizar, endurecer o encapsular residuos, evitando su dispersión en el medioambiente [25]. Puede aplicarse con materiales sólidos, como polímeros, que aíslan los contaminantes y previenen su liberación.

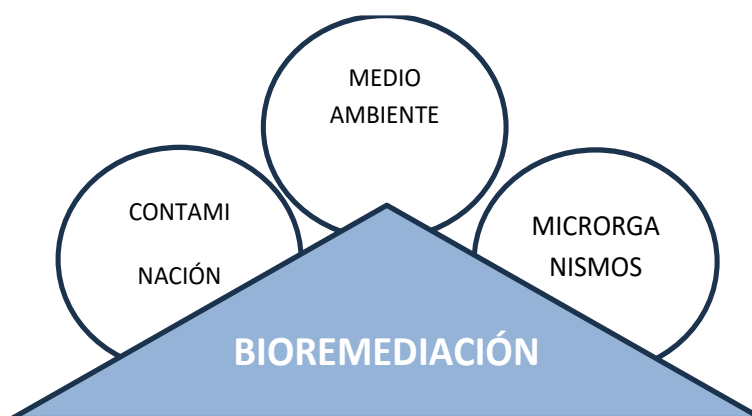


Figura 2-4 Factores de influencia para el proceso de biorremediación

2.1.4 Cultivo y manejo de algas para su aplicación

El cultivo de las algas para su uso en la biorremediación es un proceso que consta de diferentes etapas, desde la producción en biorreactores hasta el traslado y aplicación en entornos naturales.

Los biorreactores abiertos o cerrados [26] dependen de la necesidad específica y del entorno en que se vayan a utilizar. Los biorreactores abiertos, son estanques altos con un gran volumen, que se utilizan para algas robustas que pueden resistir a la contaminación externa. Mientras que los biorreactores cerrados permiten un mayor control sobre condiciones de crecimiento, reduciendo el riesgo de contaminación y asegurando una buena absorción de nutrientes [27].

Las condiciones de crecimiento, como la luz, temperatura, pH y nutrientes, son cuidadosamente reguladas para maximizar la producción de biomasa. En general, el tiempo de crecimiento del alga puede oscilar entre 7 y 14 días [28] dependiendo de la especie y de las condiciones del biorreactor.

Una vez alcanzada la etapa de formación y maduración en tanques, el transporte del alga se debe realizar bajo condiciones controladas para evitar su deterioro. Se suelen utilizar contenedores con sistemas de oxigenación y temperatura regulada, ya que la vida media de éstas es muy reducida.

Una vez las algas se sitúan en el sitio de aplicación, generalmente no muy lejano al de su producción, se evalúan parámetros ambientales de temperatura, salinidad y disponibilidad de nutrientes. Dependiendo del tipo de biorremediación, las algas pueden ser introducidas en el cuerpo de agua o ancladas a una estructura flotante diseñada para optimizar su absorción. El éxito depende de un seguimiento posterior, donde se monitorean parámetros como la eficiencia en la captura de nutrientes, la tasa de crecimiento del alga y los efectos en el ecosistema.

2.1.5 Algas naturales

Las algas se utilizan en la remediación de aguas debido a su capacidad para absorber metales contaminantes, especialmente metales pesados. Este proceso, conocido como bioadsorción, implica la adhesión de contaminantes a la superficie de las algas, permitiendo su eliminación [29].

Diversos estudios han demostrado que las algas marinas son eficaces para eliminar iones de metales pesados tóxicos, como arsénico, plomo, cadmio y cobalto. Además se han explorado soluciones innovadoras para abordar problemas con algas de especies invasoras [30].

En países como Republica Dominicana [31] se han implementado medidas para eliminar algas invasivas que afectan al turismo. Numerosas empresas se posicionan para la recolección del sargazo y su uso en productos agrícolas (Figura 2-5).



Figura 2-5 Granja de algas tropicales [32]

2.2 Técnica de electrospinning

La técnica del electrospinning, también conocida como electrohilado es una técnica de fabricación aditiva que permite la producción de fibras de rango nanométrico y micrométrico a partir de disoluciones poliméricas.

La técnica del electrohilado tiene sus raíces en investigaciones que datan en siglos pasados. A continuación, se destacan los hitos más importantes de su desarrollo histórico.

Descubrimiento inicial (1897): Lord Rayleigh observó que se podían inducir cargas eléctricas en chorros de líquidos, lo que sentó las bases para comprender los principios fundamentales del electrospinning [33].

Estudios matemáticos y experimentales (1914): el físico americano John Zeleny [34] analizó en profundidad el comportamiento de las gotas de líquidos cargadas eléctricamente en la punta de un capilar. Su trabajo incluyó modelados matemáticos que describieron el comportamiento de los fluidos bajo fuerzas físicas electrostáticas.

Primeras patentes (1902-1934): durante las primeras décadas del siglo XX, se otorgaron las primeras patentes relacionadas con el electrohilado. Cooley y Morton [35] patentaron métodos de dispersión de fluidos usando cargas eléctricas en 1902. En 1934, Anton Formhals [36] describió explícitamente un proceso de electrospinning para producir fibras utilizando acetato de celulosa, marcando un hito en la aplicación práctica de la técnica.

Revitalización del interés (1990): en las décadas de 1940 y 1950, el enfoque en la técnica disminuyó debido a las limitaciones en los materiales y la tecnología disponibles. Sin embargo, en la década de 1990, Darrell Reneker [37] revitalizó el interés en el electrospinning al demostrar su potencial para producir nanofibras. Sus investigaciones consolidaron las bases modernas del proceso.

El proceso implica la aplicación de un alto voltaje a una solución polimérica, generándose un chorro fino que se estira y se solidifica en forma de nanofibras al evaporarse el solvente (Figura 2-6) .Estas cualidades hacen que el material tengan una gran cantidad de aplicaciones médicas, farmacéuticas y de filtrado [38].

Durante la formación del material, varios parámetros muy importantes para definir las condiciones finales: la viscosidad de la solución, que afecta a la formación y uniformidad de las fibras; el voltaje aplicado, que influye en la formación del chorro y en el hilado de las fibras; y la conductividad, que afecta a la carga eléctrica y estabilidad del chorro [39].

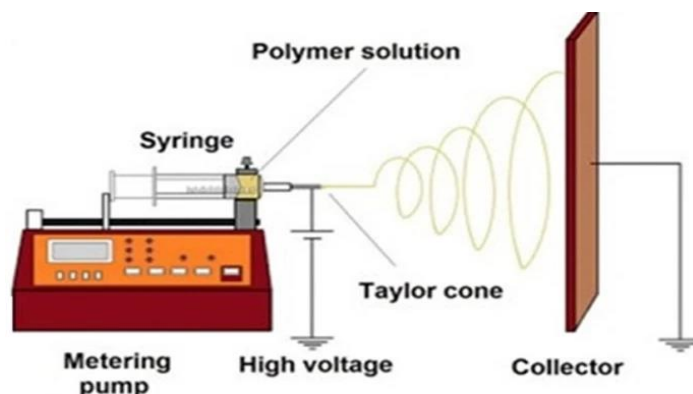


Figura 2-6 Esquema proceso de electrospinning [40]

Una correcta optimización de estos parámetros puede evitar defectos como beads y garantizar uniformidad en las fibras. Entre los avances más recientes, se destaca, el electrospinning coaxial para encapsular fármacos permitiendo un control más preciso de los medicamentos [41].

También el forcespinnig está cogiendo peso en la industria ya que se utiliza la fuerza centrífuga que ha demostrado ser eficiente en la producción de fibras a gran escala [39].

En el ámbito de la liberación de fármacos, las nanofibras ofrecen una avanzada ventaja al aumentar la disolución del fármaco y permitir un nivel de liberación sostenido. Polímeros como PLA y PCL son altamente utilizados para la fabricación de tejidos proporcionando sistemas biodegradables y efectos de diversas aplicaciones terapéuticas [42]. Con los avances continuos en materiales y técnicas, el electrospinnig se posiciona en buen lugar para la fabricación de nanomateriales con aplicaciones que trascienden la biomedicina, extendiéndose a campos como la electrónica y protección ambiental [43].

2.2.1 Antecedentes recientes

En la actualidad el electrospinning es una técnica ampliamente utilizada y en constante proyección, tal y como vemos en la Figura 2-7. En el siglo XXI, se ha integrado con tecnologías emergentes, como la fabricación aditiva y la ingeniería de tejidos. Técnicas como el electrospinning coaxial y el forcespinnig han ampliado sus capacidades, permitiendo la encapsulación de fármacos y el desarrollo de materiales avanzados [44].

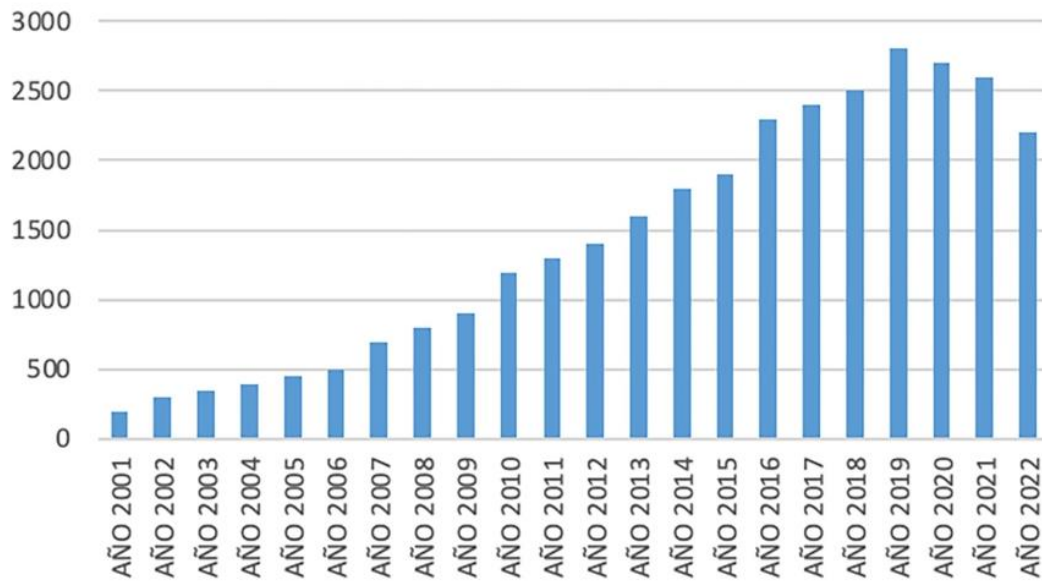


Figura 2-7 Número de patentes electrospinning [45]

2.2.2 Aplicaciones de la tecnología

Las nanofibras electrohiladas son productos clave con aplicaciones amplias y diversas en múltiples campos:

- Aplicaciones biomédicas: en la liberación de medicamentos permiten que los medicamentos se liberen de manera sostenida o dirigida. Por ejemplo, medicamentos como el naproxeno y la doxorubicina se han incorporado para tratar inflamaciones crónicas y cáncer. También es posible integrar sistemas multidrogas para liberaciones programadas que mejoren la eficacia terapéutica.
- Ingeniería de tejidos: son ideales debido a su similitud estructural con la matriz extracelular natural, lo que permite soportar el crecimiento celular y promover regeneración de tejidos dañados, huesos y cartílagos. Además, en la ingeniería de tejidos óseos, las nanofibras mejoradas ofrecen una alternativa prometedora para la regeneración ósea.
- Cuidado de heridas: son capaces de actuar como barreras protectoras contra infecciones mientras promueven la regeneración de tejidos. Los apósitos fabricados con materiales como quitosano han demostrado una eficacia superior en comparación con los tradicionales.
- Cosméticos: mascarillas (Figura 2-8) [46] con nanofibras no sólo han mejorado con la hidratación de la piel, sino que también poseen propiedades antioxidantes y regenerativas.



Figura 2-8 Mascarilla quirúrgica [47]

- Filtración y purificación: las membranas son altamente utilizadas en purificación del agua, debido a su alta porosidad, capturando partículas diminutas como polvo, bacterias y virus. En la separación de líquidos, como el aceite y el agua [48], las nanofibras recubiertas con materiales hidrofóbicos han mostrado una gran eficacia en la remediación ambiental y recuperación de recursos.
- Energía y electrónica: las nanofibras mejoran la capacidad de almacenamiento y sostenibilidad en baterías de iones de litio [49]. En supercondensadores, aumentan la conductividad y prolongan su vida útil. Además, las nanofibras se utilizan en celdas solares para optimizar la absorción de luz y mejorar la eficiencia energética [50].
- Medioambiente: en la actualidad se utilizan nanofibras para la eliminación de metales pesados y pesticidas del agua [51]. También se emplean en la absorción de gases tóxicos y partículas finas en entornos industriales, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental.
- Defensa y textiles: se utilizan en trajes de protección contra agentes químicos [52]. Estos tejidos ofrecen una combinación única de ligereza, durabilidad y protección. En el sector textil, las nanofibras mejoran las propiedades de tejidos y la impermeabilidad y resistencia al fuego.

2.2.3 Avances e innovaciones

En la actualidad, diversos avances técnicos que se han postulado como los más pioneros en el campo del electrohilado (Figura 2-9), destacando por su innovación y potencial de aplicación en múltiples áreas:

- Rediseño del sistema: nuevos tipos de boquillas, como boquillas coaxiales y sin aguja, han mejorado la uniformidad de las fibras y han ampliado la posibilidad morfológica, permitiendo la producción de fibras huecas y estructura multicapa [53].
- Electrohilado de campo cercano: permite un control preciso de la deposición de fibras mediante la reducción de la distancia entre la boquilla y el sustrato, resultando en patrones mejor definidos y fibras de mayor grosor.
- Electrohilado a bajo voltaje: configuraciones que operan a voltajes tan bajos que minimizan el daño a componentes bioactivos y mejora la seguridad del proceso, haciendo el electrohilado más viable para aplicaciones sensibles.
- Electrohilo-escritura: combina electrohilado con sistemas de control XYZ, para fabricar patrones en tres dimensiones muy similares a la impresión 3D, ampliando las posibilidades de diseño y aplicación.



Figura 2-9 Aplicaciones nanofibras

- Combinación con otras tecnologías: la integración con dispositivos micro fluidos y técnicas de manufactura ha llevado a la creación de dispositivos complejos con gradientes funcionales [45]

Siguiendo con el ámbito en las aplicaciones de innovación, se destaca las citadas a continuación:

- Medicina regenerativa y bioingeniería: el electrohilado se utiliza para fabricar andamios para ingeniería de tejidos con porosidad y propiedades mecánicas controladas. También se han encontrado matrices con gradientes funcionales para liberar fármacos de manera controlada.
- Sensores y dispositivos electrónicos: las fibras electrohiladas pueden incorporar materiales piezoeléctricos o conductores para fabricar sensores flexibles y dispositivos portátiles.
- Filtración y purificación: las estructuras nanoporosas producidas por electrohilado son ideales para capturar partículas pequeñas y contaminantes en aplicaciones de filtración y purificación de agua.
- Técnicas híbridas: la combinación con técnicas de fabricación aditiva permite fabricar estructuras multimodales que combinan micro y nanoestructuras en un solo dispositivo, lo que es útil para aplicaciones biomédicas y en dispositivos de diagnóstico.

2.3 Diferentes sistemas de electrospinning en la actualidad

El enfoque principal para mejorar la productividad en el proceso de electrohilado con solución se basa en incrementar la cantidad de chorros que se generan a la misma vez, lo cual logra mediante distintas técnicas que pueden agruparse en diferentes categorías (Tabla 2-1).

Configuración	Modificaciones en el diseño	Ventajas	Desventajas
1)Múltiples chorros desde una aguja [54]	Se genera múltiples chorros desde una sólo aguja	-Mayor producción -Mejor control	-Riesgo de inestabilidad de chorro -Configuración compleja del equipo
2)Múltiples chorros con múltiples agujas	Se generen múltiples chorros desde varias agujas	-Mayor tasa de producción que una sola aguja -Escalable para producciones industriales	-Riesgo de obstrucción de agujas -Inestabilidad de formación de chorros
3)Electrohilado sin agujas	Tambor giratorio, el polímero se extruye desde orificios	-Aumenta el rendimiento -Reduce el riesgo de obstrucción -Requiere menos mantenimiento	-Dificultad para mantener la morfología -Menor precisión en las fibras
4)Electrohilado por fusión	Se funden polímeros y se electrohilan	-Eliminan necesidad de disolventes -Fibras más fuertes y duraderas	-Número limitado de termoplásticos
5)Electrohilado por emulsión	Emulsión(aceite-agua)	-Composición de fibras con propiedades únicas	-Proceso complejo que requiere una cuidadosa separación

Tabla 2-1 Configuraciones electrohilado

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

A continuación, se detallan los materiales empleados en el proyecto.

3.1.1 PCL

Para la realización de los ensayos se seleccionaron dos tipos distintos de reactivos de policaprolactona (PCL): PCL Mn 80000 g/mol y PCL Mn 14000 g/mol (Figura 3-1) [55].

El PCL 80000 tiene un peso molecular más alto, lo que significa mayor viscosidad en estado fundido y mayor dificultad para procesarlo. También tiene una mayor resistencia mecánica y elasticidad debido a su estructura más larga y enredada. Mientras que en el caso del PCL 14000 es menos viscoso y más fácil de manipular, ideal para aplicaciones donde se necesita mejor fluidez, más flexible y menos resistente, lo que puede ser útil en aplicaciones que requieran más maleabilidad.

El PCL es un poliéster biodegradable y semicristalino que combina una buena flexibilidad, alta resistencia y biodegradación enzimática. Estas propiedades permiten obtener nanofibras con buena estabilidad mecánica y porosidad controlada, lo que las hacen ideales para aplicaciones en filtros, apósitos de regeneración tisular y sistemas de liberación controlada de fármacos.

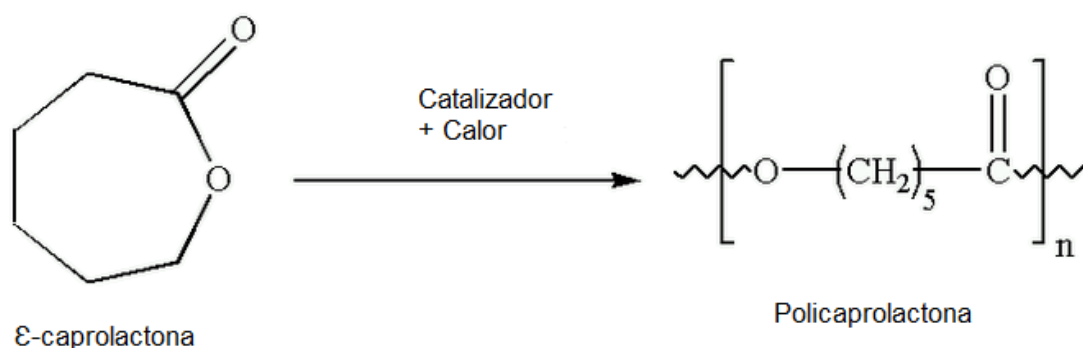


Figura 3-1 Polimerización de ϵ -caprolactona a policaprolactona [56]

En cuanto a la forma de presentación, el PCL seleccionado para esta experimentación se presenta en comprimidos, debido a su buen manejo y degradabilidad (Figura 3-2).

Además, el PCL está aprobado por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) para el contacto con tejidos humanos, lo que garantiza su seguridad y eficacia en aplicaciones ambientales.



Figura 3-2 PCL en pellets

3.1.2 Acetona

La acetona (Figura 3-3) es un compuesto orgánico perteneciente al grupo de las cetonas. Es un líquido incoloro, volátil y con un característico olor fuerte. Tiene un punto de ebullición de aproximadamente 56,5 °C y es altamente inflamable. Su capacidad para disolver una amplia gama de compuestos orgánicos la convierte en un disolvente muy utilizado en la industria química y en aplicaciones de laboratorio.

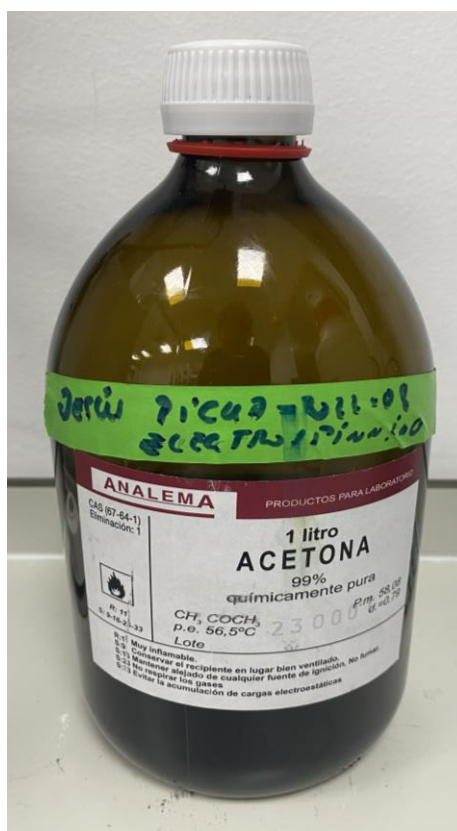


Figura 3-3 Acetona

3.1.3 Alga cultivada en laboratorio

El alga de laboratorio fue cultivada durante un proceso de nutrición y posteriormente incorporada en los ensayos de fibras.

3.1.4 Alga comercial

La Espirulina de Arkopharma [57] en cápsulas es un complemento alimenticio elaborado a base de una microalga rica en proteínas, vitaminas, minerales y antioxidantes [58](Figura 3-4).



Figura 3-4 Cápsulas de Espirulina

3.2 Métodos de fabricación

3.2.1 Sistema de electrohilado para la fabricación de fibra

El dispositivo de electrohilado (Figura 3-5) es un equipo que se utiliza para la producción de microfibras mediante la generación de un campo eléctrico de alto voltaje. Este sistema permite la fabricación de las mallas de fibras que servirán de soporte físico para las algas que actúan como elemento dopante. En este proyecto, se utilizará el sistema de electrohilado del Laboratorio de Investigación de Mecánica del CUD-ENM para llevar a cabo la producción de dichas nanofibras.

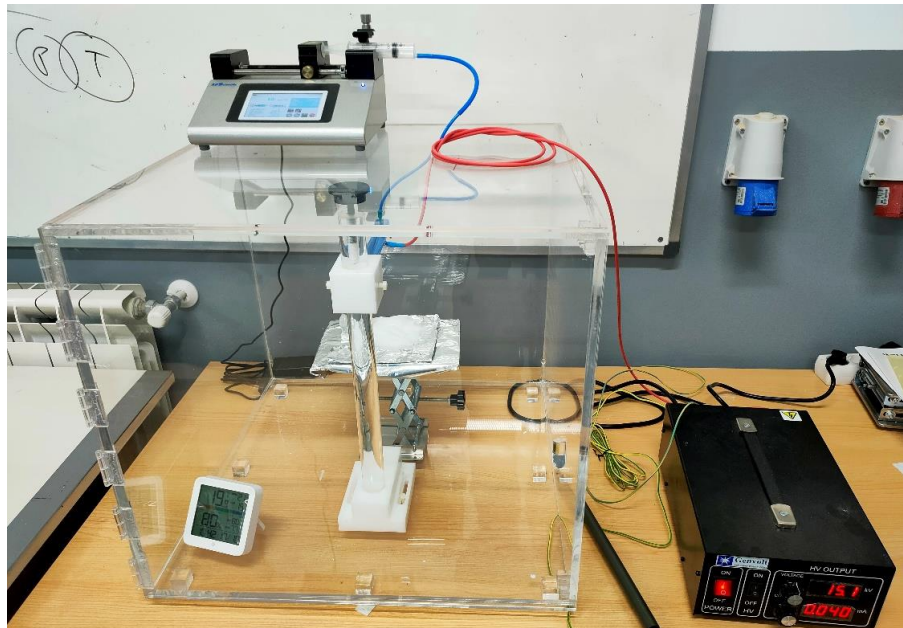


Figura 3-5 Visión general del sistema de electrohilado

Entre los componentes destacan los siguientes:

- Fuente de alta tensión Genvolt 73030 (5-25 KV)
- Jeringa de infusión
- Tubo flexible de poliamida
- Cámara de procesamiento
- Bomba de jeringa KDS LEGATO 100
- Colector
- Electrodo
- Termohigrómetro
- Contraelectrodo
- Lanza de descarga
- Plataforma de elevación
- Sistema de iluminación

3.2.2 Fuente de alta tensión Genvolt 73030

La fuente de alto voltaje Genvolt 73030 es un dispositivo diseñado para generar y suministrar voltajes elevados, entre 1 y 30 kV. Este tipo de fuentes se utilizan en aplicaciones industriales, científicas y médicas debido a su capacidad para proporcionar voltajes precisos y estables. Su diseño incluye mecanismos de seguridad para evitar descargas eléctricas, protegiendo tanto al usuario como al equipo. La fuente de alimentación está equipada con una pantalla LED digital, que permite una fácil visualización y ajuste del voltaje (Figura 3-6).



