



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**DISEÑO DE PRECIPITADOR ELECROSTÁTICO PARA CLUSTER DE
MÁQUINAS DE SINTESIS DE NANOPARTÍCULAS**

POR

Alonso Ignacio San Martín Aravena

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dr. Carlos Medina Muñoz

Marzo 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Alonso Ignacio San Martín Aravena

© 2024 Alonso Ignacio San Martín Aravena

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer a cada persona que me ha apoyado en esta etapa tan importante a nivel personal y académico, que no solo contempla los arduos meses de trabajo en este proyecto, si no que durante todos los años siendo estudiante, aprendiendo conocimientos técnicos y experiencias valiosas para desenvolverme en la vida.

El agradecimiento más importante es para mis padres, Angela y Juan, por todo el amor entregado y siempre me han demostrado las cosas importantes en la vida.

Agradezco a mi núcleo familiar, mis hermanos Camila, Juan Carlos y Katherine, a mi tía Ruby y tía Sara por todo el apoyo entregado, por cada llamada y mensaje de aliento, por motivarme y siempre estar para mí.

Agradezco a Consuelo, por ser mi compañera de vida estos años, siempre apoyándome y haciendo la vida más bonita.

Agradezco a mis amigos de la infancia, Vicente y Sebastián M., a mis compañeros y amigos de carrera, Daniel, Diego H., Diego M., Sebastián O., Pablo, Natan, Cristóbal y Johann, que sin ellos no hubiese sido lo mismo estos años.

Agradezco a mi profesor guía Dr. Carlos Medina Muñoz por la oportunidad de trabajar en este proyecto y las libertades que me otorgo durante el desarrollo y fabricación. También agradecer a Joaquín, Enrique y Thyare, equipo que trabaja en el diseño del resto de la DARC-AC. Además, incluir a cada uno de los tíos que trabajan en el taller de máquinas herramientas de la universidad, don Rodrigo, don Eduardo, don Mario y don Gerhard.

Agradecer a ANID el apoyo económico entregado mediante FONDEF IT21i0076.

Por último y no menos importante, agradecer a mi alma mater Universidad de Concepción por todas las oportunidades y conocimientos que entrega a sus alumnos.

Esta memoria está dedicada a Angela y Juan.

Resumen

La nanotecnología es la ciencia que se dedica al diseño, síntesis, producción y aplicación de estructuras y objetos a nivel nanométrico, siendo el nanómetro una milmillonésima parte de un metro. La amplia gama de tamaños, materiales y formas que componen las nanopartículas y nanoestructuras entregan un sin límite de posibles funcionalidades. Actualmente se busca desarrollar nuevas aplicaciones en esta área, puesto que las propiedades y comportamientos son únicos en esta escala de composición de la materia.

Una de las principales limitaciones al desarrollar estas investigaciones, es la obtención de nanoestructuras de forma masiva, así como su clasificación por tamaño. Por ello, los nuevos estudios tienen como propósito que este proceso sea atractivo, por un lado, en términos de volumen de producción y por otro, económicamente viable.

En la Universidad de Concepción, se busca fabricar un cluster de máquinas de descarga de arco eléctrico en atmósfera controlada (DARC-AC), para trabajar simultáneamente con varias de estas máquinas. Con anterioridad se fabricó la cámara de reacción de una máquina DARC-AC, la que mediante una descarga de arco eléctrico entre dos electrodos, permite generar una nube de nanopartículas en una cámara de reacción, nube que se inyectará mediante un deflector a una cámara de recolección donde se ubicará un precipitador electrostático, conformado por placas de acero formando cátodos y ánodos, generando la adhesión de nanopartículas a estas placas y posteriormente recolectarlas. Se busca que el precipitador funcione con un campo electrostático generado por fuentes de voltaje aproximadamente a 6000 [V].

En esta memoria de título se diseña y fabrica la cámara de recolección, así como cada pieza que conforma el precipitador electrostático, las que se ensamblan al resto de la máquina DARC-AC ya fabricada. Se realizan diversas pruebas previo a la puesta en marcha final, determinando los parámetros óptimos de funcionamiento, de manera experimental. Con todo en regla se dispuso a realizar las pruebas oficiales para sintetizar nanomaterial con una recolección exitosa de nanopartículas desde las placas.

Finalmente, el rendimiento másico fue levemente superior al 40%, ya que un gran porcentaje del material reaccionado se adhirió a otros componentes metálicos (cámara de reacción y deflector), sin llegar a la cámara de recolección. Además, se analizaron las muestras sintetizadas mediante análisis TEM, obteniendo nanopartículas de origen metálico con un 85.71% de nanopartículas con tamaño inferior o igual a 100 [nm] y de estas, un tamaño promedio de 45.33 [nm], cumpliendo el objetivo esencial de sintetizar nanopartículas.

Palabras clave: Nanopartículas, síntesis, precipitador, electrostático, recolección.

Abstract

Nanotechnology is the science dedicated to the design, synthesis, production, and application of structures and objects at the nanometer level, with a nanometer being one billionth part of a meter. The wide range of sizes, materials, and shapes that compose nanoparticles and nanostructures offer limitless potential functionalities. Currently, there is a search for developing new applications in this area, as the properties and behaviors are unique at this scale of matter composition.

One of the main limitations in developing these investigations is obtaining nanostructures in mass and their size classification. Therefore, new studies aim to make this process attractive both in terms of production volume and economic viability.

In University of Concepción, the goal is to manufacture a cluster of machines for arc discharge in controlled atmosphere (DARC-AC) to work simultaneously with several of these machines. Previously, the reaction chamber of a DARC-AC machine was fabricated, which, through an electric arc discharge between two electrodes, allows generating a cloud of nanoparticles in a reaction chamber. This cloud will be injected by a deflector into a collection chamber where an electrostatic precipitator will be located, consisting of steel plates forming cathodes and anodes, generating the adhesion of nanoparticles to these plates, and subsequently collecting them. The aim is for the precipitator to operate with an electrostatic field generated by voltage sources approximately at 6000 [V].

In this thesis, the collection chamber is designed and fabricated, as well as each piece that forms the electrostatic precipitator, which is assembled to the rest of the already manufactured DARC-AC machine. Various tests are conducted before the final startup, determining the optimal operating parameters experimentally. With everything in order, official tests were conducted to synthesize nanomaterial with a successful collection of nanoparticles from the plates.

Finally, the mass yield was slightly above 40%, as a large percentage of the reacted material adhered to other metallic components (reaction chamber and deflector), without reaching the collection chamber. Additionally, the synthesized samples were analyzed through TEM analysis, obtaining metal-origin nanoparticles with 85.71% of nanoparticles with a size equal to or less than 100 [nm], and among these, an average size of 45.33 [nm], fulfilling the essential objective of synthesizing nanoparticles.

Keywords: Nanoparticles, synthesis, precipitator, electrostatic, collection.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas	vii
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Objetivos generales y específicos.....	3
1.3 Condiciones de diseño	3
1.4 Metodología de trabajo	5
2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico	7
2.1 Conceptos Clave	7
3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte	10
3.1 Investigaciones y literatura relevante acerca de la síntesis de nanopartículas.....	10
3.2 Investigaciones y literatura relevante acerca de Precipitador Electrostático.....	13
4 CAPÍTULO 4: Dimensionamiento y Desarrollo.....	14
4.1 Dimensionamiento del área de recolección de placas	14
4.2 Dimensionamiento de Flujo de Gas en Cámara de Recolección.....	25
5 CAPÍTULO 5: Puesta en Marcha y Obtención de Nanopartículas	32
6 CAPÍTULO 6: Análisis de Funcionamiento	52
7 CAPÍTULO 7: Conclusiones y trabajos futuros	58
7.1 Conclusiones.....	58
7.2 Trabajos futuros.....	59
Referencias	60
Anexo A: Plano de deflector ya diseñado y fabricado por C4i.....	62
Anexo B: Plano caras cámara de recolección fabricadas en acrílico	64
Anexo C: Set de porta placas con las placas montadas.....	67
Anexo D: Set de placas con nanopartículas de cobre reaccionado con argón	69
Anexo E: Set de placas con nanopartículas de zinc reaccionado con argón	71
Anexo F: Set de placas con nanopartículas de aluminio reaccionado con argón.....	73