Figura 3-6 Fuente generadora de alta tensión

3.2.3 Jeringa de infusión

La jeringa actúa como el contenedor y dispensador de la solución polimérica y precursora de fibras. Este dispositivo permite una dosificación precisa del fluido a través de su boquilla de la máquina, garantizando un flujo constante y uniforme, aspecto esencial para obtener las fibras.

El uso de una jeringa de 20 ml (Figura 3-7) resulta ideal por su moderada capacidad, que permite mantener un suministro continuo de la solución polimérica durante el proceso. Se ha seleccionado una de 20 mL por su fácil manejo y alta capacidad de volumen para las necesidades de los ensayos a realizar. Además, su diseño sencillo y precisión de medición contribuye a la reproducibilidad del experimento, asegurando la producción de fibras uniformes en términos de diámetro y estructura.



Figura 3-7 Jeringa de 20 mL [59]

3.2.4 Tubos flexibles de poliamida

Los tubos utilizados en laboratorio son conductores flexibles diseñados para transportar el fluido hasta la boquilla emisora de forma segura. Estos tubos están diseñados para ser químicamente resistentes y fácilmente adaptables.

3.2.5 Cámara de procesamiento

La caja de procesamiento utilizada permite llevar a cabo los ensayos experimentales de forma segura y controlada. El metacrilato transparente permite la observación directa del proceso, mientras protege el entorno externo de posibles descargas eléctricas. Además, la cámara ayuda a mantener condiciones ambientales estables, como la temperatura y la humedad, esenciales para la formación de fibras. Este diseño asegura tanto la seguridad del operador como la reproducibilidad del experimento (Figura 3-8).



Figura 3-8 Cámara de procesamiento

3.2.6 Bomba de jeringa KDS LEGATO 100

La bomba KDS LEGATO 100 (Figura 3-9) es un dispositivo que permite el control preciso del flujo de líquidos, utilizado en este caso para la creación de mallas de fibras. Este equipo presenta una pantalla táctil que permite ajustar parámetros esenciales, como la velocidad del flujo.

El equipo también permite modificar el tiempo de operación, mostrando tanto el tiempo transcurrido como el tiempo restante, y el volumen total a infundir, indicando en mililitros. Además, el dispositivo opera en modo infusión y permite controlar la fuerza ejercida sobre el émbolo de la jeringa. El sistema mecánico desplaza el émbolo de la jeringa de 20 ml, que está conectado a un tubo para transportar el líquido con total precisión. Un LED que indica el estado de funcionamiento del equipo. Este dispositivo es ideal para aplicaciones que requieren un control preciso del flujo de líquidos.

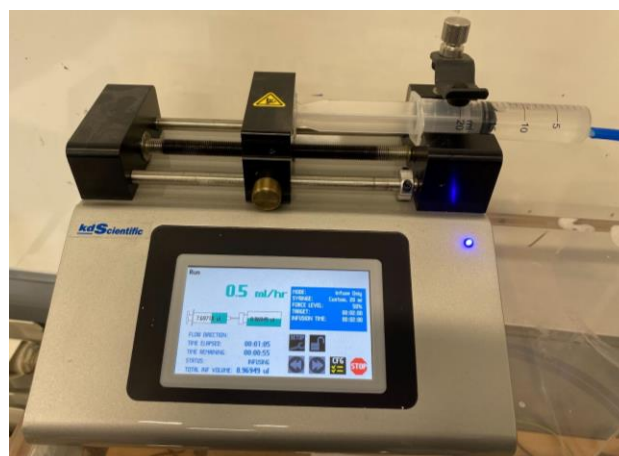


Figura 3-9 Bomba KDS LEGATO 100

3.2.7 Electrodo

La aguja actúa como electrodo en el sistema de electrospinning y es clave para la emisión del fluido, permitiendo que este se cargue eléctricamente y forme un chorro en su punta haciendo que se estire y se convierta en fibras. Este proceso es fundamental en la fabricación de microfibras y otros materiales avanzados. La aguja, en conjunto con la bomba y el colector, aseguran la precisión de la máquina y la uniformidad de la formación de las fibras. Su diseño industrial, viene con un diámetro de 0,5 mm que, por su tamaño y la limpieza tras cada ensayo, son los elegidos para la estabilidad del chorro y la calidad del material (Figura 3-10).



Figura 3-10 Aguja electrodo con conexión a tubo flexible de poliamida

3.2.8 Termohigrómetro

El termohigrómetro (Figura 3-11) es un instrumento que permite monitorear y registrar parámetros ambientales críticos como la humedad, la temperatura. Además, este dispositivo registra valores mínimos y máximos, proporcionando datos importantes para analizar el proceso. La humedad y la temperatura afectan a la viscosidad del fluido y la calidad de las mallas.



Figura 3-11 Termohigrómetro

3.2.9 Contraelectrodo

El contraelectrodo, conectado a tierra, actúa como colector, atrayendo a las fibras que están cargadas eléctricamente desde la aguja. Este componente asegura que las fibras se depositen sobre la base de papel de aluminio, controlando así la estructura y la morfología del material final.

3.2.10 Lanza de descarga

La lanza (Figura 3-12) rompe la tensión superficial del fluido cargado previamente, promoviendo la formación de un chorro estable y continuo que facilita el estiramiento y la alineación de las fibras. Sin la correcta interacción de estas piezas, el proceso de formación se podría volver inconsistente, afectando a los ensayos.



Figura 3-12 Lanza de descarga

3.2.11 Plataforma de elevación

La plataforma de elevación (Figura 3-13) es un dispositivo mecánico que permite ajustar la altura entre el electrodo y contraelectrodo de forma precisa. Está compuesto por una plataforma superior y una base conectada mediante un mecanismo de tijera, el cual se regula con un tornillo para subir o bajar. En los ensayos, se han realizado ajustes de altura de 100mm, 150mm y 200mm, lo que influye directamente en la distribución del campo eléctrico entre la aguja y el colector.



Figura 3-13 Sistema de posicionamiento vertical

3.2.12 Sistema de iluminación LED

El sistema de iluminación de su alta intensidad permite mejorar la observación del chorro polímero (Figura 3-14), facilitando el análisis de la estabilidad del flujo y la formación de microfibras. Además, una iluminación adecuada ayuda a detectar posibles irregularidades o desviaciones en la deposición del material sobre el colector. Gracias a su bajo consumo energético y mínima generación de calor, estas luces no interfieren en las condiciones térmicas del sistema, asegurando resultados precisos y una actuación concreta ante cualquier desviación del material.



Figura 3-14 Luces LED

3.3 Métodos

3.3.1 Metodología para la fabricación de fibras

Para llevar a cabo los ensayos experimentales de la fabricación de la fibra con el equipo, se definió inicialmente la concentración de la disolución polimérica. Esta variable juega un papel clave en el proceso de formación, ya que este puede modificar la estructura y la dimensión de la fibra. Para los ensayos experimentales se seleccionaron concentraciones en peso de PCL que van desde el 5 % hasta el 30 %.

Para preparar la mezcla se define la cantidad que se va a disolver en acetona, realizando todas las disoluciones de 50 gramos en peso (Figura 3-15). Se pesa inicialmente la cantidad necesaria de PCL en una báscula de precisión y, utilizando un vaso de precipitado en función del % wt requerido para la mezcla (por ejemplo 5 gramos para el 10% de PCL) y se completa rellenando con acetona hasta llegar a 50 gramos. Dicha disolución se calienta y se agita en un agitador magnético de laboratorio a una temperatura de 40 °C, 750 rpm durante 6 horas. Las mezclas (más densas) requirieron modificaciones, aumentando las revoluciones hasta 1100 rpm y la temperatura hasta 50 °C. En otros casos fue necesario ampliar el rango de tiempo hasta 10 horas, dado que el agitador requería un período adicional para lograr una homogeneización eficiente. El proceso de mezcla se ajustó con el fin de asegurar que la disolución alcanzara una consistencia adecuada y se integraran correctamente todos sus componentes. Una vez verificada la completa disolución de PCL en la disolución, asegurando la ausencia de partículas no disueltas y una homogeneidad adecuada, se dio paso a la siguiente fase del procedimiento experimental.

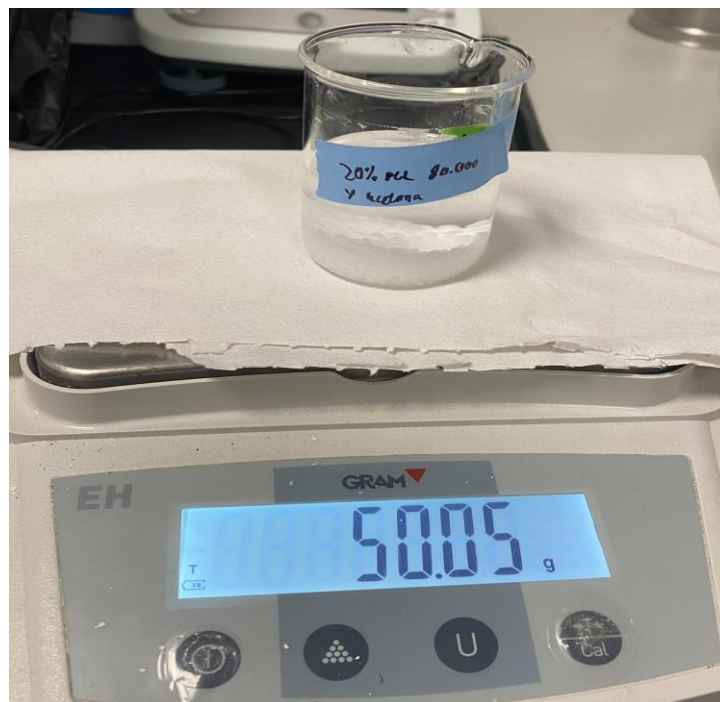


Figura 3-15 Mezcla PCL y acetona 50 gramos

En esta etapa, la mezcla se extrae cuidadosamente y se transfiere a una jeringa de 20 mL, un proceso que requiere precisión para evitar la posible incorporación de burbujas de aire o posibles irregularidades en la disolución. Para ello, se utilizó un procedimiento meticuloso que garantiza la estabilidad de la mezcla, permitiendo su correcta manipulación en las etapas siguientes. Este paso es crucial, ya que cualquier alteración podría afectar las propiedades definidas previamente, influyendo en su morfología y calidad de las fibras.

Se ajustan los parámetros del ensayo en la pantalla de la bomba del sistema, se coloca la lámina de aluminio en la base y se conecta el contraelectrodo en uno de sus extremos (generalmente el más cercano a la fuente generadora de tensión, el lado derecho).

La cámara de procesamiento (Figura 3-8) debe estar cerrada, antes de configurar cualquier parámetro tanto de la máquina generadora de tensión como de la bomba.

Antes de dar inicio al ensayo, se llevó a cabo una minuciosa revisión de todos los parámetros de seguridad, asegurando el correcto ajuste del voltaje requerido para el procedimiento. Asimismo, se verificó la adecuada conexión de los tubos de enlace, los cuales fueron previamente sometidos a un proceso de limpieza con acetona para eliminar cualquier posible residuo que pudiera llevar. De igual manera, se confirmaron los parámetros de inyección, asegurando que todas las condiciones operativas fueran óptimas para el desarrollo del experimento.

Previo al inicio del proceso, se realizó una comprobación preliminar del sistema mediante el avance controlado de la máquina, con el propósito de verificar que el recorrido del material dentro del circuito se desarrollara de manera uniforme y sin obstrucciones. Este chequeo aseguró que no existieran fugas en el sistema y que el líquido fluya adecuadamente a través de la aguja emisora.

Durante la fase experimental, el material generado se recolectó sobre una lámina de papel de aluminio (Figura 3-16) estratégicamente conectado a tierra con el generador de alta tensión, desempeñando así la función de colector en el sistema de electrohilado. La buena disposición de este colector permitió la adecuada atracción de las fibras generadas, favoreciendo su deposición uniforme y la formación de estructuras con las características morfológicas deseadas.

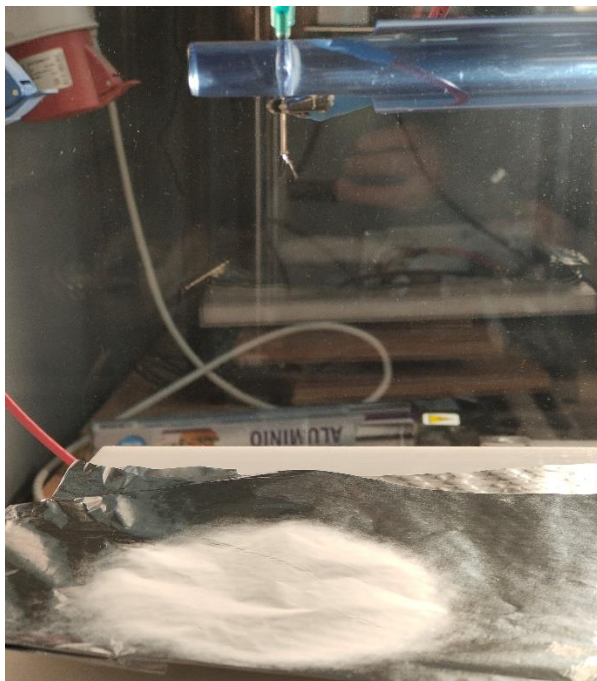


Figura 3-16 Papel de aluminio durante ensayo en la cámara

Una vez concluido el ensayo, se procedió a la desconexión segura de la fuente de voltaje, evitando posibles descargas eléctricas residuales. Posteriormente, tanto la aguja emisora como el papel de aluminio fueron sometidos a un proceso de descarga estática con la lanza del sistema. El resultado como se muestra en la Figura 3-17, es de la formación de fibras.

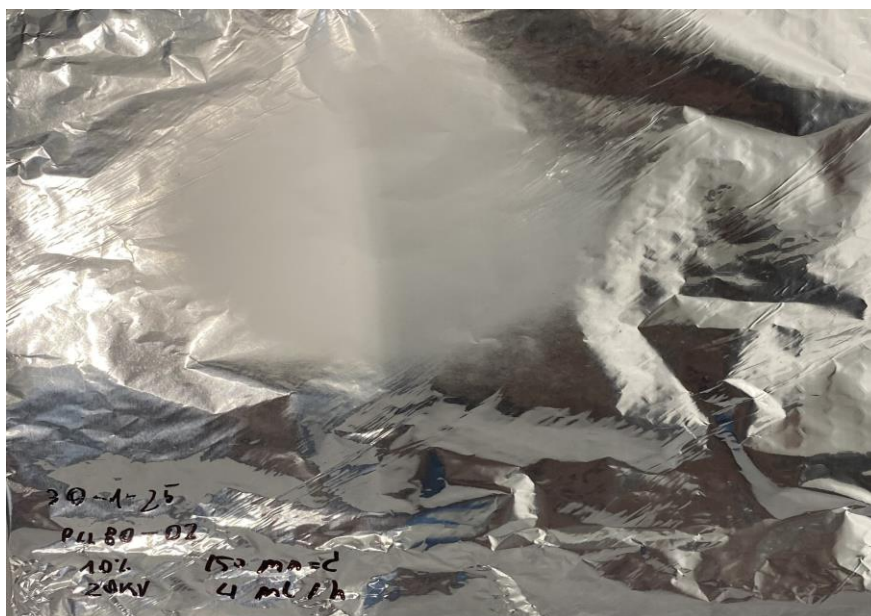


Figura 3-17 Papel de aluminio con malla de filtro

3.3.2 Metodología para la fabricación de filtros con algas comerciales

En la siguiente etapa de los ensayos experimentales, se procedió a la formación de los filtros, pero con algas añadidas. El proceso de fabricación se mantuvo inalterado en todas sus etapas

previamente mencionadas, con la única diferencia de la incorporación de algas en proporción según el ensayo del 0,5 al 2 % en peso, como elemento dopante de fibras en la mezcla inicial (Figura 3-18).

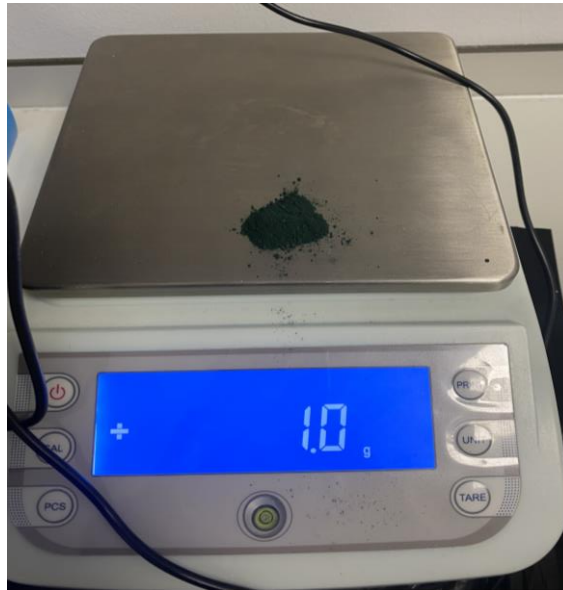


Figura 3-18 Alga en mezcla inicial

Las disoluciones en este caso fueron de 25 gramos de material. Durante los ensayos se decidió incorporar *Espirulina* comercial en la mezcla inicial, con un porcentaje muy bajo, para evaluar el impacto en los filtros (véase Figura 3-19).

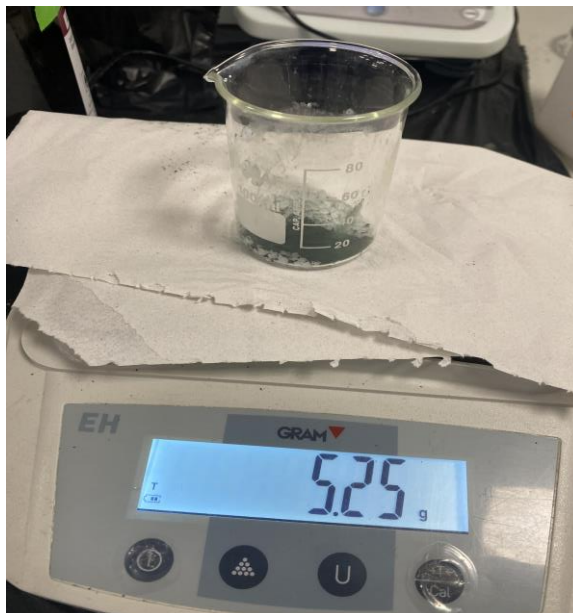


Figura 3-19 *Espirulina* junto PCL

3.3.3 Diseño Box-Behnken

Para optimizar los ensayos de electrospinning y evitar realizar 50 pruebas innecesarias, se utilizó la herramienta de diseño experimental Box-Behnken que permitió acotar el número de experimentos y combinar tratamientos más eficientes. Se definieron:

Tres niveles de cada parámetro clave:

- Porcentaje de espirulina: 2%, 1,25% y 0,5%.
- Concentración de PCL: 8%, 12% y 16%.
- Intensidad del voltaje: 15kV, 20kV y 25 kV.

A partir de estas combinaciones, se diseñaron diferentes mezclas para cubrir todas las variaciones posibles dentro de estos rangos, resultando en un total de 15 ensayos (Figura 3-20). De esta forma logramos reducir la cantidad de pruebas sin perder información valiosa sobre el comportamiento del material.

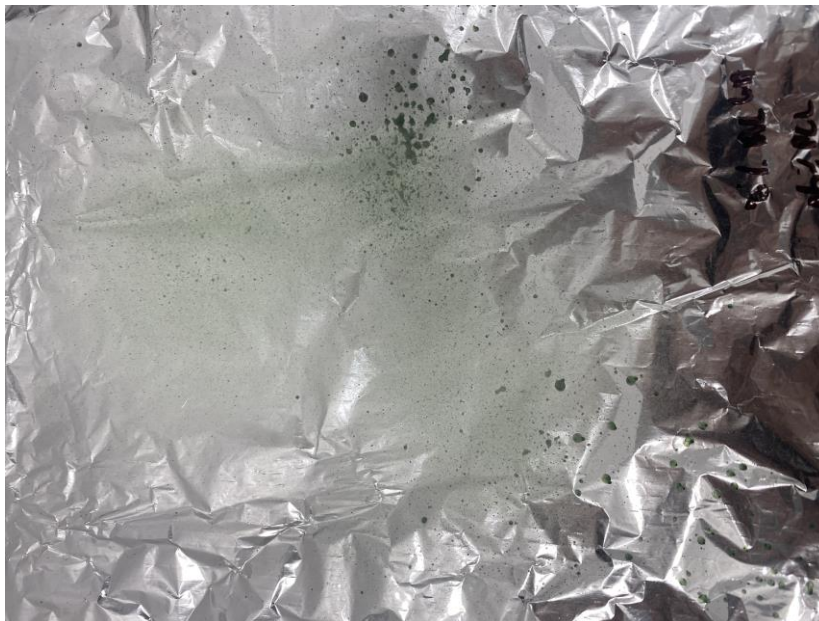


Figura 3-20 Filtro con algas

Se utilizó la metodología de superficie de respuesta (RSM) para optimizar las condiciones de obtención de las membranas que conducen a una eliminación más efectiva de contaminantes en agua. El diseño Box-Behnken es un método de optimización experimental basado en superficies de respuesta. Se utiliza para modelar y optimizar procesos con múltiples variables, permitiendo determinar la influencia de cada factor y su interacción sobre la respuesta del sistema. En este estudio, el diseño experimental Box-Behnken es un diseño de segundo orden basado en factores a tres niveles y se empleó para evaluar el efecto de tres factores: porcentaje de alga, porcentaje de PCL y voltaje. Este diseño permite estudiar las interacciones entre los factores y determinar sus efectos sobre las variables de respuesta: concentración de cobre, nitrato y fosfato a diferentes tiempos de exposición.

El diseño Box-Behnken es un diseño factorial rotacional que se basa en una combinación de niveles altos, bajos y medios de los factores estudiados. Para su aplicación es necesario definir las variables que influyen en el proceso (variables independientes) y sus niveles: bajo (-1), medio (0) y alto (+1).

La combinación lineal y cuadrática de los datos observados permite generar una matriz experimental en la que cada punto representa una combinación de niveles de los factores. El número de experimentos a realizar viene definido por:

$$N = 2k(k - 1) + C_0$$

Ecuación 1

donde k es el número de factores y C_0 representa el número de réplicas en el punto central. Para describir la relación entre las variables independientes y la respuesta (variables dependientes) se utiliza una expresión que supone una combinación lineal y cuadrática de acuerdo con la siguiente:

$$Y = \beta_0 + \sum \beta_i X_i + \sum \beta_{ii} X_i^2 + \sum \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon$$

Ecuación 2

donde Y es la respuesta del sistema, X_i son los factores, y β son los coeficientes del modelo.

En este estudio se optimizaron las condiciones para reducir la concentración de contaminantes en agua a partir de tres variables independientes: porcentaje de alga en las membranas (x_1), porcentaje de PCL (x_2) y voltaje aplicado durante la síntesis de la membrana (x_3) en la reducción de la concentración de fosfatos tras una hora de adsorción (y_1) y fosfatos (y_2), nitratos (y_3) y cobre (y_4) a las seis horas de tratamiento (Tabla 3-1).

<i>a) Variables independientes</i>			
Variable	Nomenclatura	Unidades	Rango de variación
Porcentaje de alga	[Alga]	%	2 – 0,5
Porcentaje de PCL	[PCL]	%	16-8
Voltaje	[V]	v	20-10
<i>b) Variables independientes codificadas</i>			
Variable	Nomenclatura	Definición	Rango de variación
Porcentaje de alga adimensional	x_1	$([Alga] - 2,5)/1,25$	$(-1,1)$
Porcentaje de PCL adimensional	x_2	$([PCL] - 24)/12$	$(-1,1)$
Voltaje adimensional	x_3	$(V - 30)/15$	$(-1,1)$
<i>c) Variables dependientes</i>			
Variable	Nomenclatura	Unidades	
Fosfatos (1 h)	y_1	mg/l	
Fosfatos (6 h)	y_2	mg/l	
Nitratos (6 h)	y_3	mg/l	
Cobre (6 h)	y_5	mg/l	

Tabla 3-1 Tabla de variables dependientes e independientes y rangos analizados

Para el tratamiento de los datos se codificaron las variables independientes, transformándolas en un rango estándar de tres niveles: (-1) valor mínimo de la variable; (0) valor medio y (+1) valor máximo.

Esta transformación minimiza el efecto de las diferentes escalas en las variables y facilita la comparación de sus efectos.

3.3.4 Cultivo de algas en el laboratorio

El sistema de cultivo que se muestra en la Figura 3-21 es un fotobiorreactor que está diseñado para el crecimiento de microalgas. Esta configuración se basa en la combinación de iluminación artificial, aireación y nutrientes esenciales para fomentar la fotosíntesis y el desarrollo celular de las algas. El cultivo requiere un protocolo de mantenimiento que busca optimizar el crecimiento de la biomasa sin generar condiciones de estrés o deficiencia de nutrientes.

Las luces LED proporcionan la radiación necesaria para que las microalgas realicen el ciclo de fotosíntesis durante el día, convirtiendo la energía lumínica en energía química y produciendo oxígeno. Durante la noche, la luz se apaga con un sistema de alumbrado automático, el metabolismo cambia y predomina la respiración celular, consumiendo parte del oxígeno. Este ciclo simula en parte el ambiente natural, permitiendo un crecimiento más eficiente y estable. La aireación, proporcionada por el sistema de bombeo, es clave para mantener una adecuada concentración de CO_2 disuelto, esencial para la fotosíntesis, además de prevenir la sedimentación de las células.

Este tipo de sistemas tiene aplicaciones en diversas áreas de biotecnología, desde la producción de biomasa, hasta la obtención de compuestos de interés farmacéutico como pigmentos, antioxidantes y proteínas. Dependiendo de la especie de microalgas que estemos cultivando, los objetivos pueden variar desde la producción de *Espirulina* para consumo humano hasta *Chlorella* o *Nannochloropsis* para alimentación en acuicultura [60].

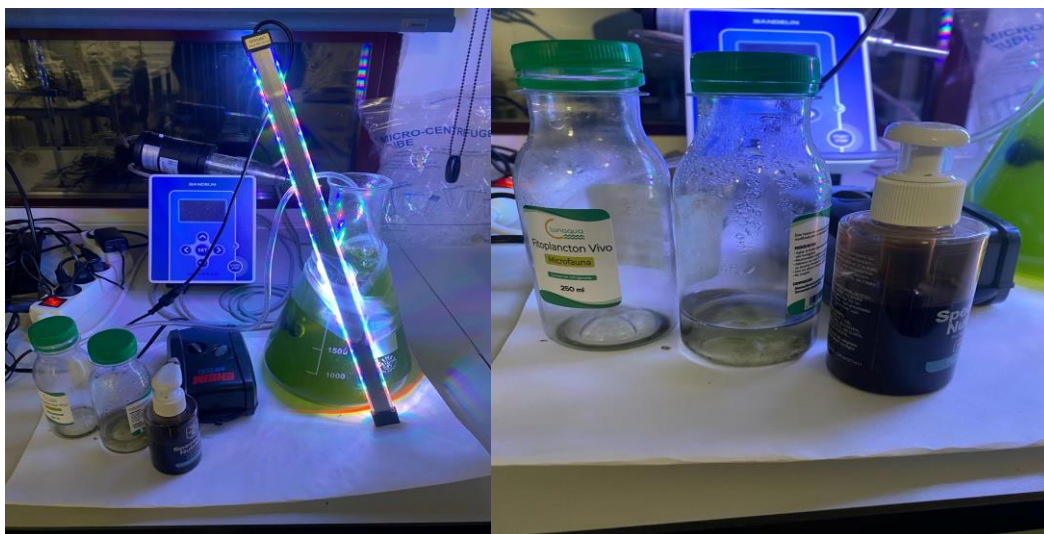


Figura 3-21 Sistema natural de fabricación de algas(derecha) Frascos de nutrientes(izquierda)

Al cabo de un mes, el matraz fue filtrado y se obtuvo el alga natural (Figura 3-22).



Figura 3-22 Algas naturales filtradas

Entre los componentes que forman el biorreactor, destacan las siguientes:

- Fitoplancton vivo 250 mL
- Matraz de 2L
- Aireador EHEIM air200
- Temporizador
- Luz LED

3.3.5 Fitoplancton vivo 250 mL

El fitoplancton vivo mostrado en la Figura 3-23 se utiliza comúnmente en acuarios, acuicultura y biorreactores para la alimentación de organismos filtradores como rotíferos y artemias, así como la producción de biomasa y tratamientos de aguas.

En este trabajo se usa como inóculo principal para el crecimiento de algas bajo condiciones controladas, optimizando factores como la luz, el CO₂ y los nutrientes.



Figura 3-23 Frasco de fitoplancton vivo 250 mL

3.3.6 Matraz de 2L

El recipiente utilizado tiene una capacidad de 2L de vidrio con base ancha y cuello estrecho, utilizado generalmente en laboratorios para mezclar, calentar y cultivar soluciones. El diseño favorece la agitación y minimiza las posibilidades de derrame y evaporización.

3.3.7 Aireador EHEIM air200

El aireador EHEIM air200 (Figura 3-24), proporciona una capacidad de oxigenación en el biorreactor. Incluyendo manguera y difusores, este sistema es clave para la dispersión de CO₂ y la agitación del medio cultivado.



Figura 3-24 Aireador EHEIM air200

3.3.8 Temporizador

El tiempo de exposición a la luz es un factor clave en el crecimiento y desarrollo de algas, ya que el fotoperiodo, que representa la proporción de horas de luz y oscuridad, influye en el metabolismo celular. Se incorpora un temporizador que regula el encendido de la iluminación artificial. El sistema opera en torno a 12 horas, estableciendo un ciclo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad.

3.3.9 Luz LED

Optimiza la producción de biomasa y favorece el crecimiento. Además, permite controlar la intensidad y el fotoperiodo, maximizando la eficiencia del cultivo en condiciones de laboratorio.

3.3.10 Metodología para la fabricación de filtros con algas cultivadas en laboratorio.

En la siguiente fase de los ensayos experimentales, se procedió a la fabricación de los filtros, esta vez incorporando algas cultivadas en el biorreactor del laboratorio. Las disoluciones preparadas tenían una concentración total de 25 gramos (Figura 3-25), de los cuales 1 gramo correspondía al alga natural.



Figura 3-25 25 gramos de disolución con alga cultivada

Posteriormente, se llevaron a cabo seis ensayos mediante la técnica de electrohilado, empleando voltajes de 10, 15 y 20 kV, y utilizando dos tasas de flujo distintas, de 2 y 4 ml/h (Figura 3-26).

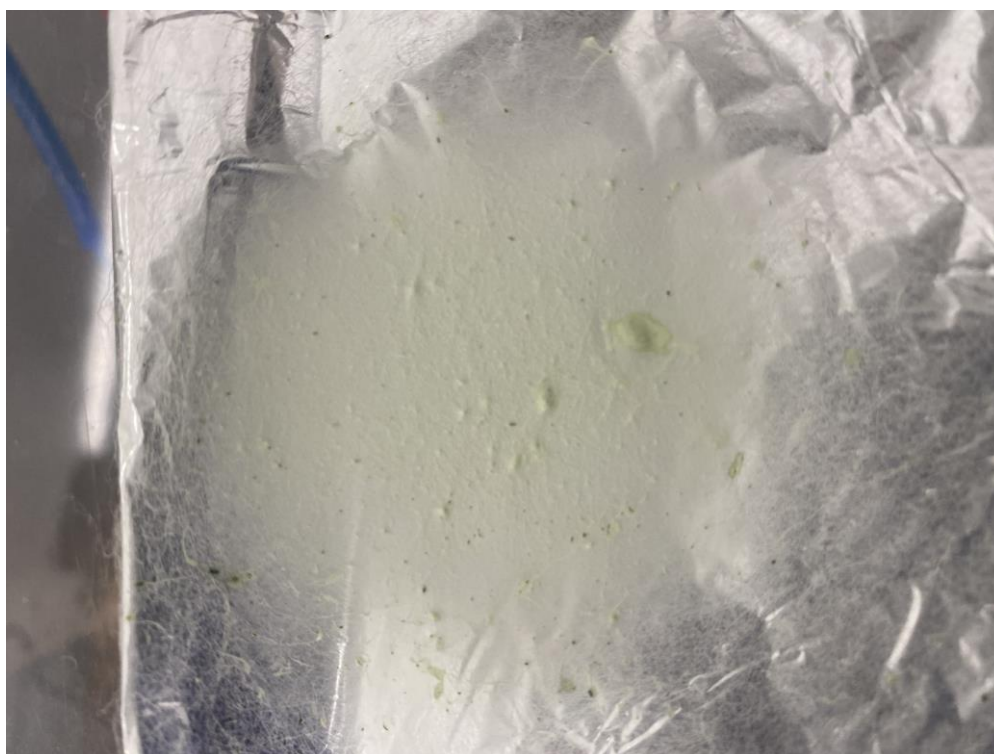


Figura 3-26 Filtro postratamiento algas

3.4 Métodos de caracterización de muestras

3.4.1 Caracterización morfológica de las muestras

Tras la fabricación de los filtros mediante electrohilado, se procede a la observación superficial utilizando el microscopio Dino-lite High Magnification (véase Figura 3-27).

Este estudio permitirá observar la morfología y estructura detallada de los filtros, evaluando aspectos como la distribución de fibras, distancias entre ellas y la uniformidad presentada. A través de esta caracterización, se podrá determinar si la técnica de fabricación empleada ha producido una

arquitectura adecuada para su estudio y aplicación. La microscopía es una herramienta fundamental en esta fase, que con el software “Dino Capture 2.0” proporciona información de viabilidad estructural de filtros, aspectos determinantes para su funcionalidad y biodegradabilidad.

En el contexto del TFG, resulta de importancia y de mejora al proyecto evaluar la calidad de las fibras biodegradables destinadas a la formación de filtros ecológicos. Este dispositivo se encuentra en la instalación del CUD en el edificio de investigación.



Figura 3-27 Microscopio Dino-lite High Magnification

3.4.2 Ensayos de adsorción de las membranas con disoluciones contaminadas

Los experimentos de adsorción se realizaron, por triplicado, con fragmentos de las membranas, pesados previamente y lo más uniformes posible para asegurar la consistencia en los resultados. Se prepararon, por separado, disoluciones con fosfato, nitrato y cobre, que se agitaron durante diferentes horas en un agitador orbital. Pasado el tiempo de adsorción se separó la membrana y se procedió a realizar las medidas de los contaminantes en las muestras.

3.4.3 Medición del fosfato, nitrato y cobre en soluciones líquidas

El fotómetro multiparámetro HI83399 de la marca Hanna Instruments es un equipo de laboratorio diseñado para la medición precisa de múltiples parámetros en soluciones acuosas, incluyendo la demanda química de oxígeno (DQO), pH, turbidez y nutrientes como el fosfato. Su diseño compacto y facilidad de uso lo convierten en una herramienta útil para el análisis de calidad de agua en entornos industriales, ambientales y de investigación [61].

Este fenómeno funciona mediante el principio de fotometría de absorción. La máquina emite un haz de luz a través de la muestra, y el detector interno mide la cantidad de luz absorbida por los compuestos presentes en la solución. La cantidad de luz absorbida está directamente relacionada con la concentración.

Esta máquina utiliza filtros ópticos de precisión para garantizar una longitud de onda adecuada para cada parámetro, proporcionando resultados exactos y reproducibles.

Para la determinación de fosfatos, el proceso comienza seleccionando el programa específico para fosfatos (phosphate LR) en el menú de métodos del equipo. En el caso de la medición de nitratos se selecciona (nitrate) y para la medición del cobre (copper HR).

El procedimiento experimental consistió en preparar cada muestra con sus respectivas concentraciones (Figura 3-28) y someterlas a un tiempo de agitación controlado en el equipo (Figura 3-29).

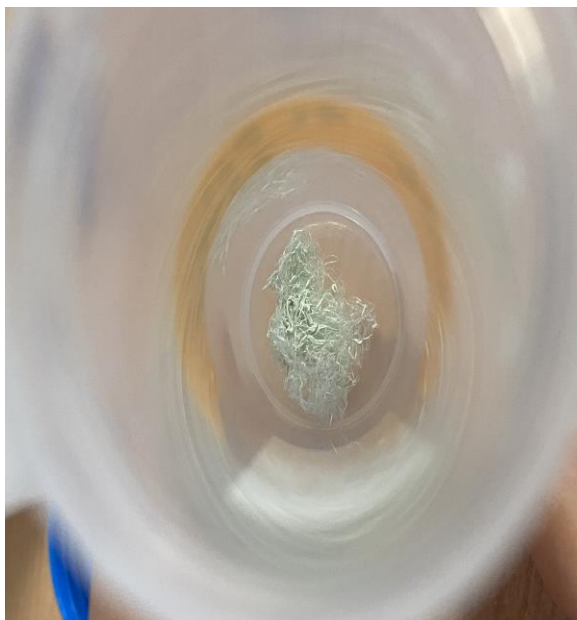


Figura 3-28 Filtro pretratamiento



Figura 3-29 Muestras con 1 hora de agitación

Se seleccionaron dos tiempos de exposición para evaluar el efecto de la adsorción del filtro a corto y medio plazo: 1 hora y 6 horas. Tras cada intervalo de tiempo, se procedió a la extracción de 10 mL para su análisis en el fotómetro. Se añadió el reactivo en polvo correspondiente a la determinación del residuo, el cual genera un complejo coloreado que es detectado por el equipo. La intensidad del color es proporcional a la cantidad de residuo presente en la muestra.

El fotómetro de la Figura 3-30 destaca por su capacidad para almacenar datos y registrar resultados, lo que facilita el análisis y seguimiento de las mediciones. Su versatilidad y precisión lo convierten en

una herramienta ideal para el análisis de agua en contextos de investigaciones científicas y control de calidad.



Figura 3-30 Fotómetro multiparámetro

3.4.4 Evaluación de las propiedades hidrofóbicas

El comportamiento hidrofóbico/hidrofílico de las muestras se ha evaluado mediante el ensayo de la gota utilizando un goniómetro de la marca Ossila (ver Figura 3-31) situado en el laboratorio de caracterización del edificio de investigación del CUD-ENM. La metodología del ensayo es la siguiente; un trozo de la fibra se extiende sobre la plataforma del medidor. A continuación, mediante una pipeta de precisión de volumen ajustable se deposita sobre la malla de fibras una gota de $10\ \mu\text{L}$ de volumen. Finalmente se toma la medida del ángulo de contacto mediante la cámara y el software del equipo de medida.



Figura 3-31 Goniómetro Ossila

3.4.5 Caracterización química de las fibras

La caracterización química de las muestras de las distintas fibras producidas en el presente TFG mediante la técnica de *electrospinning* se ha realizado mediante espectrometría de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), cuyos ensayos han sido realizados por el Grupo de Aplicaciones

Industriales de la Universidad de Vigo (LaserON). El dispositivo utilizado ha sido un FTIR Cary 630 de Agilent (ver Figura 3-32). La metodología seguida para llevar a cabo las mediciones ha sido la siguiente:

- Cortar trozos de aproximadamente 25 x 25 mm de las muestras a medir. No es necesario ningún tratamiento previo sobre la muestra.
- Limpiar con acetona la cubierta del dispositivo
- Adquirir la señal de fondo (*background*) previamente a la medida, para eliminarla de la misma.
- Colocar la muestra en la zona de medida del dispositivo y fijarla.
- Realizar la medida.



Figura 3-32 Sistema de caracterización FTIR. Cortesía Laseron (Uvigo)

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de los ensayos

4.1.1 Ensayos de filtros

En este primer apartado se procederá a la interpretación de los resultados obtenidos, buscando inicialmente una ventana de trabajo para la obtención de las fibras. A modo de resumen, se indican las variables ensayadas para la fabricación de las membranas (Tabla 4-1). A partir de estos, se ha llevado a cabo una evaluación preliminar, de la cual se ha seleccionado una muestra representativa de 50 ensayos que han dado lugar a la formación de una capa fibrosa con propiedades filtrantes, apta para su posterior análisis. Dichas capas serán sometidas a un examen detallado con el microscopio del laboratorio, con el propósito de caracterizar la morfología, observar en detalle las fibras y la estructura. Los datos extraídos de este análisis servirán como base para futuros desarrollos con las algas en el proceso de dopaje, con el fin de optimizar las propiedades funcionales de los filtros biodegradables.

Parámetro	Valores utilizados
Tipo de PCL	Mn 14000, Mn 80000
% de PCL	5%,10%,15%,20%
Velocidad de la bomba	0,5 ml/h, 1 ml/h, 2 ml/h, 4 ml/h, 8 ml/h
Voltaje aplicado	5 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV, 25kV

Tabla 4-1 Configuraciones ensayos

PCL 80000										PCL 14000											
	% PCL	5					10					15					20				
vel.bomba	Voltaje	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
0.5					Green				Green						Green					Red	
1		Red	Red	Green	Red			Green	Green												
2		Red	Red	Green	Green			Green	Green	Red			Green	Green	Green	Green	Red	Red	Red	Green	Red
4		Red	Green	Green	Red		Green	Green	Green	Red			Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Green	Green
8		Red	Green	Green	Green			Green	Green				Green	Green	Green	Green	Red	Red	Green	Red	Red
	% PCL	5					10					15					20				
vel.bomba	Voltaje	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25	5	10	15	20	25
0.5																				Red	
1								Red													
2		Red	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
4		Red	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red
8		Red	Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red		Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red

Tabla 4-2 Ensayos experimentales

4.1.2 Influencia de la cantidad de PCL

Los ensayos realizados con PCL 80000 han demostrado una mayor eficiencia en la formación de fibras, en comparación con PCL 14000, especialmente cuando se trabaja en los rangos de voltaje y velocidad de bomba intermedios y altos.

Con PCL 14000, se observa una tendencia hacia la formación deficiente de fibras, lo que resulta en un mayor número de ensayos fallidos (representados en rojo en la Tabla 4-2). Esta tendencia es especialmente evidente en la mayoría de las combinaciones de voltaje y velocidad de bomba, indicando que este peso molecular no resulta óptimo para la obtención de fibras. Estos resultados resaltan la importancia de seleccionar un peso molecular adecuado del polímero en función de los parámetros de procesamiento. En definitiva, el uso de PCL 80000 se presenta como la opción más factible para lograr estabilidad y calidad en las fibras.

Para la siguiente tanda de ensayos con microalgas, se ha escogido el PCL 80000 debido a sus mejores resultados.

Además, en los ensayos con PCL 80000, la separación de la malla de fibras del papel de aluminio resulta más sencilla en comparación con los ensayos efectuados con PCL 14000 como se muestra en la Figura 4-1.

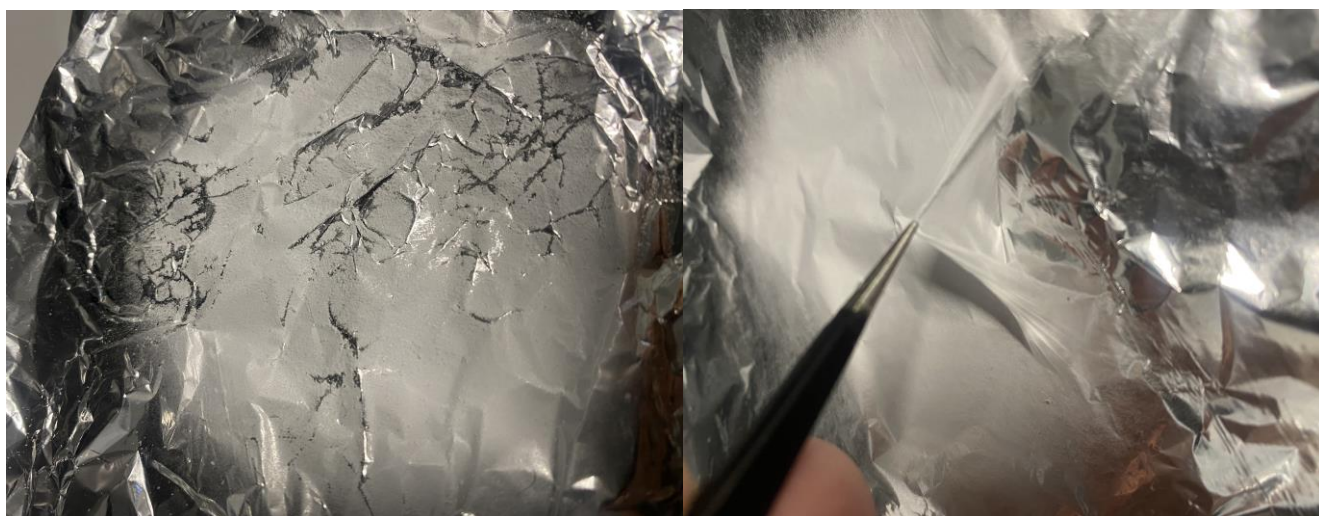


Figura 4-1 Ensayo con 14000 PCL, 5%wt(izquierda) Ensayo con 80000 PCL, 5%wt (derecha)

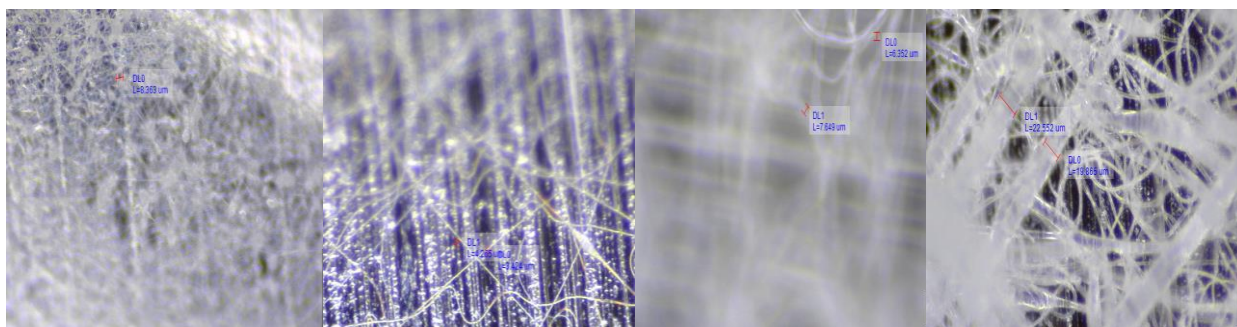


Figura 4-2 Influencia de la cantidad de % wt PCL, de izquierda a derecha (5% wt PCL,10%wt PCL,15% wt PCL,20% wt PCL)

En la Figura 4-2 se puede observar claramente la influencia del porcentaje en peso (% wt) de PCL en las fibras obtenidas. En los ensayos realizados con un 5 % de PCL, se evidencia que el flujo de fibra es mínimo y poco definido. Sin embargo, a medida que el contenido de PCL se incrementa, el flujo de fibra se vuelve más evidente y el diámetro de las fibras tienden a aumentar de manera progresiva.