Lista de Figuras

Figura 1: DARC-AC v1 (Fuente: [8]).	2
Figura 2: DARC-AC v2 (Fuente: [8]).	2
Figura 3: Vista isométrica del diseño de DARC-AC v3.	2
Figura 4: Nanopartículas de plata mediante análisis TEM con distintos tamaños (Fuente: [15]).	7
Figura 5: Esquema de ionización en las placas (Fuente: [8]).	9
Figura 6: Esquema clasificación de nanopartículas (Fuente: [18]).	10
Figura 7: Esquema comparativo Top-Down y Bottom-Up (Fuente: [19]).	11
Figura 8: Esquema de arco eléctrico en atmósfera de helio (Fuente: [20]).	12
Figura 9: Cámara de aire ensamblada en prototipo con placas planas (Fuente: [24]).	13
Figura 10: Vista isométrica del diseño del deflector para DARC-AC v3.	14
Figura 11: Perfil velocidad del fluido en deflector (Fuente: [25]).	15
Figura 12: Perfil velocidad del fluido en deflector con seccionamientos internos (Fuente: [25]).	15
Figura 13: Distribución de velocidad en zona de precipitadores en plano vertical (Fuente: [25]).	16
Figura 14: Vista isométrica del diseño inicial de canasto propuesto.	17
Figura 15: Idea conceptual de regleta inferior.	17
Figura 16: Idea conceptual de regleta superior.	17
Figura 17: Vista isométrica del conector de la cámara de recolección con el deflector.	18
Figura 18: Vista isométrica del fondo de la cámara de recolección.	18
Figura 19: Vista isométrica del ensamble de estructura externa de la cámara de recolección.	19
Figura 20: Vista frontal de placa de acero inoxidable.	20
Figura 21: Detalle de corte en placa de acero inoxidable.	20
Figura 22: Ensamble de set de placas.	21
Figura 23: Vista isométrica del ensamble de estructura con los canastos.	22
Figura 24: Ensayo de elementos finitos de carga en caras laterales de acrílico.	23
Figura 25: Condiciones para análisis de presión interna en caras laterales de acrílico mediante elementos finitos.	24
Figura 26: Resultado de simulación de elementos finitos de presión interna.	24
Figura 27: Prototipo de prueba ensamblado y montado.	32
Figura 28: Prototipo de prueba ensamblado y montado visto desde otra perspectiva.	32
Figura 29: Set de placas con nanopartículas de zinc adheridas a las placas.	33
Figura 30: Vista superior del frasco de muestra con nanopartículas de zinc con oxígeno.	33
Figura 31: Vista lateral del frasco de muestra con nanopartículas de zinc con oxígeno.	33
Figura 32: Cámara de recolección fabricada.	34
Figura 33: Cámara de recolección en conjunto al resto de la máquina.	35
Figura 34: Prueba de hermeticidad de la cámara de recolección.	35
Figura 35: Cámara de recolección con nanopartículas de cobre en suspensión.	36
Figura 36: Set de placas con nanopartículas de cobre.	37
Figura 37: Placa con nanopartículas de cobre.	37
Figura 38: Cámara de recolección con nanopartículas de zinc en suspensión.	38
Figura 39: Set de placas con nanopartículas de zinc.	38

Figura 40: Placa con nanopartículas de zinc.	39
Figura 41: Cámara de recolección con nanopartículas de aluminio en suspensión.	39
Figura 42: Set de placas con nanopartículas de aluminio.	40
Figura 43: Placa con nanopartículas de aluminio.	40
Figura 44: Muestras recolectadas de materiales reaccionados con argón.	41
Figura 45: Muestras recolectadas de materiales reaccionados con oxígeno.	42
Figura 46: Muestras analizadas en TEM de Cobre con Argón.	42
Figura 47: Muestras analizadas en TEM de Aluminio con Argón.	43
Figura 48: Muestras analizadas en TEM de Zinc con Argón.	43
Figura 49: Muestras analizadas en TEM de Aluminio con Oxígeno.	44
Figura 50: Gráfico de línea nanopartículas de cobre con argón.	45
Figura 51: Gráfico de línea nanopartículas de cobre con oxígeno.	45
Figura 52: Gráfico de línea nanopartículas de zinc con argón.	46
Figura 53 Gráfico de línea nanopartículas de zinc con oxígeno.	46
Figura 54: Gráfico de línea nanopartículas de aluminio con argón.	47
Figura 55: Gráfico de línea nanopartículas de aluminio con oxígeno.	47
Figura 56: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 200 nm reaccionadas con argón.	48
Figura 57: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 200 nm reaccionadas con oxígeno. ..	49
Figura 58: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 100 nm reaccionadas con argón.	50
Figura 59: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 100 nm reaccionadas con argón.	50
Figura 60: Boquilla obstruida por chispas de cobre soldadas.	53
Figura 61: Boquilla con desgaste producto de chispas soldadas y su posterior limpieza.	53
Figura 62: Boquilla con protector en su extremo.	53
Figura 63: Tungsteno con material pegado a muy alta temperatura.	54
Figura 64: Tungsteno con material pegado a alta temperatura.	54
Figura 65: Comparativa de tungsteno original contra el tungsteno con acumulación de material. ...	55
Figura 66: Comparación de tungsteno original contra el tungsteno desgastado.	55
Figura 67: Arco eléctrico en placas del precipitador.	56
Figura 68: Arcos eléctrico en placas del precipitador con menos de 1 segundo de diferencia.	57
Figura 69: Interior de la cámara de reacción con material adherido.	57
Figura A.1: Vista posterior de deflector.	62
Figura A.2: Vista lateral de deflector.	62
Figura A.3: Vista de corte A-A.	63
Figura A.4: Vista superior de deflector.	63
Figura B.1: Plano cara lateral con purga.	64
Figura B.2: Plano cara lateral.	65
Figura B.3: Plano cara posterior.	65
Figura B.4: Plano cara frontal.	65
Figura B.5: Detalle zona A delimitado en Figura B.4 de cara frontal.	66
Figura C.1: Vista lateral del set de placas ensamblado.	67
Figura C.2: Vista superior del set de placas ensamblado.	67

Figura C.3: Vista frontal del set de placas ensamblado.	68
Figura C.4: Vista posterior del set de placas ensamblado.	68
Figura D.1: Foto macro del set de placas con nanopartículas de cobre.	69
Figura D.2: Foto posterior del set de placas con nanopartículas de cobre.	69
Figura D.3: Foto de otro ángulo del set de placas con nanopartículas de cobre.	70
Figura D.4: Foto macro del polvo de nanopartículas de cobre recolectado de las placas.	70
Figura E.1: Foto macro del set de placas con nanopartículas de zinc.	71
Figura E.2: Foto posterior del set de placas con nanopartículas de zinc.	71
Figura E.3: Foto superior del set de placas con nanopartículas de zinc.	72
Figura E.4: Foto del polvo de nanopartículas de zinc recolectado en las placas.	72
Figura F.1: Foto del set de placas con nanopartículas de aluminio.	73
Figura F.2: Foto lateral del set de placas con nanopartículas de aluminio.	73
Figura F.3: Foto macro de placa con nanopartículas de aluminio adherido.	74

Lista de Tablas

Tabla 1: Longitud de camino libre molecular para los diferentes gases de trabajo.	29
Tabla 2: Factor de Cunningham para los gases de trabajo.	29
Tabla 3: Viscosidad de los gases en condiciones de trabajo.	30
Tabla 4: Velocidad de migración de los gases de trabajo.	30
Tabla 5: Parámetros funcionamiento DARC-AC.	36
Tabla 6: Parámetros importantes del análisis de muestras.	44
Tabla 7: Parámetros importantes del análisis de muestras.	48
Tabla 8: Rendimiento másico por muestra.	51

Glosario

CFD	:	Computational Fluid Dynamics
C4i	:	Centro para la Industria 4.0
DARC-AC	:	Descarga de Arco Eléctrico – Atmósfera Controlada
ESP	:	Electro Static Precipitator (Precipitador Electrostático)
ISO	:	International Organization for Standardization
PES	:	Precipitador Electrónico
PLA	:	Ácido Poliláctico
PM	:	Material Particulado
UdeC	:	Universidad de Concepción
TEM	:	Microscopio Electrónico de Transmisión