En particular, en los ensayos con un 10 % de PCL, el diámetro de las fibras oscila entre los 3 y 5 micrómetros. Por otro lado, al aumentar la concentración a un 15 %, el diámetro de las fibras se sitúa en torno a 6,35 y 7,34 micrómetros. Este comportamiento sugiere que, manteniendo constantes los parámetros de procesamiento y modificando únicamente la concentración de PCL, el diámetro de las fibras experimenta un incremento proporcional al aumento de la concentración de PCL.

No obstante, conforme se incrementa la viscosidad del fluido, resulta necesario aumentar la intensidad del campo eléctrico. De lo contrario, la formación de fibras no uniformes y la aparición de múltiples hilos desorganizados pueden derivar en la obstrucción del electrodo, lo que obliga a detener el proceso para evitar daños o defectos en las fibras obtenidas.

Finalmente, las fibras de mayor diámetro son aquellas que presentan la concentración más elevada de PCL, alcanzando un 20 % en peso. Este resultado confirma la relación directa entre el contenido de PCL y el diámetro de las fibras, evidenciando la importancia de ajustar cuidadosamente la concentración del polímero y los parámetros de procesamiento.

4.1.3 Efecto de la velocidad de inyección de la bomba en el proceso

El análisis de los ensayos con PCL 80000 ha permitido identificar que las velocidades intermedias de la bomba, en torno a 2 mL/h y 4 mL/h, favorecen significativamente la formación de fibras (color verde en la Tabla 4-2). En contraste, tanto las velocidades bajas (0,5 mL/h) como las altas (8 mL/h) han mostrado un comportamiento en los ensayos irregulares, con varios ensayos sin deposición. Esto indica que caudales excesivamente reducidos o elevados comprometen la estabilidad del proceso de electrohilado.

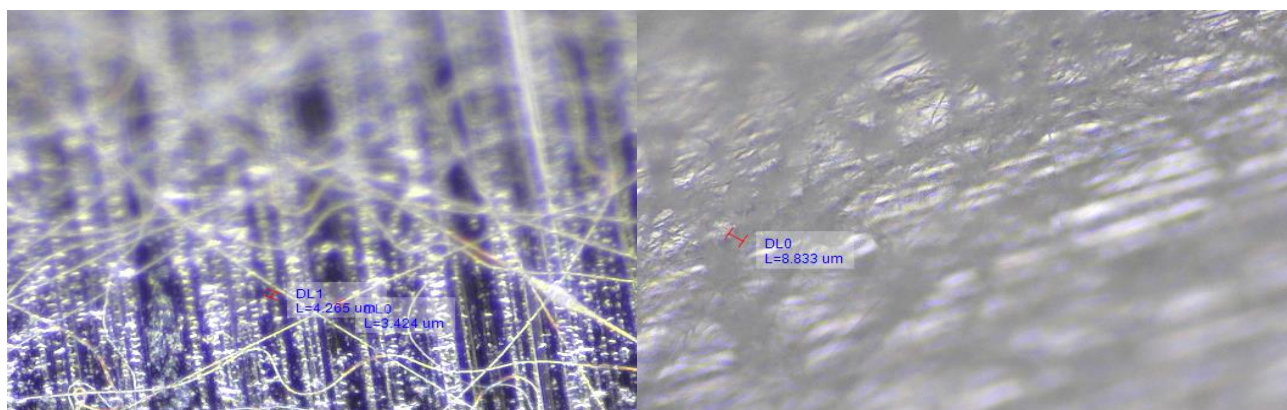


Figura 4-3 2 ml/h (izquierda) 4 ml/h(Derecha)

Además, se ha identificado una clara relación entre la velocidad que imprime el émbolo de empuje y el diámetro de las fibras obtenidas: a menor velocidad se aprecia un diámetro más reducido (Figura 4-3), con una velocidad de 2 mL/h y 4 mL/h, respectivamente, mientras que un aumento en la velocidad provoca un mayor estiramiento de la solución polimérica. Estos resultados nos ponen de manifiesto que la velocidad de bombeo es un factor importante ante la producción y elección de la fibra.

4.1.4 Impacto del voltaje aplicado

El voltaje en los ensayos de PCL 80000 se ha determinado que el intervalo de voltaje comprendido entre 10 kV y 20 kV es el más idóneo para la formación de fibras (Figura 4-4). Se observó que los valores extremos, como 5 kV y 25 kV, han mostrado una mayor incidencia de fallos.

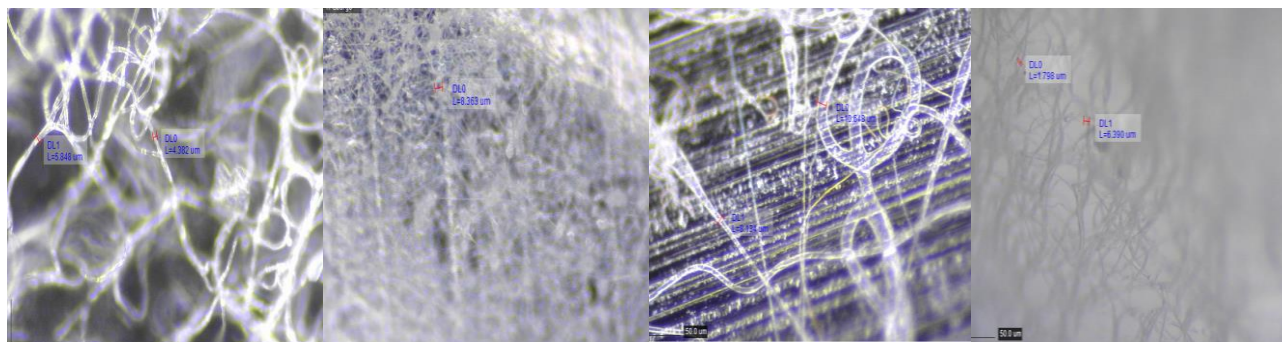


Figura 4-4 Evolución de la morfología de las fibras en función del voltaje aplicado (de izquierda a derecha; 5kV, 10kV, 15kV y 20kV)

Por otro lado, en el caso del PCL 14000, se ha evidenciado una mayor inestabilidad en todos los rangos de voltajes. Sin embargo, se observa en la Tabla 4-2, la formación de fibras en condiciones específicas, particularmente a 20 kV con una velocidad de bomba de 4 mL/h. Este resultado sugiere que, la combinación de un voltaje elevado con un caudal intermedio podría favorecer la producción.

Como se muestra en la Figura 4-5, en los ensayos con PCL 14000 y un alto voltaje, se dificultaba la salida de la mezcla por la aguja.



Figura 4-5 Taponamiento del fluido en electrodo



Figura 4-6 Ensayo PCL 80000, 25 kV

4.1.5 Condiciones óptimas preliminares

Los resultados sugieren que, para la obtención de fibras mediante electrohilado con las soluciones empleadas, PCL 80000 presenta mayores posibilidades de éxito, con condiciones óptimas preliminares en torno a:

- Velocidad de la bomba: 2-4 mL/h
- Voltaje: 10-20 kV

En cambio, PCL 14000 parece requerir condiciones más específicas y restringidas, como velocidades intermedias y voltajes altos (20 kV), para obtener fibras, lo que indica mayor complejidad en su procesamiento.

4.1.6 Resultados globales ensayos PCL

De los 120 ensayos realizados, solo 50 fueron exitosos en la obtención de fibras, lo que refleja la complejidad y sensibilidad del proceso de electrohilado frente a la variación de parámetros como el peso molecular del polímero, el voltaje aplicado y la velocidad de alimentación.

Estos resultados preliminares permiten delimitar un espacio experimental más reducido y optimizado para futuros ensayos, evitando las combinaciones de parámetros que mostraron mayor tasa de fallos.

Por lo tanto, se podría concluir que los ensayos con microalga sería de mejor opción escoger el PCL de 80000, un rango de bomba de entre 15-25 kV y una velocidad de caudal de 2-4 mL/h.

4.2 Evaluación de parámetros de ensayo y su influencia en propiedades

En este apartado mediante la Tabla 4-3 se van a estudiar la influencia que tiene distintos parámetros en el ensayo.

Parámetro	Característica que aporta
Concentración de la solución	Determina la viscosidad y fluidez de la solución, afectando el diámetro y la continuidad de fibras
Voltaje	Influye en la formación del chorro de Taylor, afectando el diámetro de las fibras
Distancia entre el colector y la aguja	Tiempo de secado y estiramiento de las fibras, influyendo en su diámetro y uniformidad
Tensión superficial	Condiciona la estabilidad del chorro, influyendo en la formación de gotas o fibras
Humedad y temperatura	Modifica el secado

Tabla 4-3 Parámetros de ensayo

4.3 Diseño experimental con algas comerciales

A partir de las definiciones utilizadas en el apartado 3.3.3, se muestra a continuación la Tabla 4-4.

%ALGA	%PCL	V(kV)
2	16	20
2	12	25
2	12	15
2	8	20
1,25	16	25
1,25	16	15
1,25	12	20
1,25	12	20
1,25	12	20
1,25	8	25
1,25	8	15
0,5	16	20
0,5	12	25
0,5	12	15

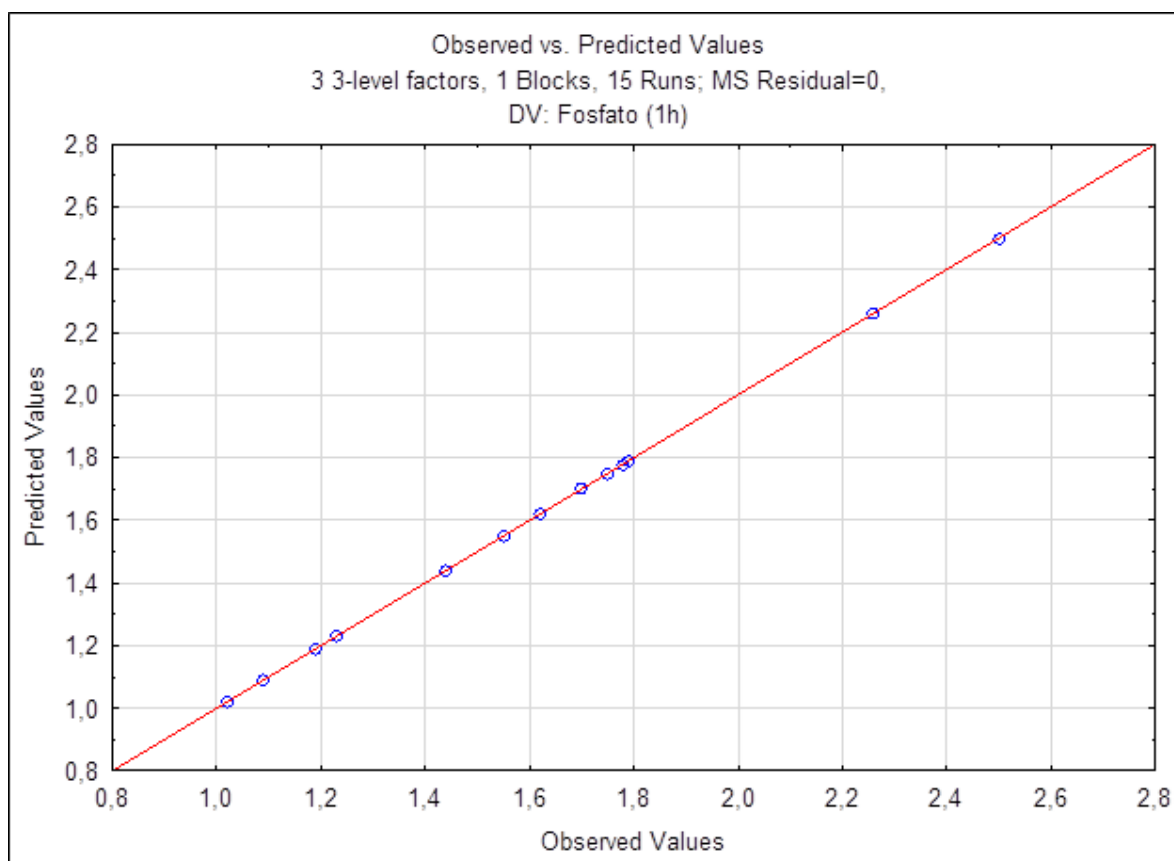
0,5	8	20
-----	---	----

Tabla 4-4 Ensayos realizados mediante el procedimiento Box-Behnken

Comenzando con el análisis detallado sobre el comportamiento de las fibras combinadas con microalgas en relación con su capacidad de adsorción. Se diseñó una serie de 15 ensayos experimentales que combinan distintas concentraciones de PCL y de espirulina, con el objetivo de evaluar su influencia en la absorción del fosfato, nitrato y cobre a lo largo del tiempo.

4.3.1 Efecto de las fibras en la eliminación de fosfato (1 hora)

La Figura 4-7 muestra la relación entre los valores observados y los valores predichos para la adsorción de fosfato después de una hora. El análisis se realizó con 15 ensayos experimentales, utilizando tres factores a tres niveles, con un residuo cuadrático medio (MS Residual) de 0. Esto indica que el modelo tiene una alta precisión en la predicción de los valores de fosfato en las muestras.

**Figura 4-7 Resultados valores observados vs valores predichos (fosfato 1 hora)**

La línea roja representa los valores que el modelo predice para resultados de todos los experimentos en el intervalo de 1 hora. La proximidad de los puntos azules a la línea roja indica el grado de ajuste del modelo: cuanto más cercanos estén, menor será el error y, por ende, más preciso será el modelo en la estimación de los valores reales. Como podemos observar la mayoría de los puntos se encuentran sobre la línea roja (Figura 4-7), lo que sugiere que los datos se ajustan bien al modelo utilizado.

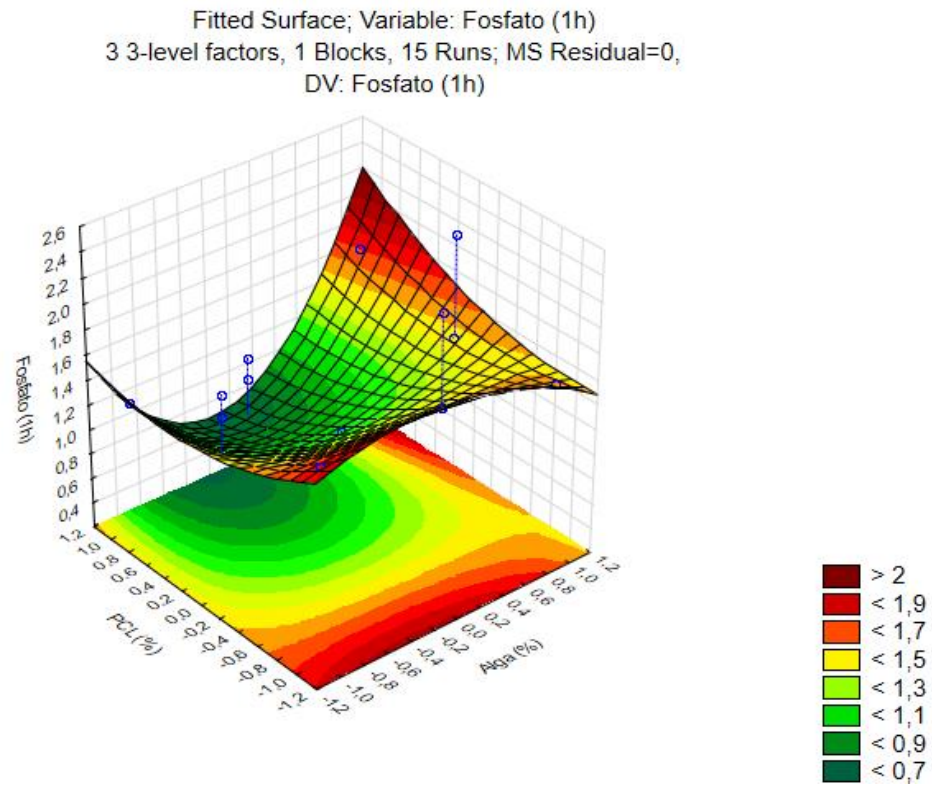


Figura 4-8 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 1 hora, variable el voltaje

Las superficies de respuesta (Figura 4-8), muestra la importancia relativa de los factores y sus interacciones en la reducción de fosfato en las aguas analizadas. Por un lado, se analiza el efecto del PCL y el alga sobre la reducción de fosfatos, manteniendo el voltaje en su punto medio. La modelización indica que los mejores resultados de adsorción se obtienen cuando el PCL (%) se encuentra en mayor cantidad (16%) y el alga se encuentra en valores intermedios (1,25%).

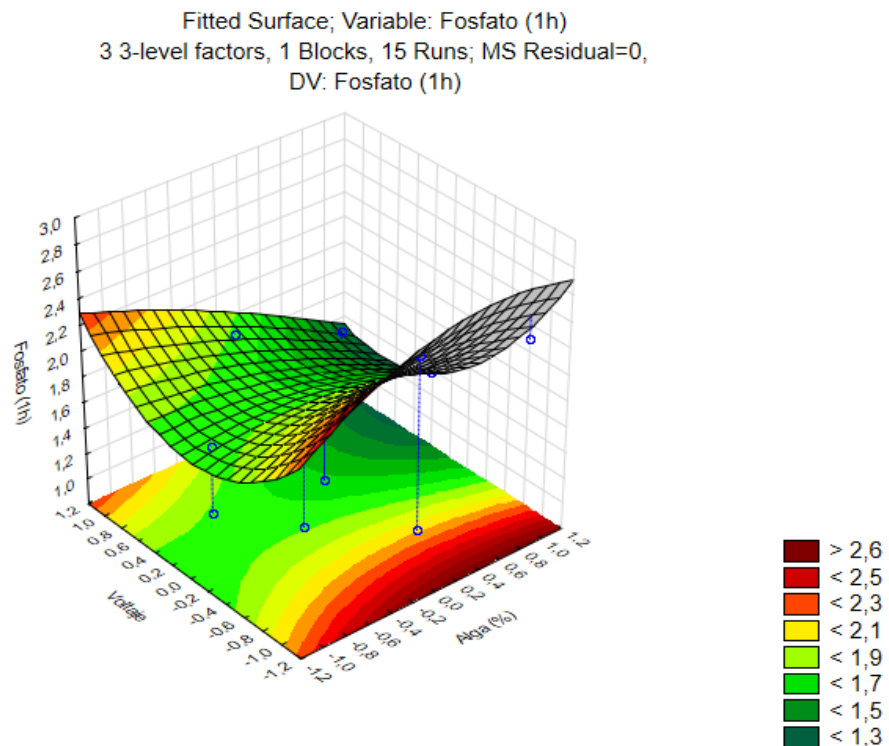


Figura 4-9 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 1 hora, variable el PCL

Por otro lado, se modelizó el efecto de la presencia de PCL en la adsorción. La Figura 4-9 representa el efecto del alga frente al voltaje, manteniendo el PCL en su mínimo valor. Se interpretan los resultados como una adsorción no tan precisa, dentro de este gráfico, los peores resultados se aprecian en los casos en que los voltajes son elevados y se configuran gran cantidad de alga. La reducción del PCL da como resultado la formación de una fibra de menor densidad y consistencia que reduce el porcentaje de fosfato adsorbido.

4.3.2 Efecto de las fibras en la eliminación de fosfato (6 horas)

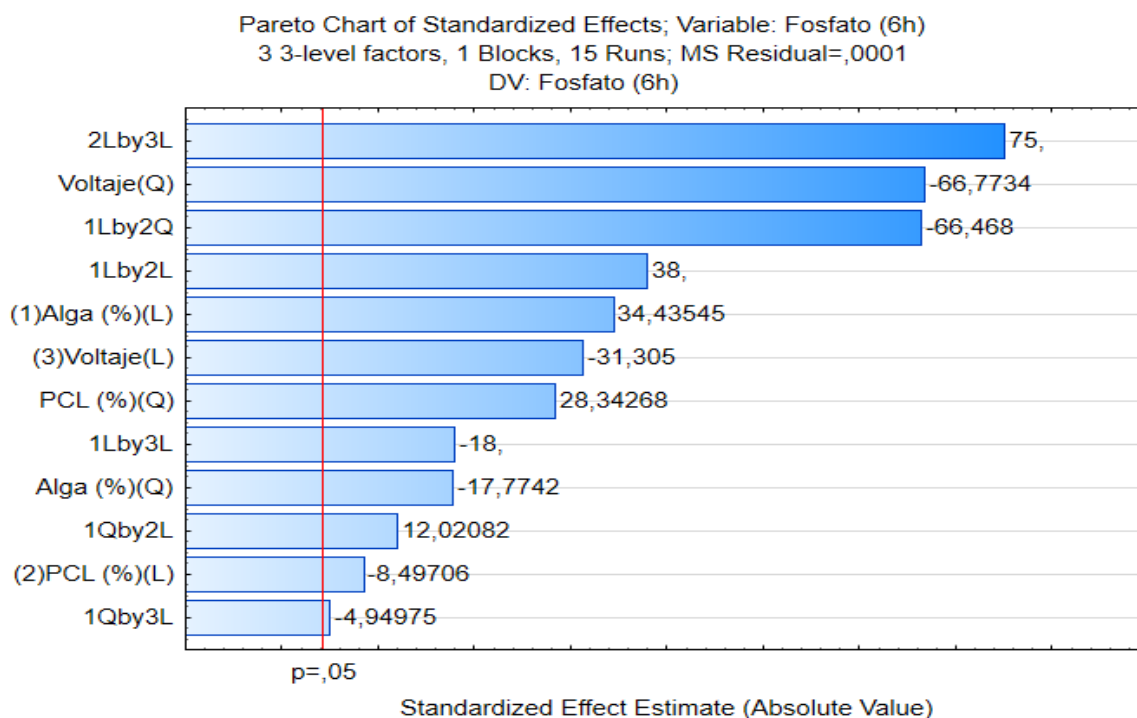


Tabla 4-5 Diagrama de Pareto de efecto estandarizado

El gráfico de Pareto muestra la importancia relativa de los efectos y sus interacciones en la reducción del fosfato a las seis horas de adsorción. Como se muestra en el diagrama de Pareto de la Tabla 4-5, para que las variables tengan un impacto significativo en la eliminación de fosfato, el valor tiene que estar a la derecha de la línea roja que es el parámetro estadístico p , que nos marca un nivel de significatividad del 5%. El que más afecta positivamente es el alga de manera lineal (L), posicionándose como el primero de las tres variables. A continuación, le seguiría el voltaje también de forma lineal. En último lugar, pero que cuenta con influencia estaría el PCL.

En la siguiente Figura 4-10, nos muestra la comparación de los valores obtenidos y las predicciones.

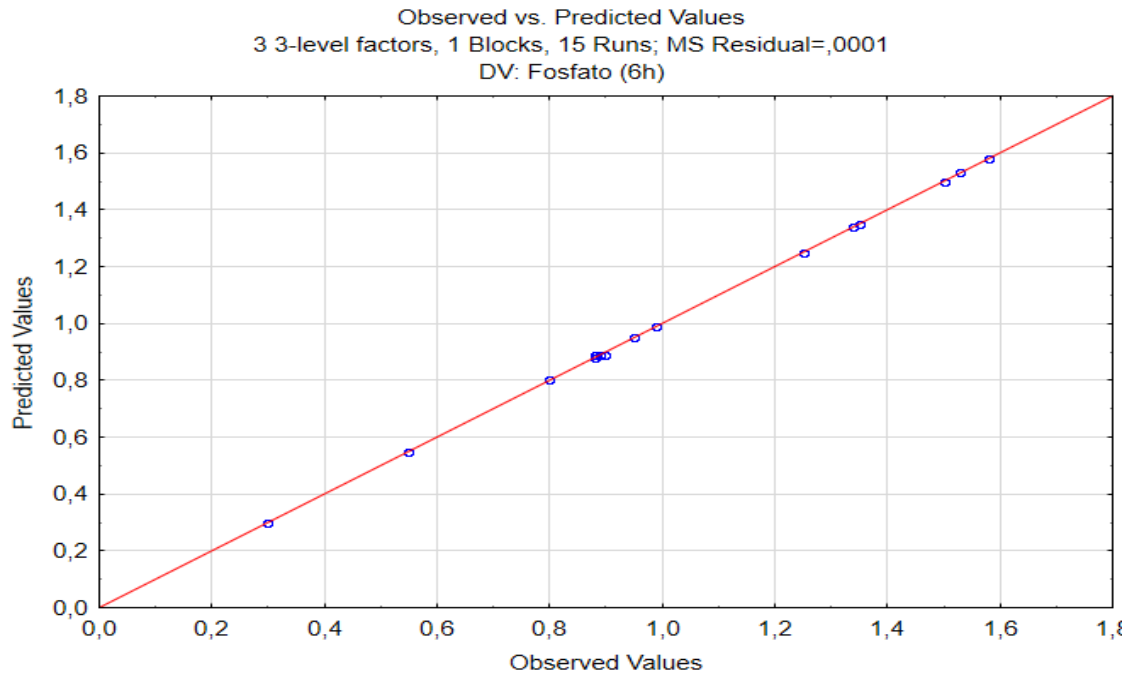


Figura 4-10 Resultados observados vs resultados predichos (fosfato 6 horas)

La línea roja representa los valores estimados por el modelo para los resultados de todas las combinaciones posibles de las variables independientes (alga, voltaje y PCL) en el espacio de diseño experimental. La proximidad de la mayoría de los puntos experimentales a la línea de predicción indica una alta precisión del modelo ajustado, sugiriendo que la respuesta observada en los ensayos experimentales se ajusta estrechamente a los valores previstos por el modelo. Esto evidencia una baja varianza residual y una concordancia significativa entre los datos empíricos y las predicciones teóricas, lo que respalda la robustez y capacidad predictiva del modelo.