Símbolos

A	:	Área [m ²]
A	:	Amper (intensidad de corriente)
Al	:	Aluminio
Al ₂ O ₃	:	Óxido de aluminio
Ar	:	Argón
C	:	Coulomb
C_u	:	Factor de Cunningham, [-]
Cu	:	Cobre
CuO	:	Óxido de cobre
d	:	Distancia, [m]
d_p	:	Diámetro de partícula, [μ m]
e	:	Base de logaritmo natural (= 2.718)
E	:	Campo eléctrico, [V/m]
E_o	:	Intensidad del campo en que se cargan las partículas, [V/m]
E_p	:	Intensidad del campo en que se colectan las partículas, [V/m]
k	:	Constante de Matts-Ohnfeldt
m	:	Metro
μ	:	Viscosidad del gas, [Pa · s]
mm	:	Milímetro
MPa	:	Mega pascal
η	:	Eficiencia de recolección del precipitador [-]
nm	:	Nanómetro
O	:	Oxígeno
Pa	:	Pascal
π	:	Pi
q	;	Carga de la partícula, [C]
Q	:	Caudal, [m ³ /s]
s	:	Segundo
V	:	Voltaje
w	:	Velocidad de migración, [m/s]
w_e	:	Velocidad de migración efectiva (experimentalmente), [m/s]
w_k	:	Velocidad de migración promedio, [m/s]
Zn	:	Zinc
ZnO	:	Óxido de zinc

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La nanotecnología es un área que aborda el estudio y manipulación de materia a nivel nanométrico, siendo un nanómetro una milmillonésima parte de un metro. Mundialmente, esta área tiene mucho potencial por desarrollar, en la que diversas entidades académicas y privadas están en constante investigación [1], generando nuevos métodos de obtención y/o síntesis, utilizando los últimos recursos tecnológicos como el *machine learning* mediante inteligencia artificial [2], a la vez que se sigue avanzando en métodos más comunes como lo son la síntesis biológica desde plantas y microorganismos [3], así como síntesis directa desde el mineral en sí [4].

Se busca desarrollar nuevas aplicaciones, puesto que las propiedades y comportamientos son únicos, diferentes a las presentadas cuando el tamaño es superior respecto a esta escala de composición. Así, la amplia gama de tamaños, materiales y forma que conforman en sí las nanopartículas y nanoestructuras entregan un sin límite de posibles funcionalidades [5]. Es por eso que sus usos están siendo estudiados principalmente en áreas como las vinculadas a las ingenieriles, ambientales, electrónicos y biológicos. Algunos estudios relevantes abordan: posibles tratamientos contra el cáncer [6], desarrollo de películas de nanocompuestos con propiedades antibacterianas [7], entre otras.

Una de las principales limitaciones que se presenta al desarrollar avances en esta tecnología, es la falta de métodos físicos y químicos de síntesis para la obtención de nanoestructuras de forma masiva, así como clasificarlas por tamaño y forma. Todos estos métodos deben ser más atractivos en términos de producción y económicamente factibles, para un uso permanente y generalizado en la industria, ya que los que se utilizan hoy en día son de muy baja producción y/o tipo investigación en laboratorio donde solo se realiza unas limitadas veces.

En la Universidad de Concepción, se han desarrollado diseños de máquinas para la síntesis de nanopartículas, que han sido fabricadas en formato prototipo único, sin la producción de más máquinas posteriormente. Estas máquinas que funcionan generando una descarga de arco eléctrico en una atmósfera controlada, reciben el nombre de DARC-AC. Cada versión de la máquina ha tenido sus variaciones importantes, inicialmente en la DARC-AC v1, las nanopartículas se acumulaban por gravedad en el fondo de su cámara de recolección luego de 1 a 2 horas, mostrada en la Figura 1, luego en la segunda versión (DARC-AC v2) se consideraron dos cámaras de recolección, cada una con un precipitador electrostático en su interior [8], versión mostrada en la Figura 2.



Figura 1: DARC-AC v1 (Fuente: [8]).

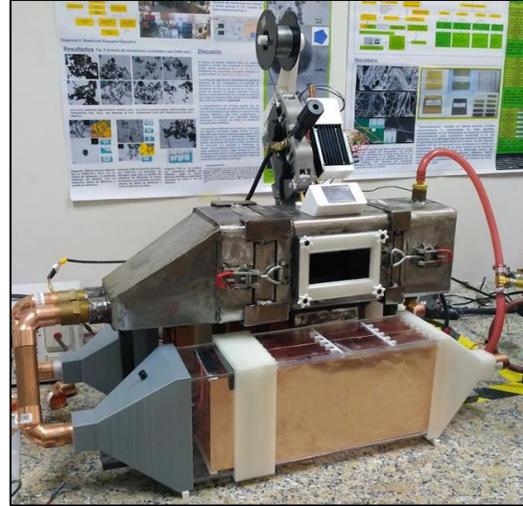


Figura 2: DARC-AC v2 (Fuente: [8]).

En la versión actual, trabajada en la Universidad de Concepcion mediante el Centro para la Industria 4.0, también llamado “C4i”, se desarrolla un prototipo de una máquina de descarga de arco en su versión número 3, nombrada “DARC-AC v3”, la que, mediante una descarga de arco eléctrico [9] en una atmósfera controlada, caracterizada por la descarga de energía entre dos electrodos con una diferencia de voltaje, se produce la reacción necesaria para el proceso de lograr que el material de aporte quede en una nube en suspensión dentro del sistema fabricado. Esta máquina puede separarse en tres etapas: alimentación, reacción y recolección, las que son detalladas en el siguiente párrafo. Esta máquina permite la síntesis y separación de nanoestructuras a mediana escala, prototipo que permitirá preparar nanoestructuras de los siguientes materiales: Zn, Cu, Al, ZnO, CuO y Al₂O₃. El diseño aún en revisión de la máquina por el C4i, se muestra en la Figura 3.

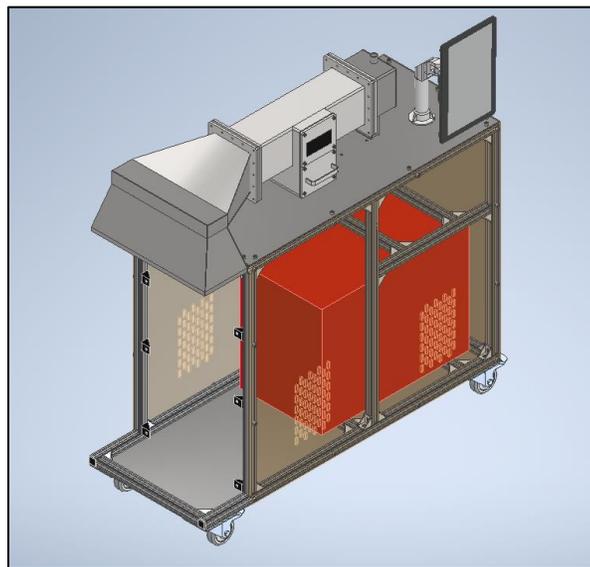


Figura 3: Vista isométrica del diseño de DARC-AC v3.

El funcionamiento empieza en la etapa de alimentación, donde dos alimentadores de alambre, un estanque de gas y una fuente de energía eléctrica funcionan simultáneamente para generar en la cámara de reacción la descarga de arco en una atmosfera controlada. Luego de la cámara de reacción, se encuentra el deflector y precipitador, el deflector es el encargado de conectar la cámara de reacción con el precipitador y en este último se finaliza el proceso con la recolección de nanopartículas.

Previo a realizar los diseños se debió estudiar el funcionamiento de un precipitador electrostático, así como definir las condiciones de diseño establecidas en las siguientes secciones del informe. Encontrando casos donde incluso se sintetizan nanotubos de carbono por el método de arco de descarga eléctrica en Colombia [10], así como diversos estudios sobre el uso de dos precipitadores electrostáticos trabajando en conjunto, en la reducción de PM2.5 y PM1 [11][12]. Respecto a la utilización de precipitadores electrostáticos en la industria actual, se tiene experiencia en su uso como dispositivo para la filtración de gases de combustión proveniente de hornos, impidiendo mínimamente el flujo de gases y utiliza la fuerza electrostática inducida para eliminar principalmente partículas finas. Esto debido a su capacidad para manejar gases a alta temperatura.

En esta memoria de título, se realizará el diseño computacional del precipitador y la cámara de recolección en sí, como también, la fabricación, posterior puesta en marcha y validación del equipo en dependencias de la Universidad de Concepción. Esto con la intención a futuro, se pueda operar en forma simultánea más de una máquina DARC-AC en formato de cluster, permitiendo aumentar la síntesis y clasificación por tamaño de nanopartículas.

1.2 Objetivos generales y específicos

Objetivo general: Diseñar, fabricar y validar precipitador electrostático para cluster de máquinas de síntesis de nanopartículas DARC-AC.

Objetivos específicos:

- 1) Definir limitaciones a considerar en diseño de cámara de recolección y precipitador electrostático para el funcionamiento requerido.
- 2) Diseñar cámara de recolección y precipitador electrostático.
- 3) Fabricar cada una de las partes diseñadas computacionalmente.
- 4) Ensamblar y poner en marcha máquina DARC-AC.
- 5) Validar funcionamiento de cámara de recolección con precipitador electrostático para DARC-AC.

1.3 Condiciones de diseño

La primera condición de diseño es que la cámara de recolección funcione en conjunto a la máquina DARC-AC diseñada en la Universidad de Concepción. Además, como condición fundamental, el

precipitador electrostático debe poder ensamblarse y funcionar dentro de la cámara de recolección también diseñada.

La cámara de recolección debe permitir un buen sello hermético donde se conecta al deflector, debe permitir montar más de un set de placas en su interior, también se debe poder realizar una fácil y rápida extracción de estos.

El precipitador electrostático actuará en más de una etapa, permitiendo generar distintas intensidades de campo electrostático y así, atraer distintos órdenes de magnitud en relación con el diámetro de las nanopartículas. Cada etapa-set del precipitador electrostático se compondrá de una estructura en forma de canastillo, que deberá deslizarse dentro de la cámara de recolección, así como también dará soporte a cada una de las placas involucradas que generen el campo electrostático en sí.

El método de conexión eléctrica se definirá en cuanto a la facilidad de conexión de cada una de las placas en el set, así como la factibilidad en los tiempos de conexión y desconexión. También se definirá el método de conexión del canastillo a la fuente de poder ubicada en el exterior, sin influir en la hermeticidad de la cámara de recolección.

Una vez obtenido el diseño del canastillo, se realizará un estudio de análisis estructural a lo diseñado con las cargas más exigentes.

También, se debe definir el método de extracción de cada canastillo desde la cámara de recolección mediante una o más partes móviles, en conjunto a algún tipo de fijación o traba, para asegurar la hermeticidad total de la cámara de recolección.

En cada pieza diseñada se deben definir los materiales de fabricación, así como los procesos requeridos.

Se debe considerar un sistema de filtro para asegurar que el flujo de gas que se expulsa una vez concluido su paso por la cámara de recolección (sin material particulado), sea seguro para el operador de la máquina y el medioambiente.

1.4 Metodología de trabajo

La primera etapa del trabajo es compilar información de la importancia de las nanopartículas en la sociedad, así como tener conocimiento de algunos otros métodos de obtención y/o síntesis presentes en la actualidad, además de posibles aplicaciones en investigación y desarrollo. También contempla redactar un estado del arte que incluya investigación y resultados obtenidos en la literatura. En esta parte investigativa se contempla estudiar los planos de la máquina DARC-AC que está siendo desarrollada en la Universidad de Concepción, revisando la existencia de limitaciones geométricas de las estructuras, como también obtener una referencia respecto a los posibles materiales y procesos de fabricación utilizados en este tipo de máquinas.

La parte investigativa además considera estudiar el uso y aplicaciones de precipitadores electrostáticos en la industria y en la academia.

Con las limitaciones propias y aplicaciones externas recopiladas, se dará paso a bosquejar computacionalmente las piezas mediante “Inventor Autodesk”, los que primero definirán las dimensiones externas de cada pieza. En primera instancia, las dimensiones externas las dará el conector que une el deflector ya diseñado a la cámara de recolección, como también hay que considerar la modificación en altura de la estructura de aluminio donde se monta la cámara de reacción y demás componentes.

Con las primeras dimensiones externas de la cámara de recolección se puede comenzar a bosquejar ideas del canastillo, considerando una altura de placa cercana a los 300 [mm]. Esta parte es muy importante, ya que también se debe definir la forma de conexión de cada placa dentro del canastillo y así aplicar distintas polaridades eléctricas. Además, se debe definir las dimensión y forma de cada placa del precipitador.

Luego, se busca implementar el concepto de “modular” la distancia entre las placas dentro del canastillo. Con esto resuelto, se procede a analizar estructuralmente la pieza (o piezas) diseñadas.

Se establece la forma de conexión del canastillo hacia la fuente de poder externa, con conectores comerciales y adquiribles en corto plazo.

Se define la forma de deslizar cada canastillo dentro de la placa, así como las puertas o piezas móviles que permitan introducir el canastillo y las piezas, que permitan mantener la hermeticidad de la nube de material que está dentro de la cámara, para luego hacerla fluir a través de un filtro y evitar la liberación de material particulado en suspensión al ambiente.

Con el diseño final que considera todas las limitaciones y necesidades definidas en el proceso, se procederá a obtener los planos finales, para poder comprar los materiales y dar inicio con la fabricación.

La fabricación, al igual que el diseño, se realiza de cada pieza por separado. En cuanto a la cámara de recolección, se solicita a una empresa externa el material y ensambla en el taller de herramientas de la universidad. Los canastillos serán impresos en PLA en máquinas del laboratorio de la universidad,

así como las piezas modulares de ser necesarias. Después, se realizará la fabricación de la parte eléctrica, los conectores serán fabricados y ensamblados a los canastillos una vez que estos estén listos para ensamblarse al conjunto. Las placas que generan el campo electrostático también se solicitarán a la empresa externa para su fabricación.

Finalmente, se ensamblarán todas las piezas y se ejecutarán pruebas para constatar que no existe riesgos eléctricos o de cortocircuitos en el sistema, así como que no existan fugas de fluido al exterior por falta de hermeticidad. Luego, se autorizará el uso con el resto de los componentes de la DARC-AC en funcionamiento. Con esto se podrá dar paso a las pruebas de funcionamiento y posterior análisis de las muestras obtenidas en la recolección mediante análisis TEM, logrando la validación para el funcionamiento requerido.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Conceptos Clave

Para comprender correctamente el funcionamiento de este sistema, diseñado y fabricado para generar y sintetizar nanopartículas, es necesario definir algunos conceptos que involucran algunas piezas como también algunos procesos aplicados.

2.1.1 Nanotecnología

Es un área de la ciencia que tiene un carácter interdisciplinario abarcando áreas del conocimiento como física, química, biomédica y ciencia de los materiales [13][14]. Ha sido descrita como una tecnología emergente que opera con objetos (átomos y moléculas) enfocados en una escala de aproximadamente 100 nanómetros y más pequeños.

2.1.2 Nanopartículas

Una nanopartícula se define por su etimología como una partícula que posee las tres dimensiones menores a 100 [nm]. Son de gran interés científico, ya que son un puente entre los materiales a granel y las estructuras atómicas o moleculares; estas pueden exhibir propiedades de tamaño, que pueden diferir significativamente con aquellas observadas en partículas finas o materiales amontonados [14]. En la sección “Estado del Arte” se profundiza más sobre su clasificación y aspectos importantes. En la Figura 4 se ejemplifica la comparativa en los distintos tamaños de material.

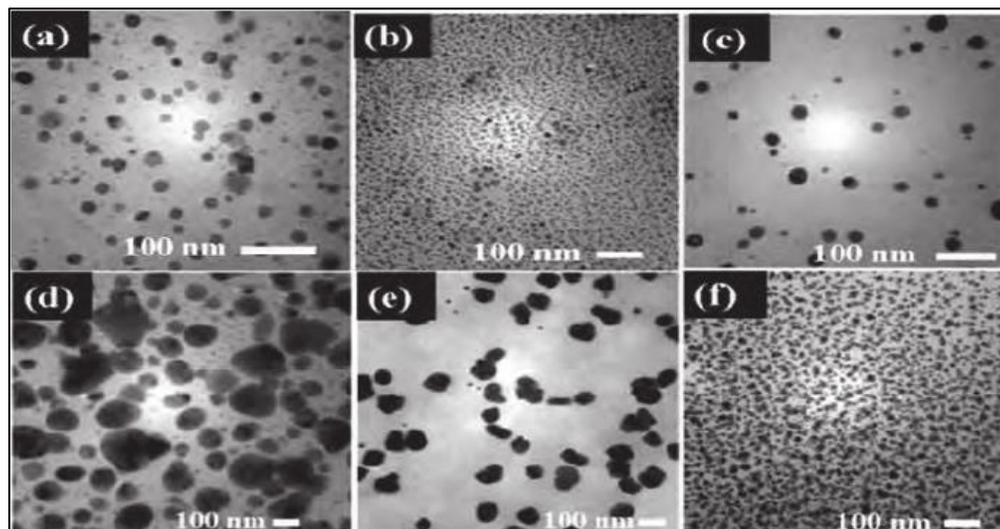


Figura 4: Nanopartículas de plata mediante análisis TEM con distintos tamaños (Fuente: [15]).