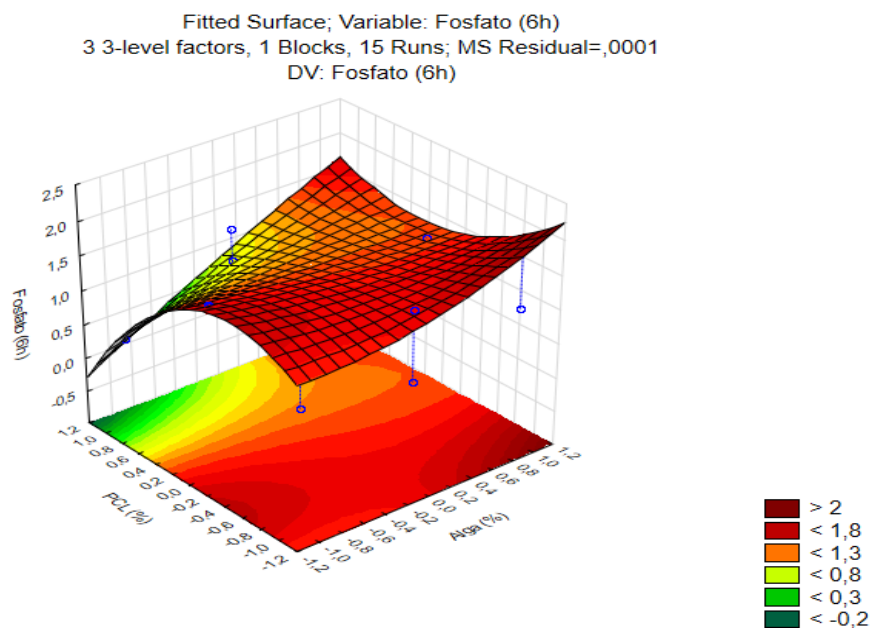


Figura 4-11 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 6 horas, variable el voltaje

Como se muestra en la Figura 4-11, cuanto mayor sea la cantidad de PCL y menor la del alga, habrá una mejor adsorción del residuo. Concretamente en valores como 16 % de PCL y una cantidad de alga de 0,5.

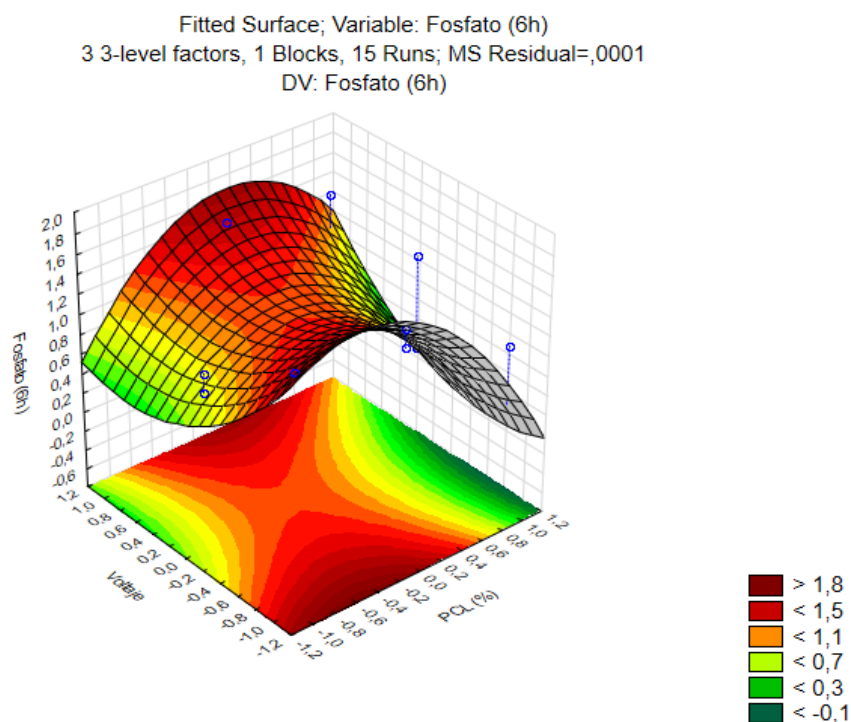


Figura 4-12 Superficie de contorno para la eliminación de fosfato en 6 horas, variable el alga

En esta ocasión se puede observar en la Figura 4-12, que se registran mucho mejores resultados en los momentos que el PCL se encuentra en mayor cantidad y el voltaje disminuye al mínimo (10 kV).

Los resultados obtenidos para la eliminación de fosfato tras 6 horas de tratamiento muestran que el porcentaje de alga tuvo un efecto positivo significativo ($p = 0.000842$), con un coeficiente de 0.128333. Esto indica que un incremento en la cantidad de alga favorece la eliminación de fosfato, lo cual es consistente con estudios previos que destacan la capacidad de bioadsorción de algas para la eliminación de nutrientes en sistemas acuáticos contaminados.

Además, el modelo ajustado presentó un R-cuadrado de 0.99, lo que sugiere que la variabilidad en la respuesta puede explicarse en su mayor parte por los factores analizados. La baja variabilidad residual refuerza la fiabilidad del modelo, lo que permite predecir el comportamiento del sistema ante diferentes combinaciones experimentales.

4.3.3 Efecto de las fibras en la eliminación de nitratos (6 horas)

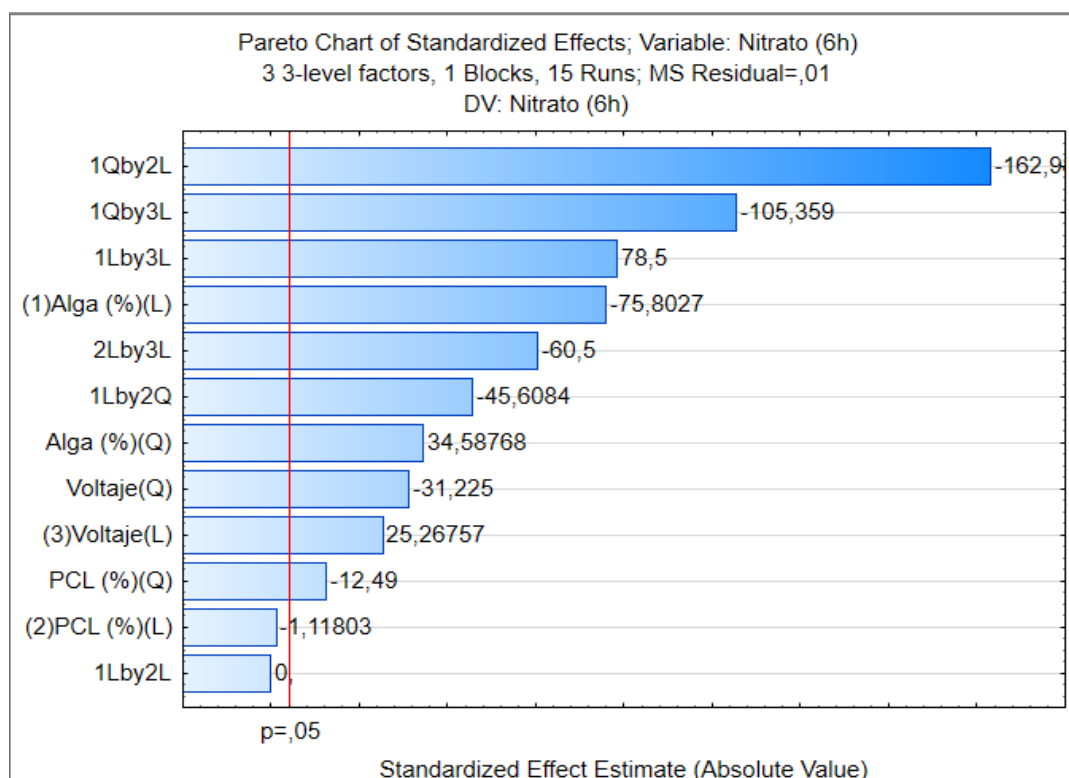


Tabla 4-6 Diagrama de Pareto de efecto estandarizado

En la Tabla 4-6, se muestra que la interacción cuadrática del alga y el término lineal del PCL tiene el mayor efecto negativo en la adsorción de nitrato. El alga muestra también un efecto negativo significativo, indicando que es la variable independiente que ejerce un mayor efecto en la reducción de nitrato en las muestras.

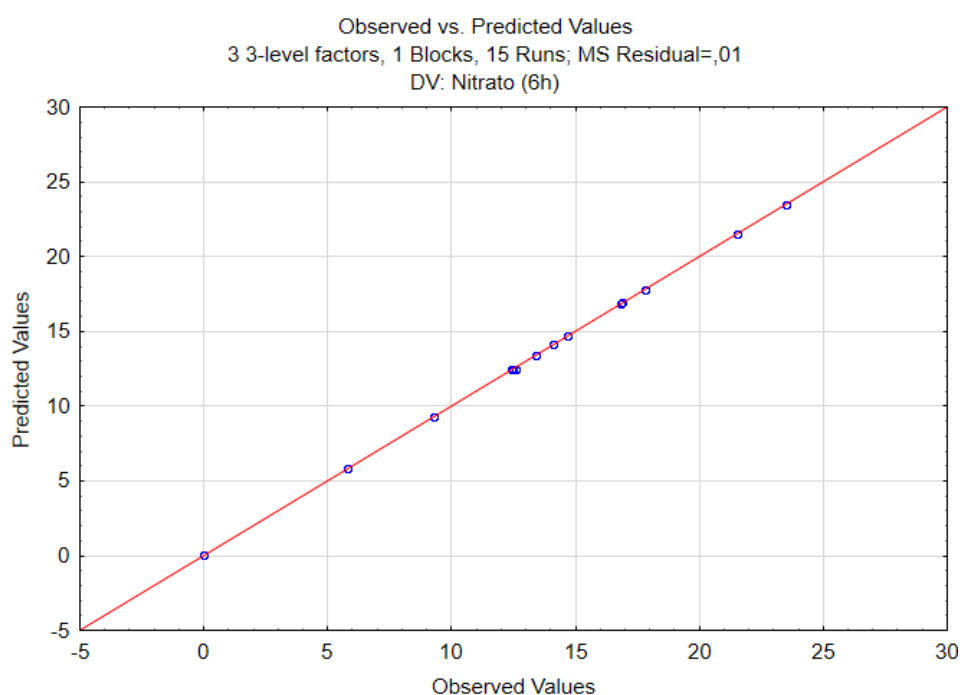


Figura 4-13 Resultados observados vs resultados predichos (nitrato 6 horas)

Como también ocurría en apartados anteriores los resultados medidos en el laboratorio son muy similares a los predichos por el programa, ya que presentan todas las mediciones en la línea roja o desviación mínima (Figura 4-13).

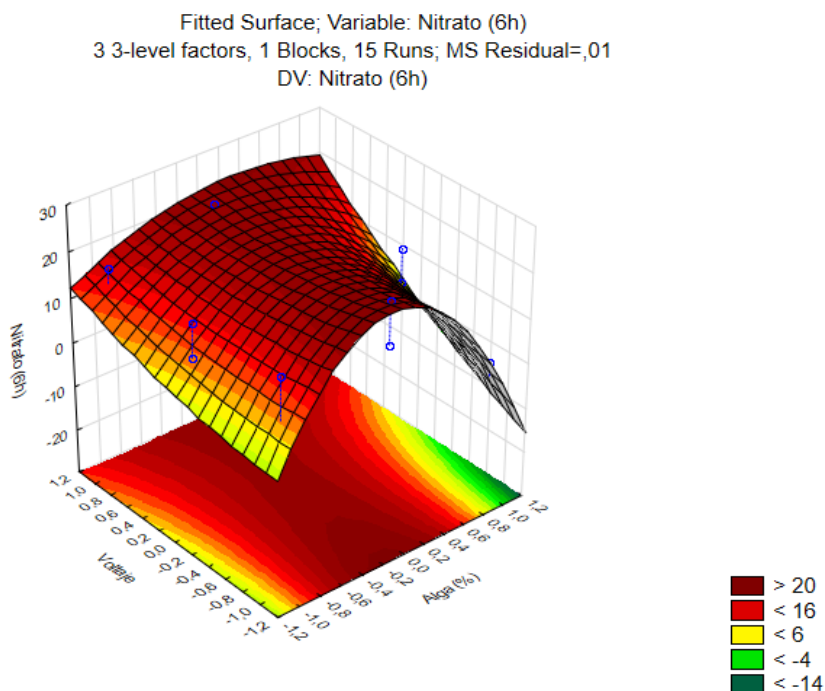


Figura 4-14 Superficie de contorno para la eliminación de nitrato en 6 horas, variable el PCL

En la Figura 4-14, se observa el efecto del alga y el voltaje en la reducción del nitrato, manteniendo el PCL en su mínimo valor. En estas condiciones, el efecto del alga es muy significativo y la reducción se produce cuando el alga se encuentra en su mayor valor. Igualmente, los mejores resultados se producen también cuando se aplica voltaje bajo (10 kV).

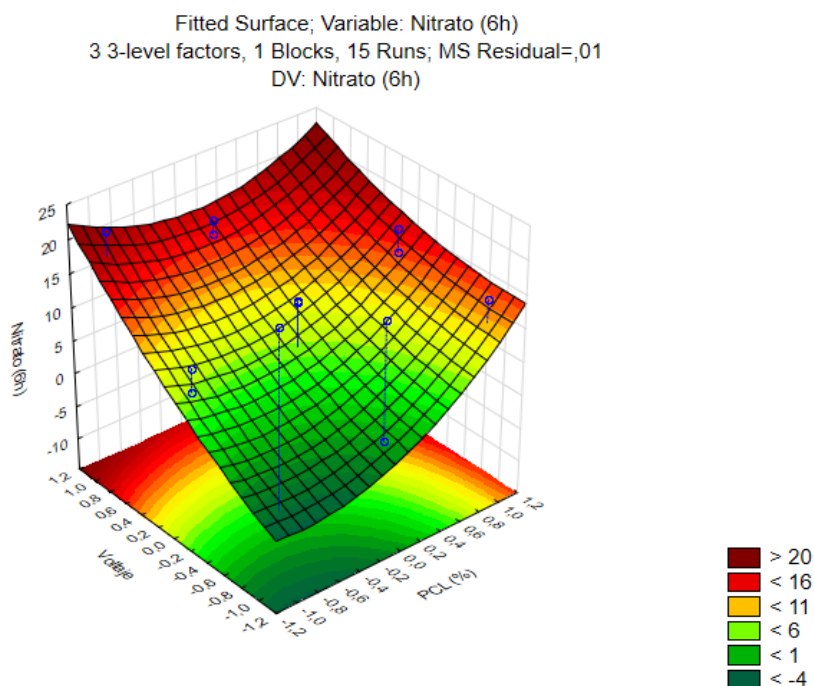


Figura 4-15 Superficie de contorno para la eliminación de nitrato en 6 horas, variable el alga

Cuando se representa el voltaje frente al PCL, con el alga en su máximo valor, se observa que se reduce totalmente la concentración de nitrato. En esta gráfica observamos unos resultados favorables para el alga. En el caso de un voltaje de 10 kV, muy bajo y una cantidad muy pequeña de PCL (Figura 4-15).

4.3.4 Efecto de las fibras en la eliminación de cobre (6 horas)

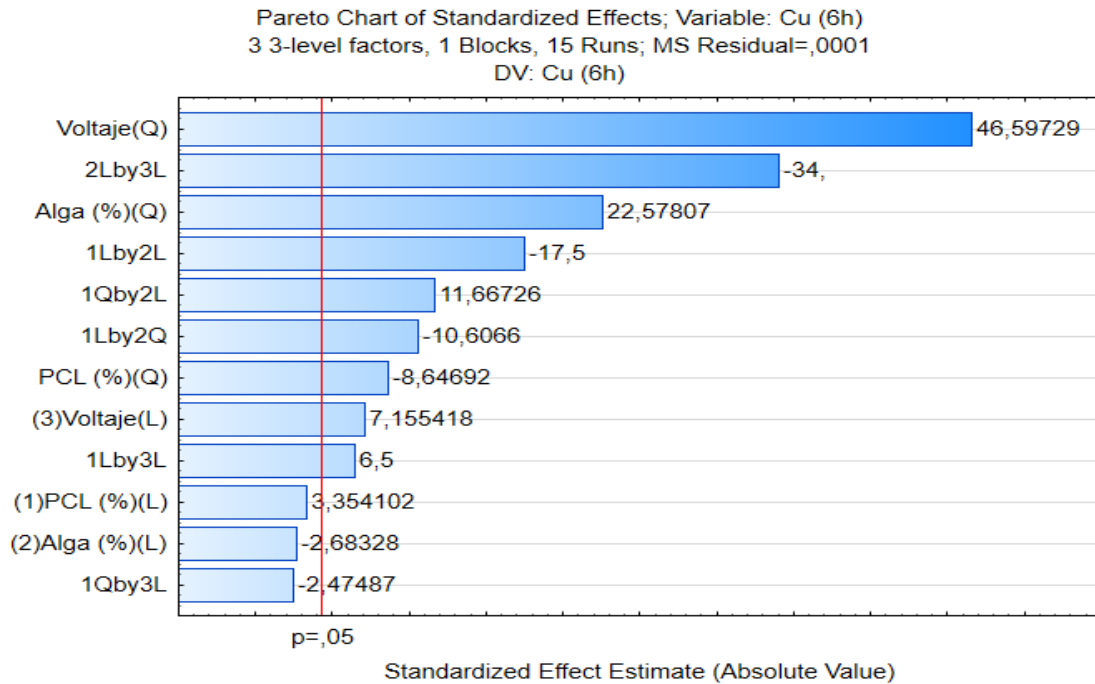


Tabla 4-7 Diagrama de Pareto estandarizado

En la Tabla 4-7, el diagrama de Pareto indica que los términos cuadráticos del voltaje y del alga tienen un impacto significativo en la adsorción de cobre, mientras que el PCL muestra la menor influencia.

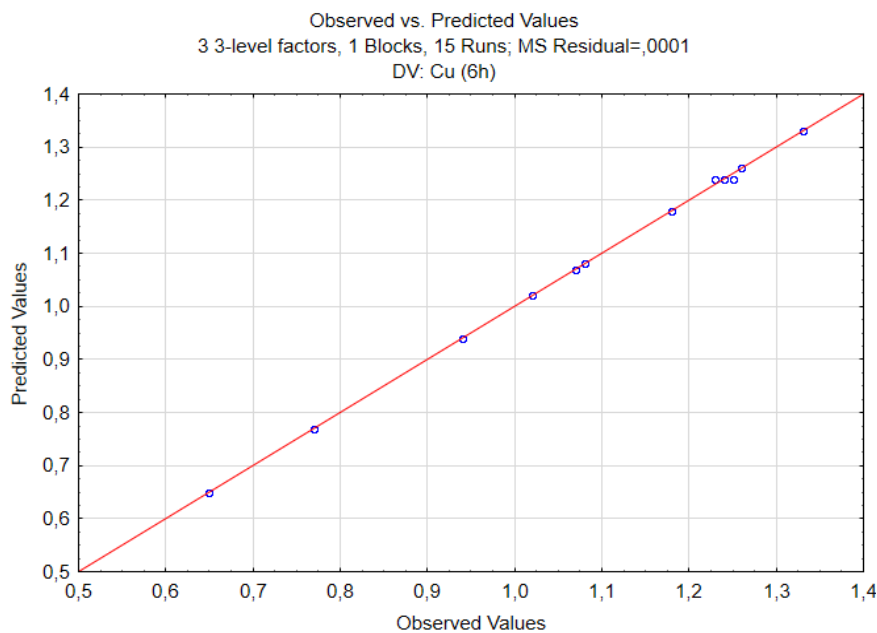


Figura 4-16 Resultados observados vs resultados predichos (cobre 6 horas)

Como también ocurría en apartados anteriores, la línea roja de los resultados predichos es bastante similar que en los observados en los ensayos con el fotómetro. Sólo en dos ensayos se han situado fuera de esta línea, pero relativamente cerca (Figura 4-16).

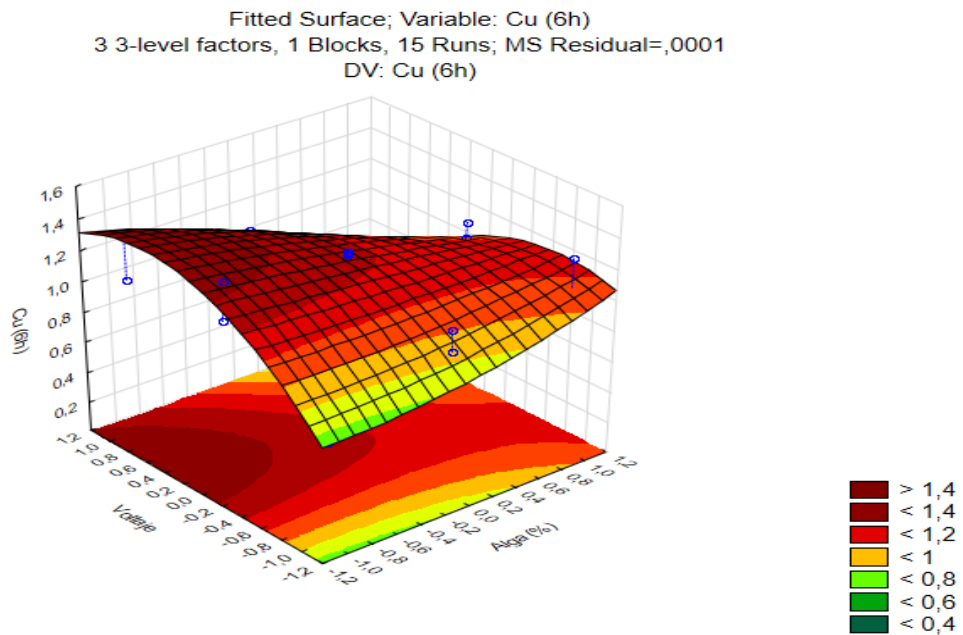


Figura 4-17 Superficie de contorno para la eliminación de cobre en 6 horas, variable el PCL

En esta gráfica, el modelo predice que la eliminación del cobre se producirá cuando haya un menor porcentaje de alga y el voltaje se sitúa en un valor de 10 kV (Figura 4-17).

4.4 Caracterización química de las muestras

En cuanto a la composición química de las muestras, el análisis por FTIR viene a confirmar la presencia de PCL en todas las muestras, con los picos característicos de este material tal y como está ampliamente referenciado en la literatura [62] [63], con picos principales en torno a las posiciones 2950 cm^{-1} , 1730 cm^{-1} y 1293 cm^{-1} (ver Figura 4-18), aparte de otros secundarios de menor intensidad.