2.1.3 Descarga de arco eléctrico

La descarga de arco eléctrico entre dos electrodos se genera producto de la diferencia de potencial experimentada entre ellos. Para iniciar un arco eléctrico basta con poner en contacto los electrodos, la corriente provoca un gran calentamiento en la punta de estos, que luego al separar los electrodos se forma el llamado “Arco eléctrico” en estado de plasma. El electrodo positivo puede alcanzar temperaturas del orden de 3.500 [°C]. Cabe destacar que un uso cotidiano de estas descargas de arco eléctrico es en el proceso de soldadura SMAW o también conocido como soldadura al arco manual.

2.1.4 Plasma

Es conocido como el cuarto estado de agregación de la materia, un estado fluido del material similar al estado gaseoso, pero en el que una parte de sus partículas están cargadas eléctricamente (ionizadas) y no poseen equilibrio electromagnético.

2.1.5 Electrodo

Un electrodo es un conductor eléctrico con la capacidad de contar con una parte no metálica. En el caso del proyecto, se utiliza la parte eléctrica para realizar la descarga de arco eléctrico y la parte aislante para poder ubicar el electrodo en las paredes de la cámara de reacción.

2.1.6 Precipitador electrostático

Un precipitador electrostático es un dispositivo con que se puede atraer un tipo de partículas cargadas eléctricamente. El principio de ionización es la base del funcionamiento de un PES (precipitador electrostático), las partículas que pasan a través de las placas se ven afectadas por un campo eléctrico, lo que resulta en partículas cargadas eléctricamente.

Los gases pasan por el interior de una cámara, lugar donde se crea el campo electrostático formado por electrodos de descarga (negativo) y electrodos colectores (positivos) [16], en el caso del proyecto, las placas son de acero inoxidable. Cuando el gas pasa por las placas, este se carga negativamente debido al principio de ionización y es atraído a los electrodos colectores debido a su diferente carga eléctrica como se muestra en la Figura 5.

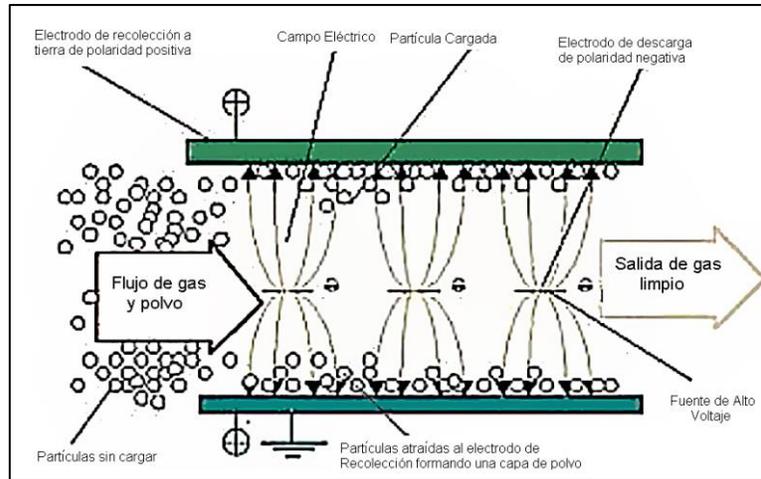


Figura 5: Esquema de ionización en las placas (Fuente: [8]).

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

La revisión de literatura se enfoca en dos grandes temáticas: la síntesis de nanopartículas y el precipitador electrostático.

3.1 Investigaciones y literatura relevante acerca de la síntesis de nanopartículas

3.1.1 Las nanopartículas y sus clasificaciones

Las nanopartículas pueden ser clasificadas bajo la norma ISO/TS 80004-1:2023 [17] según cuantas dimensiones tiene menor a 100 [nm], cuando cumple en una dimensión se tienen nanoplacas, cuando cumple en dos dimensiones constituye nanotubos y nanofibras, mientras que cuando se cumple el requisito en las tres dimensiones (3D) se llaman nanopartículas isodimensionales (esto se esquematiza en la Figura 6). Por consiguiente, la clasificación de partículas con más aplicaciones posibles en las diversas áreas está en el rango de 1 a 100 [nm].

Una de las características más importantes es su relación área superficial/volumen, a mayor relación incrementa el número de interacciones partícula-matriz, aumentando los efectos sobre las propiedades del material.

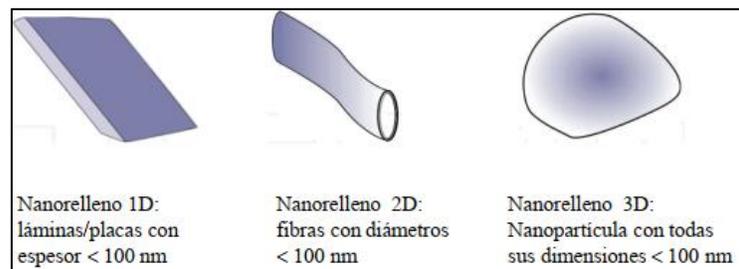


Figura 6: Esquema clasificación de nanopartículas (Fuente: [18]).

3.1.2 Procesos de síntesis de nanopartículas

De manera general, los métodos de síntesis de nanopartículas se clasifican en dos tipos: los procesos “Top-Down”, que utilizan métodos físicos, y los “Bottom-Up”, que usan métodos químicos, como por ejemplo utilizan una solución.

Los métodos Top-Down son aquellos que reducen el tamaño de agregación del material hasta llegar a un tamaño nanométrico con un consumo considerable de energía, mientras que los métodos Bottom-Up involucran la obtención de un estado de agregación nanométrico partiendo de una dispersión molecular, lo que conlleva que un método de síntesis es contrario al otro [19], lo que se esquematiza en la Figura 7.

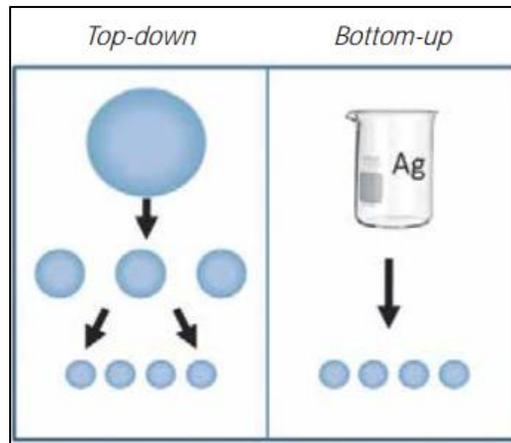


Figura 7: Esquema comparativo Top-Down y Bottom-Up (Fuente: [19]).

En cuanto a los métodos físicos, tienen la ventaja de ser capaces de producir grandes cantidades de nanopartículas, sin embargo, tienen la desventaja de no tener un suficiente control sobre el tamaño de la partícula, produciendo nanopartículas con un amplio rango de tamaño.

Para las necesidades de este proyecto, se utiliza un método físico (Top-Down) donde se trabaja inicialmente con un material macroscópico, que se convierte en nanopartículas durante el proceso.

En la actualidad hay diversas técnicas que utilizan procesos físicos, algunos de ellos son:

- High Energy Ball Milling
- Inert Gas Condensation
- Laser Pyrolysis
- Flame Spray Pyrolysis
- Electrospraying
- Melt Mixing
- Sputtering
- Electron Beam Evaporation
- Laser Ablation
- Pulse Laser Deposition
- Vacuum Arc
- Electric Arc Technique

Solo algunos de estos procesos cumplen la condición de ser aplicado en una producción masiva de nanopartículas. Entre ellos destacan:

- **High Energy Ball Milling (Molienda por bolas de alta energía):** Es un proceso considerado termo-mecánico, en el que un polvo de metal es reducido mediante deformación y posterior fractura de los granos de metal a una escala nanométrica.
- **Laser Ablation (Ablación por láser):** Es un método que usa un láser pulsado para llevar a cabo la transformación física sobre la superficie de un material base, su uso se condiciona a la duración del pulso requerido, la energía del pulso, la frecuencia y la longitud de onda del haz de luz.

- **Flame Spray Pyrolysis (Pirólisis por spray):** se produce la síntesis en la combustión de un precursor metalorgánico líquido, el que presenta átomos de carbono de los compuestos orgánicos que forman un enlace con un átomo metálico, compartiendo electrones para alcanzar el equilibrio electrónico.
- **Electric Arc Technique (Técnica de arco eléctrico):** es un método que utiliza un arco eléctrico entre dos electrodos para crear altas temperaturas y fundir metales de manera eficiente. Esta técnica es muy utilizada en la industria para soldar debido a su versatilidad y confiabilidad.

3.1.3 Descarga de arco eléctrico como sintetizador de nanopartículas

La descarga de arco eléctrico, como ya fue mencionada, es producida por la colisión de partículas subatómicas de cargas positivas y negativas provenientes de los electrodos al existir una diferencia de potencial capaz de ionizar la atmósfera que los contiene, generando un estado de plasma. La ionización del medio es provocada por los electrones provenientes del ánodo que no colisionan con las partículas positivas. Según el material de los electrodos y el medio donde se efectúe la interacción, permite una variedad de productos resultantes.

Para llevar a cabo esta síntesis basta con proporcionar la energía adecuada al sistema, fundiendo y evaporando partes del electrodo, de acuerdo con la velocidad de ingreso del alambre aportante.

En la Figura 8 se muestra un esquema de arco eléctrico en una atmósfera controlada de Helio.

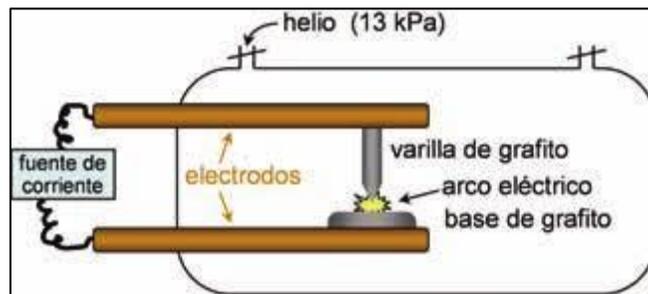


Figura 8: Esquema de arco eléctrico en atmósfera de helio (Fuente: [20]).

Existen diversas investigaciones que utilizan este método, siendo el principal objetivo sintetizar nuevas estructuras de carbono por descarga de arco eléctrico [21][22]. En las que se obtienen resultados exitosos.

3.2 Investigaciones y literatura relevante acerca de Precipitador Electrostático

En la actualidad, se tiene registro del uso de precipitadores electrostáticos en la industria, mayormente aplicados en forma de filtros electrostáticos, los que funcionan dado el mismo principio de ionización de partículas, filtrando material particulado fino, evitando contaminar el medio ambiente.

El resto de las aplicaciones se da en escala de laboratorios e investigación científica, registrando algunos casos de precipitadores electrostáticos a escala piloto para la filtración de humos [23].

Se utilizan no solo placas planas, sino que también otras disposiciones según el objetivo buscado y la disposición de materiales. En algunos casos se utilizan placas de acero y en otras de cobre, siempre buscando la no reacción del material particulado con las placas.

También hay registro de otros proyectos que han fabricado un prototipo de placas planas con resultados satisfactorios en la filtración del humo generado por la combustión de papel periódico [24]. En la Figura 9 se muestra la cámara de aire ensamblada.



Figura 9: Cámara de aire ensamblada en prototipo con placas planas (Fuente: [24]).

CAPÍTULO 4: Dimensionamiento y Desarrollo

Como se menciona anteriormente en la sección de metodología de trabajo, en la etapa inicial se compila la información necesaria para poder postular un diseño inicial, el que posteriormente se analiza según diversos factores y se comprueba que sea viable la fabricación de este.

4.1 Dimensionamiento del área de recolección de placas

Para calcular parte del dimensionamiento de un ESP, es necesario obtener la eficiencia de recolección, para la que es muy importante la razón entre el área de recolección y el caudal del gas que fluye por la cámara de recolección; lo que conjuntamente con la existencia de la limitación a utilizar el deflector diseñado anteriormente por el C4i de la Universidad de Concepción, mostrado en la Figura 10, se establece buscar el área máxima aceptada por esta geometría y posteriormente ajustar la magnitud del caudal de gas inyectado al sistema para obtener la máxima eficiencia posible. Los planos de esta pieza desde diferentes vistas se encuentran detallados en el Anexo A.

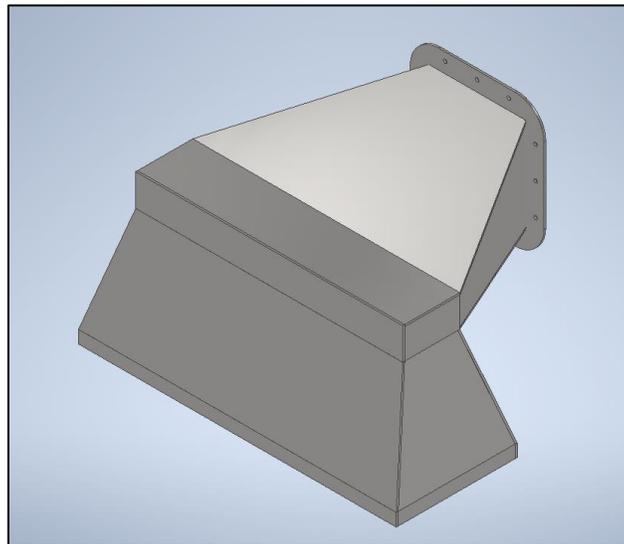


Figura 10: Vista isométrica del diseño del deflector para DARC-AC v3.

Es importante considerar este deflector en el diseño, ya que la empresa MSET realiza un completo “análisis fluidodinámico del funcionamiento de equipo para generación de polvo mediante dinámica de fluidos computacional (CFD)”, con un caudal de fluido de 1 [lt/min], lo que conllevó análisis de diversos diseños, donde al seleccionado por la empresa experta [25], se le realizó una mejora, que consiste en incluir un seccionamiento interno mediante deflectores de flujo. Esta mejora se muestra en la Figura 11 y Figura 12.

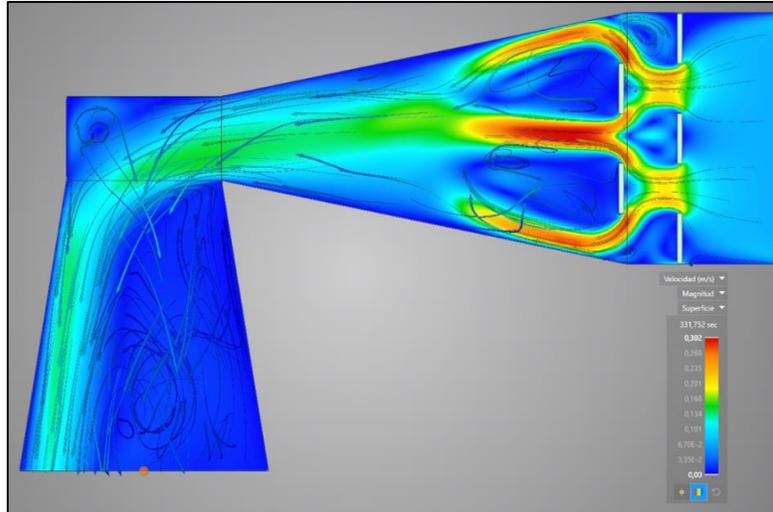


Figura 11: Perfil velocidad del fluido en deflector (Fuente: [25]).