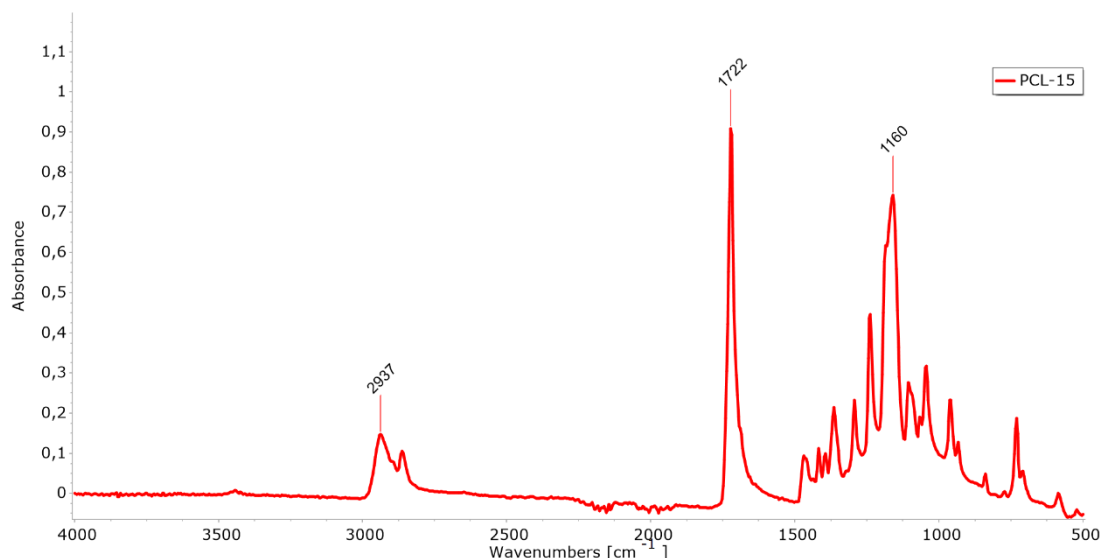


Figura 4-18 Espectro FTIR de muestra de PCL al 15% en peso con los picos principales

La modificación en la cantidad de PCL en la mezcla precursora de las fibras no tiene influencia en su composición final, tal y como se puede apreciar en la Figura 4-19 donde se muestran conjuntamente los espectros de muestras de PCL al 5, 10, 15 y 20 % en peso. La única diferencia apreciable es una menor prominencia del pico en torno a 1200 cm^{-1} para el caso de la muestra de PCL al 5 %wt, debido probablemente a una menor intensidad en la señal de la medida realizada.

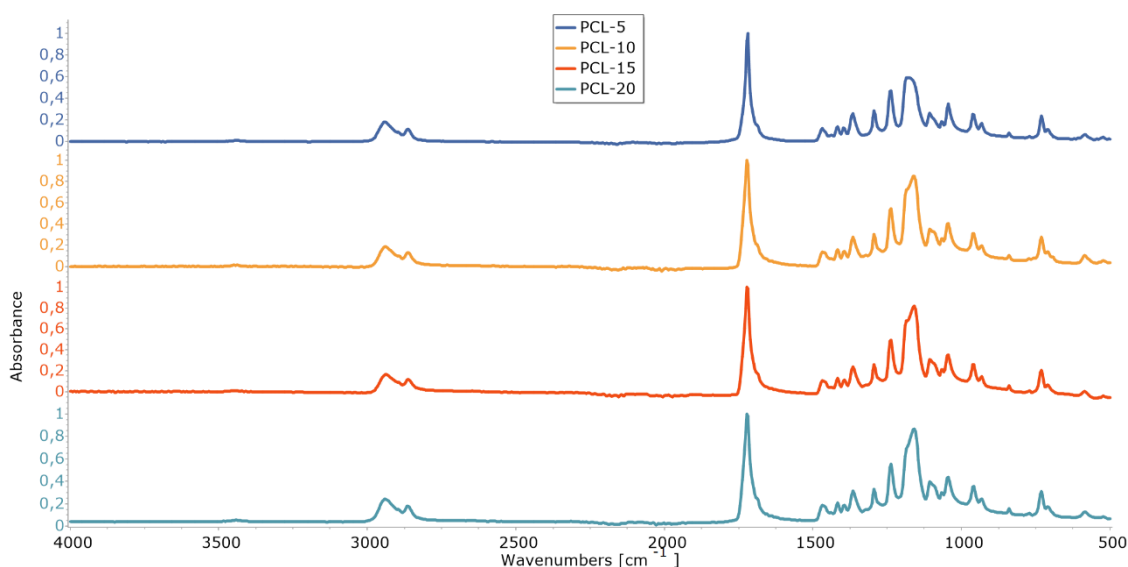


Figura 4-19 Comparativa de los espectros FTIR de las muestras de PCL al 5%wt, 10%wt y 15%wt

En la Figura 4-20 se muestra el espectro FTIR de las muestras de PCL dopadas al 2% con alga verde comercial. Se puede observar que el espectro es prácticamente inestigible del de las muestras sin dopar, lo cual se puede deber fundamentalmente a que los picos que indican la presencia de alga en la muestra se solapan con los del PCL. El alga que se utiliza es básicamente la pared de la misma, compuesta básicamente por enlaces C-O, careciendo por tanto de otros elementos (N, P, CH₃) presentes en células vivas, donde se tienen proteínas, , ácidos nucleicos, etc [64].

Los picos en el entorno de 2930 cm⁻¹ se pueden corresponder con lípidos (CH₃), mientras que los picos entre 1165 y 1110 cm⁻¹ se pueden corresponder con enlaces C-O de la celulosa de las paredes de las algas. Finalmente el pico de 840 cm⁻¹ se puede asignar al C₄-O-S (sulfatos) [65].

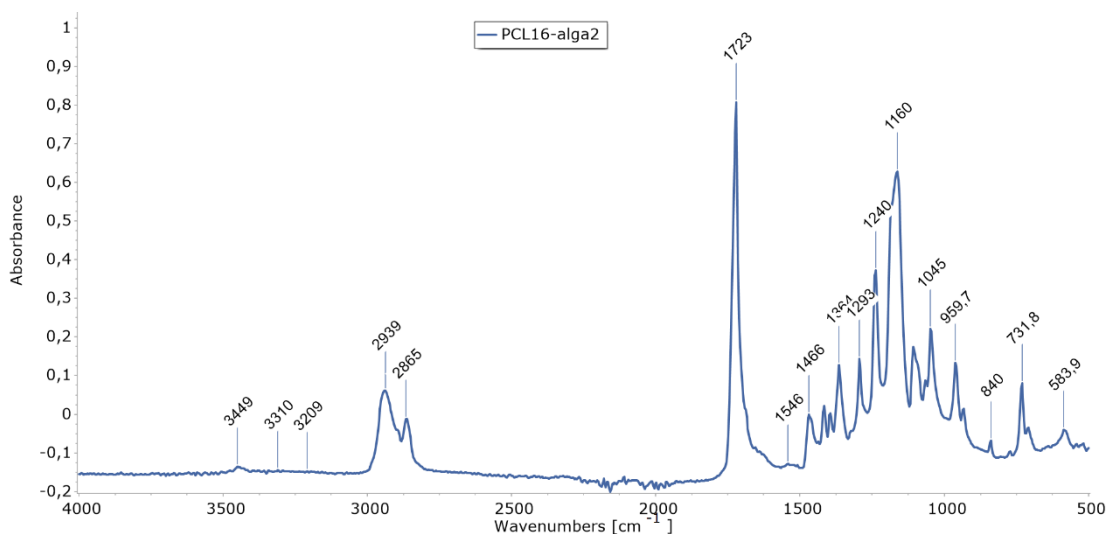


Figura 4-20 Espectro FTIR muestras de PCL con dopaje al 2% en peso de alga

De forma análoga al caso de PCL sin dopar, no se aprecian diferencias entre los espectros FTIR (véase Figura 4-19) para las diferentes cantidades de alga utilizadas (0,5 %, 1,25 % y 2 % en peso).

4.5 Propiedades hidrofóbicas

En cuanto al ángulo de contacto de la superficie de las microfibras (ver Figura 4-21), se tienen valores medios entre 80° y 110° para las fibras sin dopar con algas, lo cual está en concordancia con el comportamiento ligeramente hidrofóbico del PCL recogido en la literatura del tema [66]. En general se aprecian ángulos ligeramente mayores para las muestras de 10 % wt de PCL frente a las muestras al 15 % y 20 %, lo cual se puede explicar por una mayor porosidad de la malla de las primeras, lo cual puede ocasionar que la zona de aire sobre la que se asienta la gota sea mayor y por tanto se tengan un incremento en el ángulo de contacto [67].

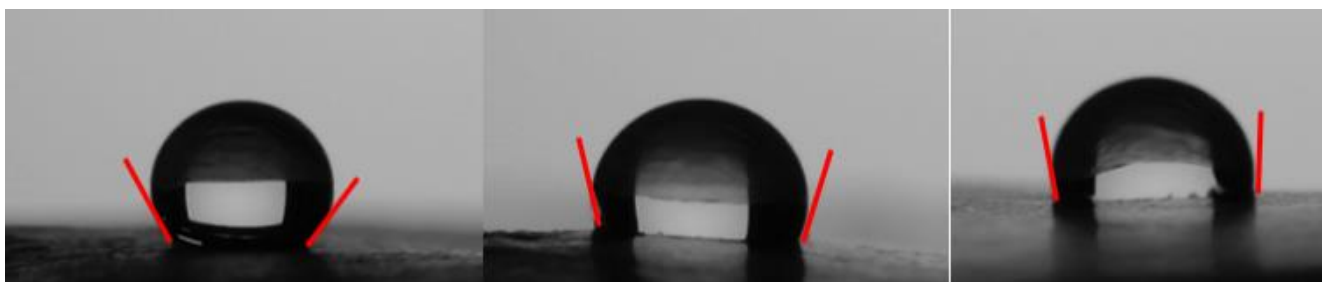


Figura 4-21 Ensayo de la gota sobre PCL sin dopar, de izquierda a derecha al 10 % wt, 15 %wt y 20 %wt) sin dopar

Para las muestras de PCL dopadas con algas no se ha obtenido ningún ángulo de contacto, pues las gotas utilizadas para los ensayos son absorbidas de forma inmediata y en su totalidad por la malla de fibras dopadas, en la Figura 4-22 se puede observar este hecho y su comparación con el comportamiento de la gota en las mallas de PCL sin dopar. Una explicación a este fenómeno puede ser que la presencia de las algas se traduce en una cantidad suficiente de celulosa (pared del alga muerta) que provoca la absorción del agua. Este resultado es positivo de cara a la capacidad de las mallas de fibras de filtrar los contaminantes del medio acuoso, ya que un comportamiento marcadamente hidrofóbico provoca un rechazo del fluido adyacente (el fluido no moja la fibra) impidiendo que la fibra retenga los contaminantes. El que las fibras dopadas con algas tengan un comportamiento claramente hidrofílico (el fluido moja la fibra) permite que el agua se introduzca en la totalidad de las microfibras, aumentando el área de contacto fibra-agua, y por tanto aumentando la capacidad de absorber contaminantes.



Figura 4-22 Ensayo de la gota con fibras de PCL dopadas con algas (izquierda) y sin dopar (derecha)

4.6 Diseño experimental con algas cultivadas en el laboratorio

A continuación, se procedió a la fabricación de los filtros mediante el proceso de electrohilado, seleccionando los parámetros más relevantes obtenidos a partir de los distintos ensayos realizados. Estos valores han sido organizados y definidos de la siguiente manera:

- Voltaje: 10 kV, 15 kV y 20 kV.
- Velocidad de la bomba: 2 ml/h y 4 ml/h.
- Contaminantes para evaluar:
 - Cobre (Cu)
 - Fosfato (PO_4^{3-})
 - Nitrato (NO_3^-)

Uno de los objetivos fundamentales de este estudio es profundizar en el tratamiento de esta alga cultivada en laboratorio, la cual ha sido desarrollada específicamente para su posterior utilización en un proceso de filtración más natural y sostenible. Además, se pretende establecer una comparación con el comportamiento de la espirulina (alga comercial) y analizar cómo las propiedades inherentes de esta alga afectan la capacidad de absorción y purificación de aguas residuales.

Este enfoque permitirá no solo evaluar la eficiencia de los filtros biodegradables desarrollados, sino también comprender mejor el papel de los materiales naturales en el tratamiento de aguas contaminadas.

Los resultados que se muestran en de las mediciones se realizaron tras 6 horas de agitación y posteriormente medidas con el fotómetro (Tabla 4-8).

Voltaje	Velocidad	Cobre	Fosfato	Nitrato
10 kV	2 ml/h	0,76 mg/L	1,5 mg/L	1,4 mg/L
	4 ml/h	0,56 mg/L	0,46 mg/L	12,1 mg/L
15 kV	2 ml/h	0,76 mg/L	0,036 mg/L	30 mg/L
	4 ml/h	0,48 mg/L	0,28 mg/L	10 mg/L
20 kV	2 ml/h	0,57 mg/L	0,7 mg/L	16,2 mg/L
	4 ml/h	0,44 mg/L	0,92 mg/L	14,1 mg/L

Tabla 4-8 Resultados medición del alga cultivada en laboratorio tras 6 horas de agitación

4.6.1 Comparación de resultados con alga espirulina

Los resultados para el fosfato y el cobre en las muestras de alga criadas en el laboratorio son bastante consistentes y positivos. Los valores de fosfato varían entre 0,036 mg/L y 1,5 mg/L. La velocidad de flujo es moderada y la obtención valores tan bajo podrían indicar que en esas condiciones específicas las algas han metabolizado completamente el fosfato disponible o que ha habido una limitación en la disponibilidad de nutrientes. Las algas de laboratorio podrían tener mecanismos activos para la absorción de fosfato que se activan de manera más eficiente bajo condiciones de agitación moderada y voltaje alto. La eficiencia en la absorción de fosfato indica que las algas están utilizando este nutriente para procesos metabólicos internos como la síntesis de ATP o la producción de fosfolípidos para la membrana celular. En cambio, las algas artificiales muestran una mejor estabilidad y predictibilidad en la absorción de fosfato.

El cobre también muestra valores relativamente estables, situándose entre 0,44 mg/L y 0,76 mg/L. Los valores más altos de cobre (0,76 mg/L) aparecen a 10 kV y 15 kV, y 2 ml/h, lo que sugiere que el proceso de absorción de cobre está menos favorecido en condiciones de baja tensión y flujo moderado. Sin embargo, cuando el voltaje aumenta a 20 kV, el cobre tiende a descender ligeramente, situándose entre 0,44 mg/L y 0,57 mg/L. La absorción de cobre está regulada por procesos metabólicos dependientes de la energía generada por el voltaje. El descenso a voltajes más altos podría deberse a que las algas están priorizando la absorción de otros nutrientes como el fosfato o que los mecanismos de transporte de cobre están limitados en condiciones de alta tensión. La capacidad de las algas para mantener valores estables de cobre sugiere que tienen una buena tolerancia a la acumulación de metales pesados y que los sistemas de detoxificación están funcionando adecuadamente. Las algas artificiales parecen tener una mejor regulación de la absorción de nitrato, lo que podría deberse a la ausencia de factores biológicos internos que causan estrés o liberación de nitrógeno.

Con el nitrato encontramos el comportamiento más problemático y menos consistente. Los valores de nitrato varían ampliamente entre 1,4 mg/L y 30 mg/L, lo que indica que la absorción de nitrato es mucho menos predecible y estable que la de fosfato o cobre. Destaca especialmente el valor 30 mg/L para 15 kV y 2 ml/h, que es un pico extremo y muy por encima del resto de valores registrados. En otros casos, los valores son mucho más bajos, como 1,4 mg/L para 10 kV y 2 ml/h. La alta variabilidad en el nitrato podría deberse a que las algas están liberando ciertos metabolitos o subproductos metabólicos que están afectando la medición o el procesamiento del nitrato. Las algas artificiales parecen tener una mejor regulación de la absorción de nitrato, lo que podría deberse a la ausencia de factores biológicos internos que causan estrés o liberación de nitrógeno.

4.7 Rediseño del sistema colector para el proceso de electrohilado

Durante las fases iniciales del proyecto, se identificaron diversas limitaciones asociadas al uso de papel de aluminio como superficie de reposición en el colector. Entre los principales problemas encontradas se pueden destacar:

- Alto consumo de papel de aluminio: Este material, aunque funcionalmente conductor, presenta en sus propiedades una baja sostenibilidad debido a su elevada huella de carbono y su escasa biodegradabilidad.
- Dificultad para obtener una superficie plana: El papel de aluminio suele presentar arrugas o irregularidades que afectan la homogeneidad en la deposición de las fibras, principalmente al hacer el cambio entre ensayos.
- Conexión eléctrica inestable: La conexión del aluminio a la toma de tierra de la fuente de alta tensión no siempre es muy efectiva, lo que puede generar descargas irregulares o interferencias en el campo eléctrico necesarias para el proceso de electrohilado y poniendo en peligro al usuario.
- Desviación de las fibras durante el proceso: Las inestabilidades mecánicas y eléctricas del sistema provocaban una desviación de las fibras, comprometiendo la orientación, uniformidad y distribución de estas.

En respuesta a estas limitaciones, se diseñó un nuevo sistema colector con una superficie plana, reutilizable y eléctricamente estable (Figura 4-23), con el objetivo de:

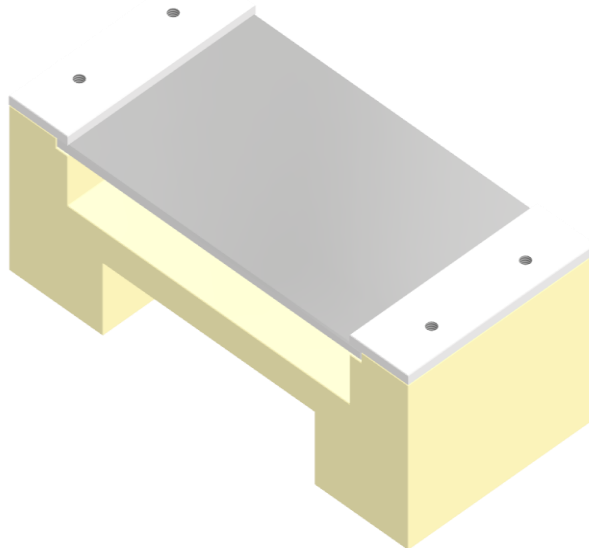


Figura 4-23 Vista general

- Asegurar una distribución homogénea de las fibras sobre el colector.
- Mejorar la repetibilidad de los ensayos, garantizando condiciones constantes en cada ejecución.

- Reduzca la generación de residuos, eliminando el uso continuo de papel de aluminio.

El nuevo sistema consiste en un soporte de teflón, material aislante, resistente y reutilizable, sobre el cual se coloca una pletina de aluminio que actúa como superficie colectora de las fibras. Esta pletina se asegura mediante dos tapas laterales de ABS, fijadas con tornillería, lo que proporciona rigidez estructural y estabilidad al conjunto.

La conexión a tierra de la fuente de alta tensión se realiza mediante un conector tipo fastón de punta [68], introducido desde la parte inferior del soporte (Figura 4-24). Este se conecta directamente al centro del colector y se fija firmemente mediante un tornillo de teflón, garantizando así una conductividad estable y segura durante todo el proceso.

Este rediseño representa un avance significativo en términos de sostenibilidad, funcionalidad y precisión experimental.

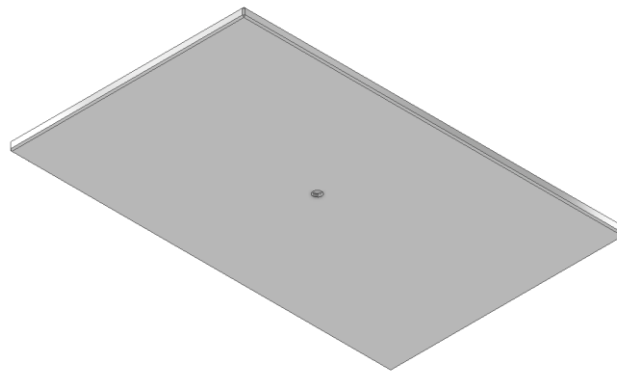


Figura 4-24 Colector

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

La presente investigación ha demostrado la viabilidad de fabricar filtros biocompatibles y biodegradables mediante la técnica de electrohilado, empleando policaprolactona (PCL) como matriz polimérica y microalgas *Spirulina* y algas cultivadas en laboratorio. Las membranas fibrosas obtenidas mostraron una notable capacidad para adsorber contaminantes típicos de aguas residuales, gracias a la sinergia entre el polímero y la biomasa de alga integrada. Mediante un diseño experimental Box-Behnken de metodología de superficie de respuesta (RSM), se optimizaron parámetros clave de fabricación —porcentaje de alga, concentración de PCL y voltaje de electrohilado— con el objetivo de maximizar la eficiencia de eliminación de nutrientes (fosfatos, nitratos) y metales pesados (cobre) del agua.

La eficacia del filtro en la eliminación de fosfatos fue particularmente destacable, incrementándose con el tiempo de contacto. En condiciones próximas a las óptimas identificadas por el modelo, se logró remover una fracción significativa del fosfato presente ya en la primera hora de tratamiento (en torno al 60% de eliminación), alcanzando hasta prácticamente la eliminación total tras 6 horas (>95% de reducción de la concentración de fosfato). Específicamente, se observó que un mayor contenido de PCL en la fibra favorece la adsorción de fosfato, mientras que la cantidad de alga presenta un efecto adverso. Una dosificación moderada de *Spirulina* (1,25% en la solución precursora) propició mejores remociones iniciales, pero para tiempos de contacto más prolongados (6 h) se obtuvieron mayores porcentajes de eliminación con contenidos de alga más bajos (0,5%), combinados con un voltaje de electrohilado reducido (10 kV) y la concentración de PCL más alta (16%). Estos resultados sugieren que la microestructura de la fibra (influenciada por la fracción de polímero) y la dispersión del material biológico en la matriz juegan un papel crucial tanto en la cinética inicial de adsorción como en la capacidad total de retención de fosfato.

La retención de nitratos y de cobre por parte de los filtros también fue satisfactoria. Los mejores resultados se obtuvieron bajo combinaciones específicas de parámetros, destacando el papel del contenido de alga en la captura de nitrógeno y de la proporción de PCL en la adsorción de metales. En particular, para los nitratos se encontró que un mayor porcentaje de *Spirulina* (hasta 2%), combinado con un voltaje de electrohilado bajo (10 kV) y una menor concentración de PCL ($\approx 8\%$), favoreció la máxima remoción. Bajo esas condiciones, la concentración de nitrato en el agua se redujo en más de un 90% tras 6 horas de tratamiento (por ejemplo, de ~ 30 mg/L iniciales a ~ 1 – 2 mg/L finales). Por otro lado, la eliminación de cobre alcanzó eficiencias muy elevadas (superiores al 95% de retención) en las

membranas con bajo contenido de alga. En las condiciones óptimas identificadas, el nivel de cobre disuelto disminuyó desde aproximadamente 1 mg/L inicial hasta valores del orden de unas pocas decenas de $\mu\text{g/L}$ finales. Estos valores demuestran la versatilidad del filtro para tratar distintos tipos de contaminantes inorgánicos, adaptándose su desempeño según la formulación de la fibra y confirmando su eficacia tanto en la eliminación de nutrientes como de metales pesados.

Asimismo, se comprobó la influencia del peso molecular del PCL en la fabricación y desempeño de las membranas filtrantes. El uso de PCL de peso molecular más elevado ($M_n \approx 80.000$) resultó en fibras de mejor calidad (diámetro más uniforme y estructura continua), facilitando la producción de membranas homogéneas en un rango amplio de voltajes y caudales de alimentación. En contraste, con PCL de menor peso molecular ($M_n \approx 14.000$) se observaron dificultades significativas para formar fibras continuas, requiriendo condiciones muy específicas (por ejemplo, un voltaje elevado de ~ 20 kV y caudal intermedio) para lograr un electrohilado estable. Esta diferencia se tradujo en una menor eficacia de los filtros elaborados con PCL de 14.000, debido a la estructura menos consistente de sus fibras. Por lo tanto, la elección de un polímero de mayor peso molecular (PCL 80.000) se revela como un factor determinante para garantizar la eficiencia y reproducibilidad en la fabricación de estos filtros.