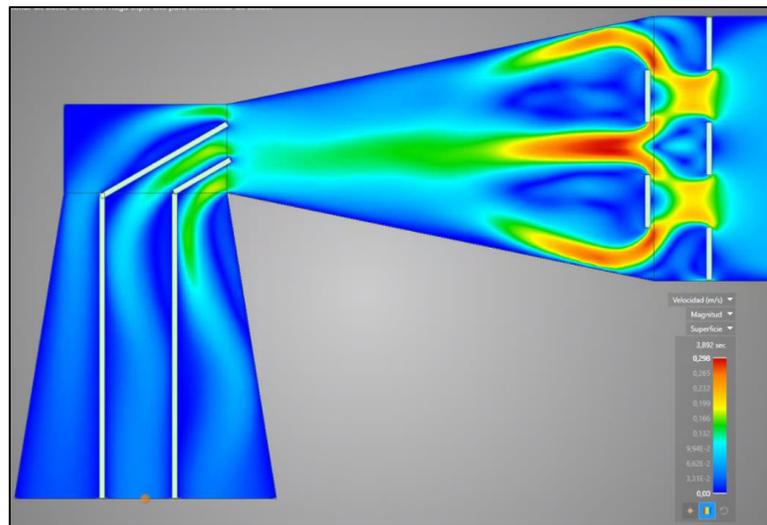


Figura 12: Perfil velocidad del fluido en deflector con seccionamientos internos (Fuente: [25]).

En ese estudio también se realizó una primera aproximación mediante software, sobre montar placas de forma vertical posterior a la bajada del deflector, verificando la distribución de velocidad del flujo en el plano vertical y demostrando gráficamente el flujo laminar hacia la cámara de recolección, tal como se evidencia en la Figura 13.

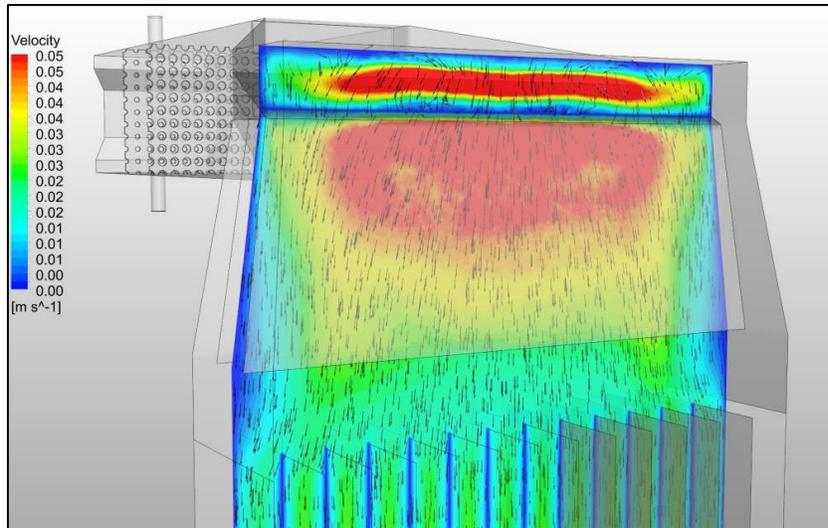


Figura 13: Distribución de velocidad en zona de precipitadores en plano vertical (Fuente: [25]).

Las dimensiones de este deflector definen las dimensiones máximas externas que puede adquirir la cámara de recolección, para buscar líneas de flujo con las menores turbulencias posibles, las que son de 500 x 190 [mm] en la sección transversal que se conecta hacia la cámara de recolección.

Con la limitante del ancho máximo, el que además debe incluir el espesor de cada cara lateral que depende del material seleccionado, se creó un diseño inicial del canasto porta placas, el que debe dar solución a una fácil conexión de las placas con la fuente de poder. Luego de evaluar, la forma de diseñar las placas y su posterior ensamblaje en el canasto porta placas, se decidió separar el diseño en 3 partes físicas distintas.

En la primera parte se buscó generar una estructura lo más ancha posible, que permitió deslizar las placas desde arriba hacia abajo, así como también modular la distancia entre placas, por lo que se inició boceteando un canasto el que se puede atravesar axialmente y apernar una barra de cobre en cada sección lateral de la parte inferior, barra que permite energizar las placas, mostrado en la Figura 14. Esta pieza además debe permitir el ensamble de las otras piezas que modulan la distancia ente sí de las placas.

En la segunda parte, se buscó diseñar las piezas que dan soporte a las placas con el canasto en la parte inferior de estas, el que además permite el aislamiento o conexión con la barra según se requiera la polaridad de la placa, de esta forma se obtuvo el concepto de regleta mostrado en la Figura 15.

En la tercera etapa, se diseñó una regleta que aporta soporte en la parte superior del canasto a las placas, lo que evita que se junten o separen unas de otras, esta regleta se muestra en la Figura 16.

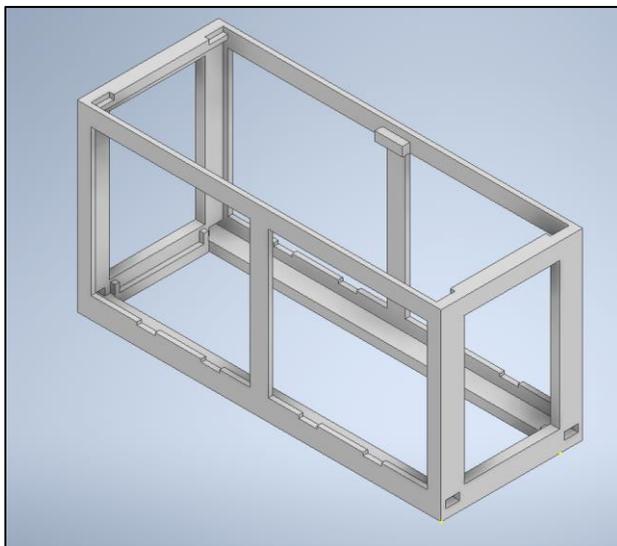


Figura 14: Vista isométrica del diseño inicial de canasto propuesto.

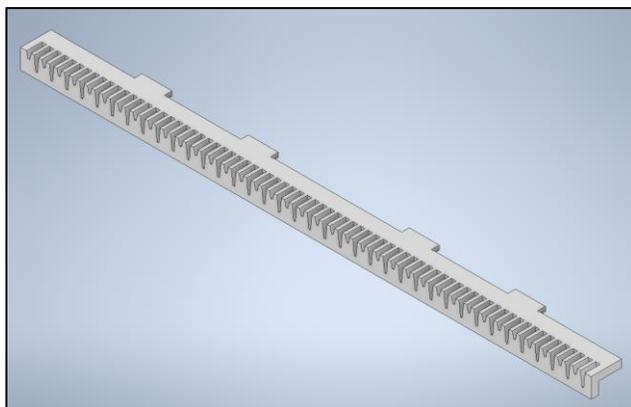


Figura 15: Idea conceptual de regleta inferior.

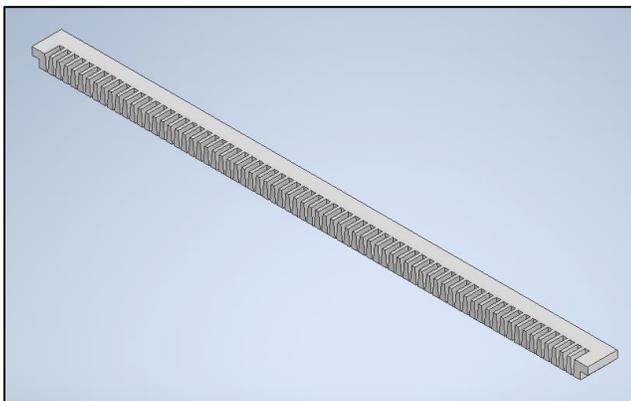


Figura 16: Idea conceptual de regleta superior.

Se diseñó una pieza que cumpla la función de conector entre la parte superior de la cámara de recolección y la parte inferior del deflector de acero, así como en el fondo. Además, se buscó la forma de pestaña con la finalidad de realizar un acople perfecto entre las piezas involucradas, el que sobresale por el lado interno y externo de cada cara de la cámara de recolección, lo que permitió encajar las piezas logrando un mejor sellado, como se muestra en la Figura 17.