En conjunto, las conclusiones de este trabajo indican que es posible desarrollar filtros de nanofibras biodegradables capaces de remover eficazmente contaminantes de aguas residuales. La incorporación de biomasa de microalga en fibras de PCL aportó funcionalidad adsorbente añadida sin comprometer la integridad del material, y los rendimientos de depuración obtenidos son competitivos frente a métodos convencionales para los contaminantes estudiados. Dado su carácter ecológico y la efectividad demostrada a escala de laboratorio, esta tecnología de filtración presenta un gran potencial de aplicabilidad en el tratamiento de aguas residuales, ya sea en plantas depuradoras industriales o en sistemas descentralizados y la capacidad de realizarlo in situ. En definitiva, los resultados sientan las bases para implementar estos filtros a mayor escala, subrayando su posible contribución a un enfoque más sostenible en la gestión de efluentes.

5.2 Líneas futuras

A partir de los hallazgos obtenidos, se identifican diversas líneas de trabajo futuro para mejorar y ampliar el alcance del sistema de filtración desarrollado. En primer lugar, sería conveniente introducir mejoras en la técnica de electrohilado utilizada para fabricar las membranas. Esto podría implicar modificaciones estructurales en el equipo de electrospinning, como el diseño de sistemas de múltiples agujas o boquillas que permitan producir una mayor cantidad de fibra de forma simultánea, así como la optimización del colector (por ejemplo, empleando colectores rotatorios o de mayor área) para obtener mallas nanofibrosas más extensas y uniformes. Tales innovaciones incrementarían la eficiencia de producción de las membranas y facilitarían la obtención de filtros de mayor tamaño, acercando el proceso hacia una posible escala pre-industrial.

Otro aspecto importante es el diseño de dispositivos de filtración que integren estas membranas de forma práctica y faciliten su recambio. Se propone desarrollar sistemas de cartuchos o bandejas extraíbles cargados con la nanofibra filtrante, de modo que el filtro pueda reemplazarse de manera rápida y sencilla una vez saturado. Esta mejora permitiría renovar las membranas sin tener que detener por completo el proceso de depuración, minimizando los tiempos muertos en una aplicación real. La implementación de un mecanismo de carga rápida o módulos intercambiables aumentaría la operatividad del sistema, haciendo más viable su uso continuo en entornos industriales. Adicionalmente, podría estudiarse la posibilidad de regenerar in situ las fibras saturadas (p. ej., mediante lavados químicos suaves o procesos de biodegradación controlada) para extender la vida útil de cada filtro antes de su sustitución.

Finalmente, se recomienda ampliar el diseño experimental en investigaciones futuras, explorando escenarios más complejos que optimicen y validen el rendimiento del filtro. Una vía sería extender el estudio a una gama más amplia de contaminantes presentes en aguas residuales reales. Por ejemplo, podrían ensayarse estos filtros en la eliminación de otros metales pesados (como plomo, cadmio u óxido de zinc) y de contaminantes emergentes (sustancias orgánicas recalcitrantes, fármacos, etc.), evaluando su eficacia en condiciones diversas. De igual forma, sería valioso considerar nuevas variables en el proceso de optimización: el pH y la química del agua a tratar, la concentración inicial de contaminante, la velocidad de flujo a través del filtro, e incluso el uso de diferentes tipos de microalgas o biopolímeros, son factores que podrían influir en la performance del sistema. La aplicación de metodologías de optimización multivariable más avanzadas (como diseños factoriales de orden superior o nuevos modelos de RSM) sobre este conjunto ampliado de condiciones permitiría identificar configuraciones de filtro aún más eficaces y robustas. En definitiva, profundizar en estas líneas futuras ayudará a potenciar el desempeño de los filtros desarrollados y a preparar el camino para su implantación a escala piloto e industrial, contribuyendo al desarrollo de sistemas de tratamiento de agua más sostenibles y eficientes.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Luna - MICROALGAS ASPECTOS ECOLÓGICOS Y BIOTECNOLÓGICOS.pdf». Accedido: 27 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/4435/443543707001.pdf>
- [2] «Las microalgas: una materia prima única para valorizar el CO2 | AseBio». Accedido: 12 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asebio.com/actualidad/noticias/las-microalgas-una-materia-prima-unica-para-valorizar-el-co2>
- [3] S. M. Imran *et al.*, «Carbon nanotube-based thermoplastic polyurethane-poly(methyl methacrylate) nanocomposites for pressure sensing applications», *Polymer Engineering & Sci*, vol. 56, n.º 9, pp. 1031-1036, sep. 2016, doi: 10.1002/pen.24333.
- [4] «Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes», ResearchGate. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/239572985_Water_Quality_Monitoring_-_A_Practical_Guide_to_the_Design_and_Implementation_of_Freshwater_Quality_Studies_and_Monitoring_Programmes
- [5] LEANpio, «Qué son los residuos peligrosos y no peligrosos», LEANpio. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.leanpio.com/es/blog/residuos-peligrosos-no-peligrosos>
- [6] S. R. Carpenter, N. F. Caraco, D. L. Correll, R. W. Howarth, A. N. Sharpley, y V. H. Smith, «Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen», *Ecological Applications*, vol. 8, n.º 3, pp. 559-568, 1998, doi: 10.1890/1051-0761.
- [7] «Actividades humanas, el principal factor que altera la calidad del agua», Gaceta UNAM. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.gaceta.unam.mx/actividades-humanas-el-principal-factor-que-altera-la-calidad-del-agua/>
- [8] «Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua ; datos, cifras y ejemplos de acción - UNESCO Biblioteca Digital». Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384659_spa

- [9] «Calidad del Agua: Cómo las Actividades Humanas la Están Afectando y Qué Podemos Hacer al Respecto», Instituto del Agua. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://institutodelagua.es/calidad-del-agua/actividades-humanas-que-afectan-la-calidad-del-aguacalidad-del-agua/>
- [10] «Evaluación del impacto de la contaminación ambiental puntual y difusa en la bahía de acapulco».
- [11] L. Bravo-Inclán y P. Saldaña-Fabela, «La importancia de la contaminación difusa en México y en el mundo».
- [12] «La OMS pone al día la lista de bacterias farmacorresistentes más peligrosas para la salud humana». [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/es/news/item/17-05-2024-who-updates-list-of-drug-resistant-bacteria-most-threatening-to-human-health>
- [13] M. R. Pullés, «Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en cuba», vol. 45.
- [14] I. Izquierdo, O. Soto Izquierdo, M. Ramalho, I. Izquierdo, O. Soto Izquierdo, y M. Ramalho, «Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento», *Revista ingeniería de construcción*, vol. 33, n.º 3, pp. 229-240, dic. 2018, doi: 10.4067/S0718-50732018000300229.
- [15] «La-hidrosfera-El-ciclo-del-agua-La-contaminacion-del-agua-Metodos-de-analisis-y-depuracion-El-problema-de-la-escasez-del-agua.pdf».
- [16] «Uso de la teoría de redes para modelar la contaminación termica de la subcuenca del río Quindío.Manuel Alejandro Chaucanes López». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bdigital.uniquindio.edu.co/server/api/core/bitstreams/2799f60f-0607-4c00-a2b4-dbc715d6c943/content>
- [17] A. G. Navia, «¿Qué está pasando en el Mar Menor? La eutrofización y sus efectos», THE OBJECTIVE. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://theobjective.com/sociedad/medioambiente/2022-04-27/mar-menor-eutrofizacion/>
- [18] «Ingenieria de aguas residuales. Volumen I y II - Metcalf y Eddy 3ra ed [PDF] | Online Book Share». Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://epage.pub/doc/ingenieria-de-aguas-residuales-volumen-i-y-ii-metcalf-y-eddy-3ra-ed-yr74kv4oep>
- [19] A. F. C. Anzola, D. S. V. Godoy, y E. A. P. Herrera, «ELABORACION DE UNA GUIA PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES».
- [20] I.C.J.Collazos, «TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS E INDUSTRIALES».
- [21] B. Tito, « Tratamiento Terciario de Aguas Residuales: 2025». Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ingenieriaambiental.net/tratamiento-terciario-de-aguas-residuales/>
- [22] institutodelaguaes, «Tratamiento Terciario de Aguas Residuales: La Innovadora Solución para la Gestión Sostenible del Agua», Instituto del Agua. Accedido: 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://institutodelagua.es/aguas-residuales/tratamiento-terciario-de-aguas-residualesaguas-residuales/>
- [23] Yago, «Biorremediación de Puertos a través de GREENinMED |». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mediterraneanalgae.com/proyecto-greeninmed/>
- [24] «Fig. 5. Factors of influence in bioremediation processes», ResearchGate. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Factors-of-influence-in-bioremediation-processes_fig5_286596893

- [25] «Plantaorigenalgas». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.chilebio.cl/wp-content/uploads/2020/05/Planta_26_compressed.pdf#page=24
- [26] I.A.C Cruz, «QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN BIOTECNOLOGÍA».
- [27] O. Pulz y W. Gross, «Valuable products from biotechnology of microalgae», *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 65, n.º 6, pp. 635-648, nov. 2004, doi: 10.1007/s00253-004-1647-x.
- [28] «Michael M.Helm;“Cultivo en criadero”;Un manual práctico;Manejo de cultivos de inóculos.» Accedido: 7 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/4/y5720s/y5720s07.htm>
- [29] «Biosorción», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 9 de octubre de 2023. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Biosorci%C3%B3n&oldid=154446494>
- [30] «El alga invasora se probará para compostar lodos en depuración de aguas | Sociedad | Cadena SER». Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cadenaser.com/andalucia/2024/11/06/el-alga-invasora-se-probara-para-compostar-lodos-en-depuracion-de-aguas-radio-algeciras/>
- [31] J. Reingold, «República Dominicana, un pequeño laboratorio para experimentar soluciones frente al sargazo», *El País*. Accedido: 3 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://elpais.com/planeta-futuro/2024-09-25/republica-dominicana-un-pequeno-laboratorio-para-experimentar-soluciones-frente-al-sargazo.html>
- [32] R. VOCERO EL, «Crean la primera granja de algas tropicales para producir biocombustibles en Puerto Rico», *El Vocero de Puerto Rico*. Accedido: 19 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.elvocero.com/actualidad/crean-la-primer-granja-de-algas-tropicales-para-producir-biocombustibles-en-puerto-rico/article_84b89b5c-be38-11eb-ab8b-7368c50ca89d.html
- [33] J. T. Solomon, «Liquid Jet Blasting Using Ultra-High Frequency Supersonic Pulsed Air Jet», *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, vol. 10, n.º 2, Art. n.º 2, abr. 2022, doi: 10.4236/jfcmv.2022.102004.
- [34] J. Zeleny, «The Electrical Discharge from Liquid Points, and a Hydrostatic Method of Measuring the Electric Intensity at Their Surfaces», *Phys. Rev.*, vol. 3, n.º 2, pp. 69-91, feb. 1914, doi: 10.1103/PhysRev.3.69.
- [35] J. F. Cooley, «Apparatus for electrically dispersing fluids», US692631A, 4 de febrero de 1902 Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://patents.google.com/patent/US692631A/en>
- [36] C. García-Pérez, C. Menchaca-Campos, M. A. García-Sánchez, E. Pereyra-Laguna, O. Rodríguez-Pérez, y J. Uruchurtu-Chavarín, «Nylon/Porphyrin/Graphene Oxide Fiber Ternary Composite, Synthesis and Characterization», *Open Journal of Composite Materials*, vol. 7, n.º 3, Art. n.º 3, jul. 2017, doi: 10.4236/ojcm.2017.73009.
- [37] D. H. Reneker y I. Chun, «Nanometre diameter fibres of polymer, produced by electrospinning», *Nanotechnology*, vol. 7, n.º 3, p. 216, sep. 1996, doi: 10.1088/0957-4484/7/3/009.
- [38] «A review on polymer nanofibers by electrospinning and their applications in nanocomposites», *Composites Science and Technology*, vol. 63, n.º 15, pp. 2223-2253, nov. 2003, doi: 10.1016/S0266-3538(03)00178-7.

- [39] N. Bhardwaj y S. C. Kundu, «Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique», *Biotechnology Advances*, vol. 28, n.º 3, pp. 325-347, may 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.01.004.
- [40] «Electrospinning in personal protective equipment for healthcare work | Polymer Bulletin». Accedido: 7 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00289-023-04814-5>
- [41] S. Ramakrishna, *An Introduction to Electrospinning and Nanofibers*. World Scientific, 2005.
- [42] W.-J. Li, C. T. Laurencin, E. J. Caterson, R. S. Tuan, y F. K. Ko, «Electrospun nanofibrous structure: a novel scaffold for tissue engineering», *J Biomed Mater Res*, vol. 60, n.º 4, pp. 613-621, jun. 2002, doi: 10.1002/jbm.10167.
- [43] L. M. D. Sánchez, L. Rodríguez, y M. López, «ELECTROSPINNING: LA ERA DE LAS NANOFIBRAS», 2013.
- [44] W. E. Teo y S. Ramakrishna, «A review on electrospinning design and nanofibre assemblies», *Nanotechnology*, vol. 17, n.º 14, p. R89, jun. 2006, doi: 10.1088/0957-4484/17/14/R01.
- [45] «¿Cómo funcionan los métodos de electrohilado para fabricación de fibras poliméricas?», Interempresas. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/462990-Como-funcionan-los-metodos-de-electrohilado-para-fabricacion-de-fibras-polimericas.html>
- [46] T. A. Aragaw, «Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario», *Marine Pollution Bulletin*, vol. 159, p. 111517, oct. 2020, doi: 10.1016/j.marpolbul.2020.111517.
- [47] «Mascarilla quirúrgica IIR gomas - Stratton Suministros». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://stratton.es/producto/mascarilla-quirurgica-iir-gomas/>
- [48] C. S. Vázquez, V. S. Vázquez, y A. B. M. Alvarado, «Electrospinning: Una tecnología para obtener nanofibras en la purificación de agua para consumo humano», *RD-ICUAP*, pp. 127-141, ene. 2022, doi: 10.32399/icuap.rdic.2448-5829.2022.22.650.
- [49] N. Cuesta Pedrayes, A. B. García Suárez, A. Ramos Alonso, I. Cameán Bao, S. de Llobet, y I. Suelves Laiglesia, «Bio-nanofibras de carbono grafitizadas: aplicación como ánodos en baterías de ión-litio», oct. 2013, Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/217895>
- [50] O. B. Sanchez, «Construccion de celdas solares de tercera generacion mediante crecimiento in-situ de perovskita utilizando nanofibras de Dioxido de Titanio dopadas con Plomo». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lnm/betanzos_sanchez_o/
- [51] I. Manzano Hernández, «Estudio de la aplicabilidad de puntos cuánticos en disolución e incorporados en membranas basadas en nanofibras como sensores para la detección de pesticidas en agua», Proyecto/Trabajo fin de carrera/grado, Universitat Politècnica de València, 2017. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/84609>
- [52] M. L. Mejía Suaza, *Protocolos para caracterización de no tejidos conformados por nanofibras*. Editorial Universidad Pontificia Bolivariana, 2019. doi: 10.18566/978-958-764-753-2.
- [53] «Equipos de electrohilado | Máquinas de nanofibras | Inovenso». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.inovenso.com/>
- [54] «Multiples chorros desde aguja». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/3a28/4690db5d3f94d683639c5fa3262030a348cb.pdf>

- [55] «PCL | Policaprolactona - Polímeros termoplásticos, elastómeros y aditivos». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mexpolimeros.com/pcl.html>
- [56] «Policaprolactona», *Wikipedia, la enciclopedia libre*. 11 de mayo de 2024. Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Policaprolactona&oldid=160047034>
- [57] «Arkopharma Spirulina 45 Cápsulas Vitalidad». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.farmasoler.com/nutricion/spirulina-arkopharma-48-capsulas-274407.html>
- [58] G. Gutiérrez-Salmeán, L. Fabila-Castillo, y G. Chamorro-Cevallos, «Aspectos nutricionales y toxicológicos de Spirulina (Arthrospira)», *Nutrición Hospitalaria*, vol. 32, n.º 1, pp. 34-40, jul. 2015, doi: 10.3305/nh.2015.32.1.9001.
- [59] «Jeringa 3 cuerpos Omnifix 20 ml luer sin latex c/100 Uds». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea].
- [60] «Algas diversos factores». Accedido: 28 de febrero de 2025. [En línea]. Disponible en: https://sisbib.unmsm.edu.pe/bvrevistas/biologist/v11_n2/pdf/a4v11n2.pdf
- [61] «Medidor fotométrico multifunción DQO HI 83399». Accedido: 13 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-fotometrico/medidor-fotometrico-multifuncion-c200.htm>
- [62] «Grafting of Polycaprolactone on Oxidized Nanocelluloses by Click Chemistry». Accedido: 24 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2079-4991/3/1/141>
- [63] T. Elzein, M. Nasser-Eddine, C. Delaite, S. Bistac, y P. Dumas, «FTIR study of polycaprolactone chain organization at interfaces», *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 273, n.º 2, pp. 381-387, may 2004, doi: 10.1016/j.jcis.2004.02.001.
- [64] A. Alves, S. G. Caridade, J. F. Mano, R. A. Sousa, y R. L. Reis, «Extraction and physico-chemical characterization of a versatile biodegradable polysaccharide obtained from green algae», *Carbohydrate Research*, vol. 345, n.º 15, pp. 2194-2200, oct. 2010, doi: 10.1016/j.carres.2010.07.039.
- [65] J. N. Murdock y D. L. and Wetzel, «FT-IR Microspectroscopy Enhances Biological and Ecological Analysis of Algae», *Applied Spectroscopy Reviews*, vol. 44, n.º 4, pp. 335-361, jun. 2009, doi: 10.1080/05704920902907440.
- [66] R. Yaseri, M. Fadaie, E. Mirzaei, H. Samadian, y A. Ebrahiminezhad, «Surface modification of polycaprolactone nanofibers through hydrolysis and aminolysis: a comparative study on structural characteristics, mechanical properties, and cellular performance», *Sci Rep*, vol. 13, n.º 1, p. 9434, jun. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-36563-w.
- [67] «Superhydrophobic Surfaces: Insights from Theory and Experiment | The Journal of Physical Chemistry B». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.9b08567>
- [68] «Conector de contactos de crimpado RS PRO, Aislado, diám. 2.8mm, long. 14mm, Amarillo, 4mm² a 6mm², 12AWG a 10AWG | RS». Accedido: 26 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.rs-online.com/web/p/conectores-de-pin-de-crimpado/1788421>
- [69] Agencias, «La Xunta y la UVigo ponen en marcha un proyecto para estudiar el impacto medioambiental de los embalses», Cadena SER. Accedido: 12 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://cadenaser.com/galicia/2025/03/11/la-xunta-y-la-uvigo-ponen-en-marcha-un-proyecto-para-estudiar-el-impacto-medioambiental-de-los-embalses-radio-vigo/>

- [70] «Tira LED RGB con carcasa rígida plástica.», ICA S.A. Accedido: 20 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.icasa.com/producto/tira-led-rgb-con-carcasa-rigida-plastica/>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El desarrollo de filtros para el tratamiento de aguas residuales presenta implicaciones significativas en los ámbitos social, económico y ambiental. Estos filtros, al poder integrarse en sistemas de depuración, ofrecen una alternativa sostenible y eficiente frente a tecnologías convencionales.

La implementación de filtros biodegradables contribuye a la reducción de contaminantes en cuerpos de agua, mitigando problemas como la eutrofización y la proliferación de bacterias.

Un ejemplo de ello es el proyecto impulsado por la Xunta de Galicia y la Universidad de Vigo, que busca mitigar la contaminación en embalses mediante técnicas innovadoras como filtros verdes y el uso de algas. Además, la utilización de materiales biodegradables en los filtros evita la generación de residuos persistentes, como los microplásticos, favoreciendo la preservación de los ecosistemas acuáticos [69].

Desde una perspectiva económica, estos filtros pueden reducir los costos asociados al tratamiento de aguas residuales al disminuir la dependencia de productos químicos y procesos energéticamente intensivos. La posibilidad de valorizar subproductos, como la biomasa generada, puede abrir nuevas oportunidades de negocio, especialmente en sectores agrícolas que buscan fertilizantes orgánicos.

La mejora en la calidad del agua tratada tiene un impacto directo en la salud pública, reduciendo la incidencia de enfermedades relacionadas con el agua contaminada. Además, el desarrollo y la implementación de estas tecnologías pueden generar empleo en sectores relacionados con la fabricación, instalación y mantenimiento de los filtros, contribuyendo al desarrollo económico local. La educación y concienciación de la población sobre buenas prácticas sostenibles en el manejo del agua también son fundamentales para garantizar la eficacia y aceptación de estas soluciones.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La investigación y desarrollo de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales no solo implica desafíos técnicos, sino también consideraciones éticas y sociales, especialmente en lo referente a la seguridad en el laboratorio y el impacto de los productos químicos utilizados.

La manipulación de sustancias químicas en el laboratorio exige estrictas medidas de seguridad para proteger la salud de los investigadores. Casos históricos de personas que enfermaron tras una exposición accidental al dimetilmercurio, resaltan la importancia de utilizar equipos de protección adecuados y estar completamente informado sobre los riesgos asociados a cada sustancia. Además, incidentes recientes, donde se registraron múltiples intoxicaciones debido a la exposición a agentes químicos desconocidos, subrayan la necesidad de una vigilancia continua y la implementación de protocolos de seguridad rigurosos en entornos laborales. Por todo ello se obliga llevar siempre en laboratorio guantes y bata para tratar con composiciones que por su reducido tamaño pueden ser perjudiciales.

El desarrollo de tecnologías sostenibles para el tratamiento de aguas residuales plantea cuestiones éticas relacionadas con la equidad en el acceso a recursos esenciales, como el agua potable. Iniciativas en muchas universidades de todo el mundo que diseñan un sistema de filtración para eliminar químicos del agua en su comunidad demuestran cómo la ciencia puede abordar problemas locales y promover la justicia social. Es responsabilidad de los investigadores garantizar que sus desarrollos tecnológicos beneficien a las comunidades más vulnerables y no perpetúen las desigualdades existentes.

El ingeniero tiene una responsabilidad que va más allá del diseño y la implementación de soluciones técnicas. En el caso de los filtros, esta responsabilidad se manifiesta en la necesidad de garantizar que las soluciones sean seguras, sostenibles y accesibles. La formación técnica del ingeniero le permite desarrollar soluciones innovadoras, pero también debe considerar los impactos sociales y medioambientales de dichas soluciones.

ANEXO III: KIT LED ICA

En este anexo se especificarán las características de la tira de LED para iluminar acuarios y/o aumentar la potencia lumínica en las pantallas de acuarios.

Su envolvente carcasa rígida con placa de aluminio interna permite una fácil sujeción y disipa el calor emitido por el LED. Se puede usar tanto para agua dulce como para agua salada.

El kit viene con unas cintas dobles cara ultra resistentes y unos clips para enganchar al material deseado.



Figura A0-1 KIT LET ICA [70]

ANEXO IV: MÁQUINA KDS LEGATO 100

El KDS Legato 100 es una bomba de infusión diseñada para operar con una sola jeringa, con un rango de flujo de 1,26 pl/min a 88,32 ml/min, dependiendo del tamaño de la jeringa (de 0,5 µl a 60 ml). Utilice una interfaz de pantalla táctil para controlar y visualizar parámetros como el tamaño de la jeringa, tasa de flujo, volumen entregado y tiempo transcurrido. Emplea un mecanismo de sujeción avanzado para mantener las jeringas (de vidrio, plástico o acero inoxidable) de manera segura. La máquina permite la configuración mediante el software Adagio, que optimiza el uso y las funciones de la bomba, permitiendo el control de múltiples unidades a través de la interfaz RS485. Ofrece una precisión de $\pm 0.5\%$, y las técnicas de micro-pasos minimizan la pulsación.

KDS LegatoTM 100

Infuse Only Syringe Pump



Figura A0-2 KDS LEGATO 100

ANEXO V: AIREADOR EHEIM AIR200

El aireador EHEIM air100 es un compresor de aire diseñado para funcionar de manera silenciosa y eficiente. Existen tres modelos disponibles con capacidades de 100, 200 (2x100) y 400 (2x200) L/h, siendo el air100 el más pequeño y el utilizado en el estudio. Este modelo cuenta con una salida de aire ajustable y viene equipado con un difusor EHEIM y una válvula antirretorno. La cantidad de aire y el tamaño de las burbujas pueden regularse tanto en el dispositivo como en el difusor. Dispone de pies de goma antivibración que reducen el ruido y mantienen estable el aparato. También puede fijarse en la pared gracias a una tira de goma incluida.

Características principales:

- Silencioso y de larga duración.
- Potencia: 100 L/h (50 Hz)
- Altura del bombeo: 2 m (50 Hz)
- Consumo eléctrico: 3,5 W (50 Hz)
- Dimensiones: 150 x 92 x 76 mm
- Compatible con agua dulce y salada
- Incluye un difusor, una manguera de aire y una válvula antirretorno.

Este aireador destaca por su bajo nivel de ruido, facilidad de uso y alta calidad, siendo ideal para diferentes configuraciones acuáticas.



Figura A0-3 Aireador EHEIM AIR 200

ANEXO VI: FUENTE DE ALIMENTACIÓN SERIE 7000

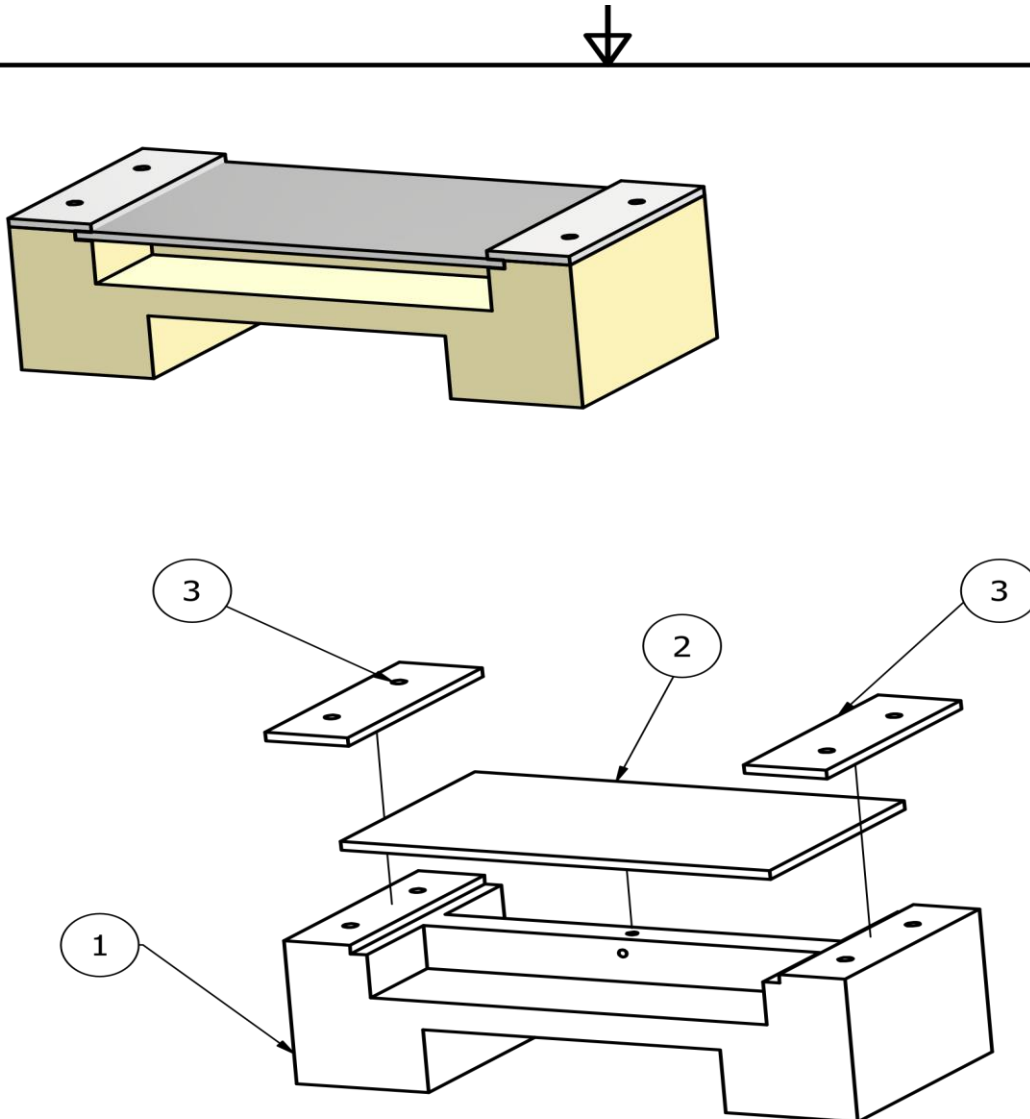
La unidad está disponible con polaridad positiva o negativa y uno o dos conectores de salida. Tanto las unidades de entrada de CA como de CC se suministran con cables de salida de AT de 40 kV. La unidad de entrada de CA también se suministra con conector y cable de alimentación IEC, y la unidad de entrada de CC se suministra con un conector XLR de 5 vías (hembra) de 24 V.

- Electrospinning, Pruebas de aislamiento, Electroforesis
- Modelos De 1kV a 40kV
- Unidades de 30W,60W,100W
- Huella pequeña
- Polaridad positiva o negativa disponible

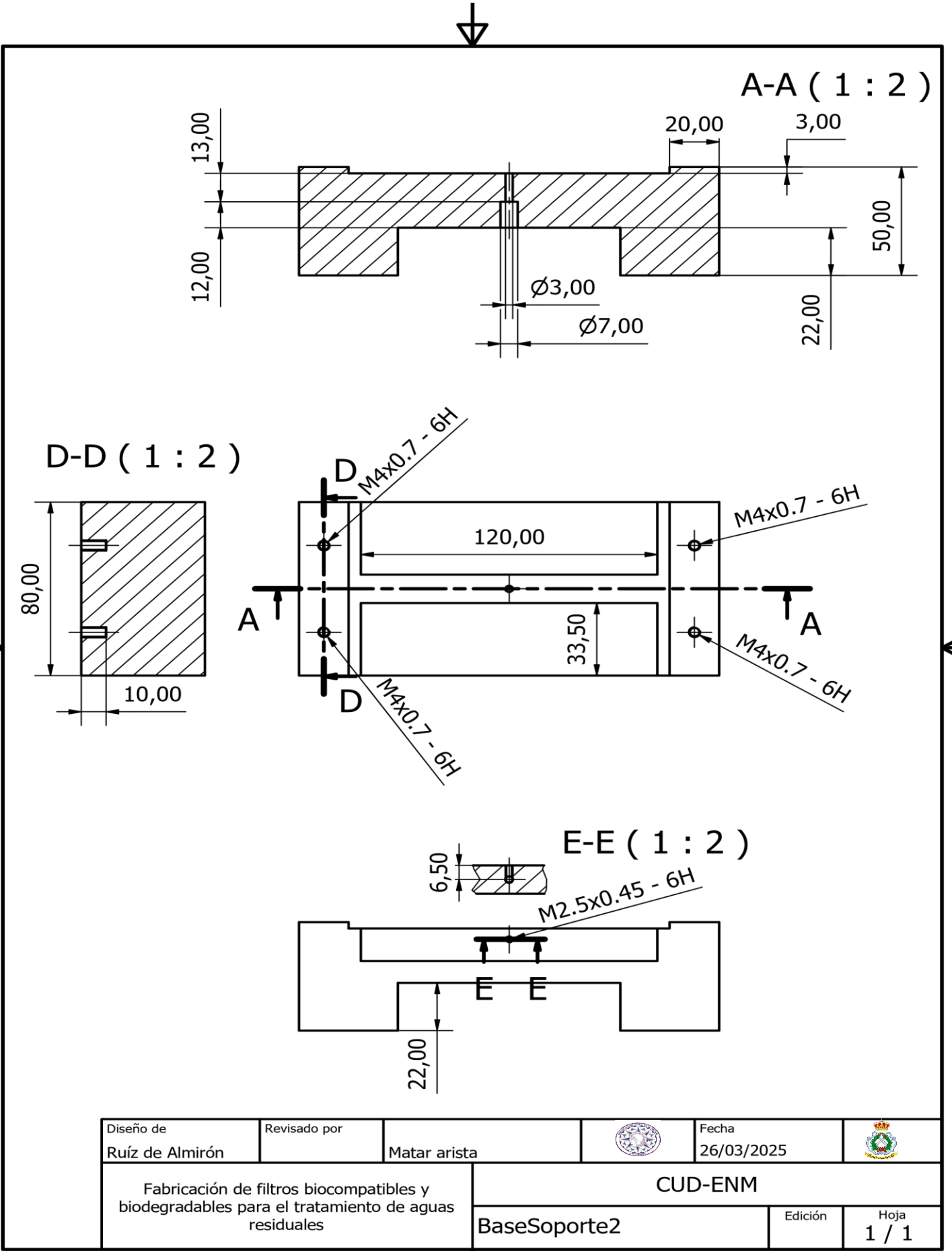
El sistema de alimentación eléctrica funciona con una entrada de 24VDC o en un rango universal de 85 – 264VAC y frecuencias de 50 Hz o 60 Hz, además de corriente continua (DC). Ofrece una potencia de salida seleccionable de 30W, 60W o 100W con polaridad positiva o negativa. El voltaje de salida es ajustable entre 0% y 100%, con una baja ondulación de voltaje inferior al 0,1%. Presenta una regulación de carga de 0,01% y una regulación de línea de 0,03%, con una estabilidad de 0,05 .

El sistema alcanza una eficiencia del 75% y funciona en un rango de temperatura de -10°C a 40°C, con una humedad de operación de 0% a 90% (sin condensación). La refrigeración se realiza mediante aire y el control y monitoreo son locales. Está protegido contra arco eléctrico, cortocircuito, sobrecarga y sobretensión.

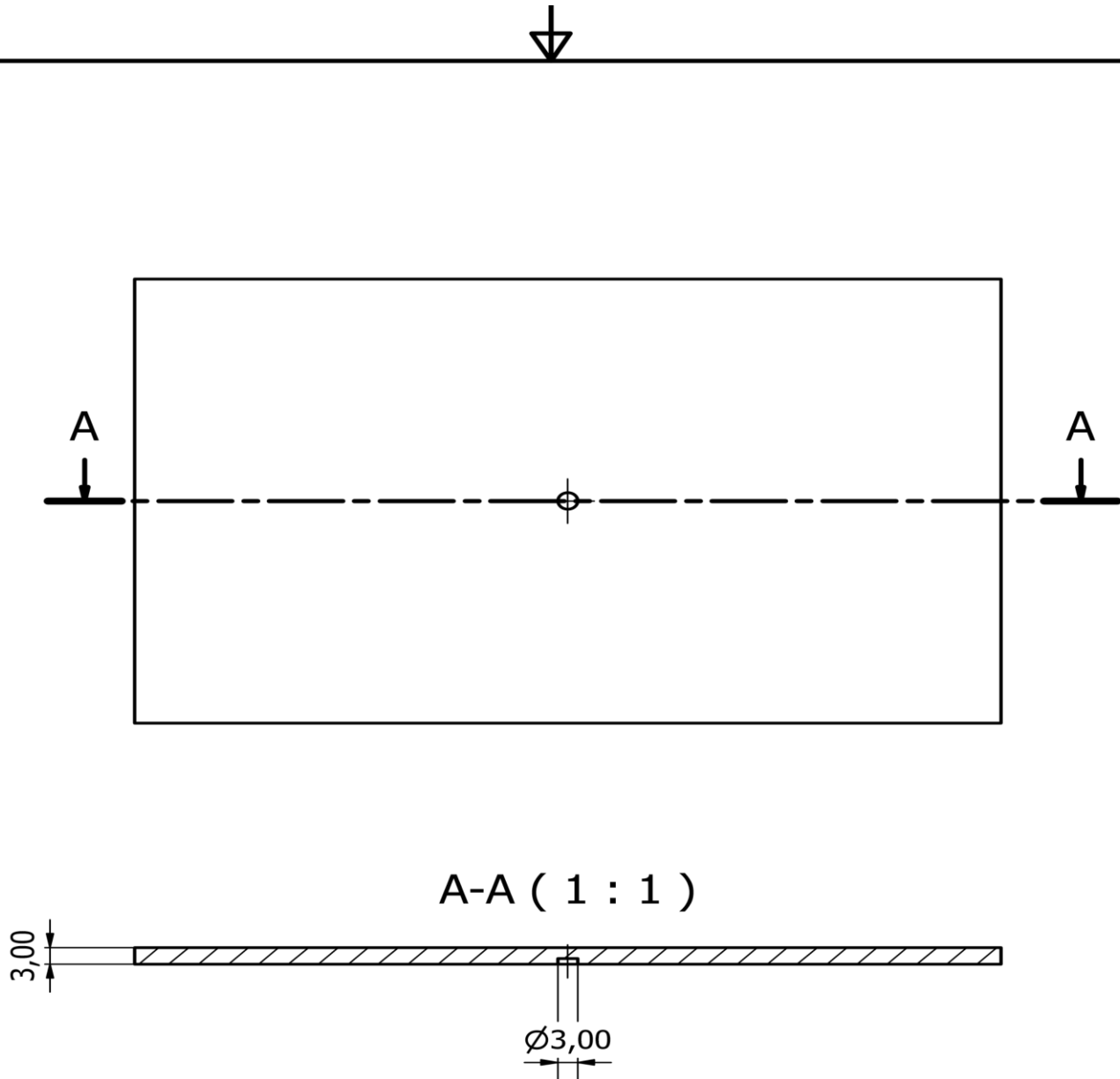
ANEXO VII: PLANOS



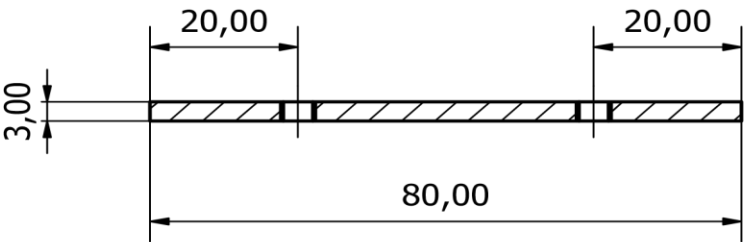
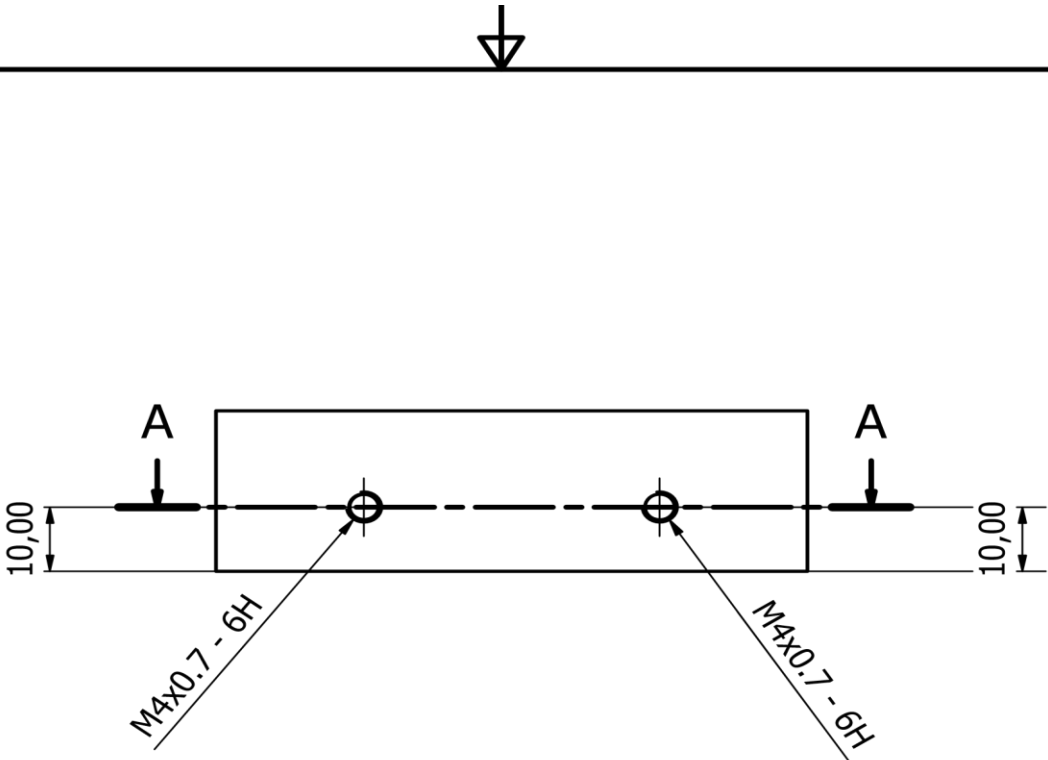
LISTA DE PIEZAS					
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA		DESCRIPCIÓN	
1	1	BaseSoporte2		Teflón	
2	1	Colector		Aluminio	
3	2	Tapas		ABS	
Diseño de Ruíz de Almirón	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha	
				26/03/2025	
Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el tratamiento de aguas residuales			CUD-ENM		
			ColectorPlanoconTapas-1	Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de Ruíz de Almirón	Revisado por Matar arista		Fecha 26/03/2025	
Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el tratamiento de aguas residuales		BaseSoporte2		
		Edición		Hoja 1 / 1



Diseño de Ruíz de Almirón	Revisado por	Matar arista		Fecha 25/03/2025	
Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el tratamiento de aguas residuales			CUD-ENM		
			Colector	Edición	Hoja 1 / 1



A-A (1 : 1)

Diseño de Ruíz de Almirón	Revisado por	Matar arista		Fecha 25/03/2025	
Fabricación de filtros biocompatibles y biodegradables para el tratamiento de aguas residuales			CUD-ENM		
Tapas			Edición	Hoja 1 / 1	

ANEXO VIII: PRESUPUESTO

Nº de orden	Unidades	Concepto	Referencia	Precio €/unidad	Importe €
1	1	Base soporte	Teflón	20	20
2	1	Colector	Aluminio	1,89	1,89
3	2	Tapas	ABS	2,5	5
Total, presupuesto de los componentes comerciales					26,89

Nº de orden	Unidades	Concepto	Referencia	Precio €/unidad	Importe €
-	4	Mano de obra de mecanización del conjunto de todas las piezas	-	30	120
Total, presupuesto del mecanizado de piezas					120

Nº de orden	Unidades	Concepto	Referencia	Precio €/unidad	Importe €
-	2	Mano de obra del ingeniero mecánico	-	50	100
Total, presupuesto de mano de obra					100

Referencia	Importe (€)
Componentes comerciales	26,89
Mecanizado de piezas	120
Mano de obra	100
Presupuesto total	246,89

ANEXO IX: PLIEGO DE CONDICIONES

6.1 Requisitos del montaje

El colector empleado en el proceso estará construido de forma que garantice una superficie de deposición plana, conductora y reutilizable. Para ello, se ha dispuesto una placa de aluminio lisa como superficie donde las fibras se depositan, montada sobre un soporte aislante de teflón (base estructural) que evita interferencias eléctricas y aporta rigidez. Dos tapas laterales fabricadas en material rígido dieléctrico que fijarán la placa metálica a la base mediante tornillería, asegurando su inmovilidad y mantenimiento de la planitud durante la fabricación. La conexión a tierra de la placa de aluminio se realizará por medio de un terminal metálico ubicado centralmente debajo del colector, el cual atraviesa el soporte aislante y hace contacto firme con la placa; este terminal estará sujeto con un tornillo de material aislante, logrando así una conexión eléctrica confiable sin generar caminos de corriente no deseados.

6.2 Condiciones de funcionamiento

- **Voltaje aplicado:** Utilizar una fuente de alta tensión (corriente directa) en el rango típico de 10 a 20 kV para generar el campo eléctrico necesario. Un voltaje demasiado bajo puede impedir la formación del chorro de polímero.
- **Distancia aguja-colector:** Ajustar la separación entre la punta de la aguja y el colector generalmente entre 10 y 20 cm. Distancias menores pueden resultar en una evaporación insuficiente del disolvente
- **Caudal de alimentación:** Dosificar la solución polimérica mediante la bomba de jeringa a un flujo controlado, parcialmente del orden de 0.5-2 mL/h para una aguja simple (0,5 mm).
- **Configuración eléctrica (polaridad y tierra):** Configure correctamente el sistema eléctrico: generalmente la aguja (émbolo) se carga con alto voltaje positivo (o negativo) y el colector se conecta a tierra o a voltaje opuesto. Esto garantiza un campo eléctrico uniforme entre aguja y colector. Asegurar una buena conexión a tierra es esencial tanto para la efectividad del proceso como para la seguridad del operador.
- **Condiciones ambientales:** Mantener controlados los factores ambientales durante el proceso. Una temperatura ambiente moderada (20-25 °C) y una humedad relativa baja a moderada (en torno al 30-50 %).

6.3 Recomendaciones de mantenimiento

- **Limpieza después de cada uso:** Limpiar todos los componentes tras cada sesión de ensayos. En particular, aguja, jeringa y reponer sus tubos flexibles, así como el colector, deben quedar libres de residuos de polímero solidificado. Realice la limpieza siempre con el equipo apagado y sin carga eléctrica.
- **Inspección periódica tras cada ensayo individual de cables y conexiones:** Verifique regularmente el estado de los cables de alta tensión, las conexiones eléctricas y la toma de tierra del equipo.
- **Bomba de jeringa y partes mecánicas:** Mantenga la bomba de jeringa limpia, calibrada y en buen estado. Limpiar cualquier derrame de solución o atasco en el mecanismo de avance. Periódicamente,

compruebe que la velocidad de alimentación programada en la bomba coincide con el flujo real entregado (calibración del caudal), garantizando así la precisión y reproducibilidad del proceso.

- **Colector y entorno de trabajo:** Mantenga el colector limpio y en condiciones óptimas. Tras cada uso, retire las fibras depositadas; en el caso de colectores planos, puede facilitar la limpieza.
- **Almacenamiento adecuado:** Después de utilizar el equipo, apáguelo correctamente. Un almacenamiento apropiado prolonga la vida útil del equipo y asegura que esté en condiciones óptimas cuando se requiera de nuevo.
- **Reemplazo de componentes desgastados:** Sustituir a intervalos adecuados los componentes consumibles o deteriorados del sistema. Por ejemplo, emplear agujas nuevas si las anteriores se doblan, oxidan u obstruyen.

6.4 Metodología de fabricación

1. Preparar la disolución polimérica: Disolver la PCL (y el alga , si aplica) en acetona con agitación
2. Cargar la jeringa: Introducir la disolución en una jeringa de 20 mL.
3. Montar la jeringa en la bomba: Fijar la jeringa en el portajeringas de la bomba de infusión, conectar el tubo hasta la aguja metálica.
4. Colocar el colector: Asegurar la placa colectora (p. ej., de aluminio) sobre la base, conectada a tierra.
5. Cerrar la cámara: Verifique que la cámara de protección esté correctamente cerrada para operar de forma segura.
6. Configurar la bomba: Ajustar el caudal (ej. 2 ml/h).
7. Encender la fuente de alto voltaje: Active la fuente y aplique el voltaje deseado.
8. Iniciar el proceso: Activar la bomba para comenzar la expulsión de la solución.
9. Finalizar el hilado: Apagar la bomba y luego la fuente de alta tensión. Espere unos segundos para evitar descargas residuales y utilice la lanza.
10. Retirar el filtro: Abra la cámara, desconecte la jeringa y extraiga cuidadosamente el filtro formado sobre el colector.