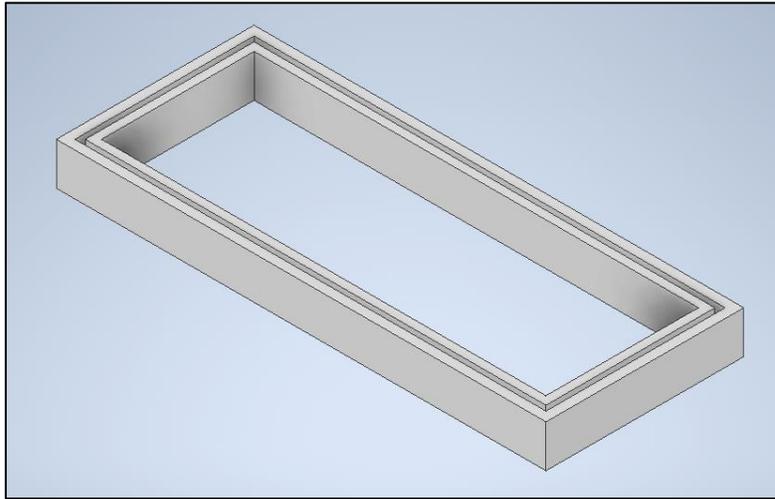


Figura 17: Vista isométrica del conector de la cámara de recolección con el deflector.

Luego se realizó el diseño del fondo, donde se sitúa la cámara de recolección, mostrado en la Figura 18, el que se fabrica en PLA mediante impresión 3D por su facilidad y menor costo. Es importante señalar, que debe lograr un sellado hermético correcto, así como aportar en la rigidez del ensamble de las caras laterales de acrílico.

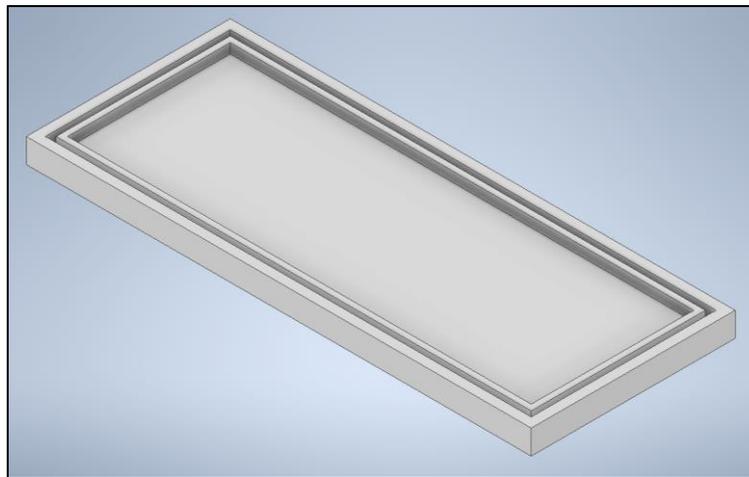


Figura 18: Vista isométrica del fondo de la cámara de recolección.

Con la estructura externa ya definida y sus partes ensambladas, mostrada en la Figura 19 y sus planos detallados en el Anexo B, se procedió a definir las medidas de cada una de las piezas internas, donde se consideró la dimensión mínima entre los seguros que cierran las puertas frontales, así como la altura máxima de las placas y del canasto, el que debe evitar el pandeo de las placas. También se debió cambiar la disposición de la barra de cobre que conectaría a las placas, ya que inicialmente se encontraba dispuesta de forma horizontal, pero se definió utilizarla de forma vertical, para restringir menos el flujo de gas hacia la etapa inferior del precipitador electrostático. Además, se incluyó en el diseño unas barras que sirvan de guía para deslizar y sostener cada canasto con placas dentro de la cámara de recolección.

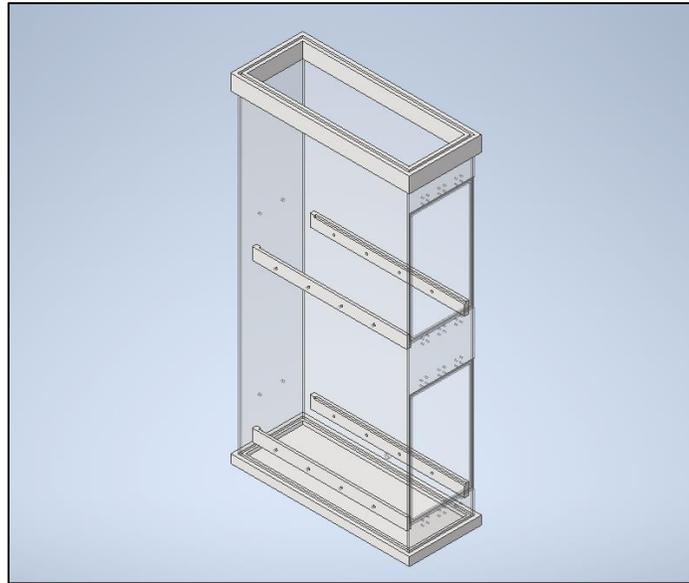


Figura 19: Vista isométrica del ensamblaje de estructura externa de la cámara de recolección.

Así se definió una altura del canasto de 240 [mm], ancho 165.8 [mm] y un largo de 400 [mm] para permitir dejar espacio para una pieza con conector eléctrico, que permita pasar corriente hacia el interior de la caja, así como disponer de una manilla en el carro para evitar perder material nanoparticulado ya sintetizado al extraerlo de la cámara de recolección.

Con este diseño de canasto se permite realizar el diseño de las placas de acero inoxidable en una sola geometría, mostrada en la Figura 20, de esta forma se evitó tener un diseño para polaridad positiva y otro para la polaridad negativa. Con dimensiones de altura de 260 [mm], ancho de 144.5 [mm] y espesor 0.8 [mm], cabe destacar que se tuvo que realizar un corte en una de sus esquinas, siendo de 11 [mm] horizontal y de 8 [mm] vertical, mostrado en la Figura 21. Se obtiene un área de recolección por placa de 0.037526 [m²]. Este corte es lo que permite aislar un lado de la placa de la barra de cobre y generar distintas polaridades.

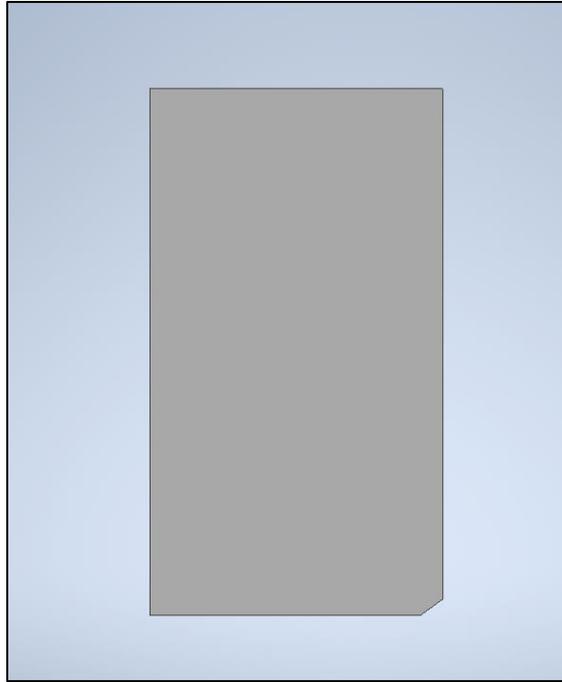


Figura 20: Vista frontal de placa de acero inoxidable.

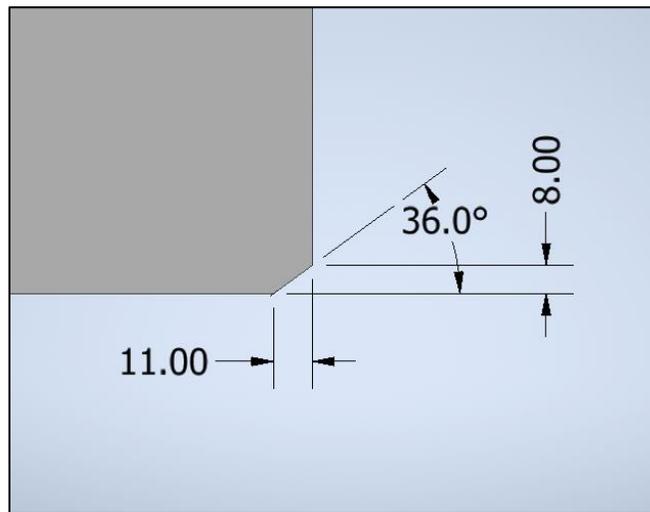


Figura 21: Detalle de corte en placa de acero inoxidable.

Con las dimensiones externas ya definidas, se continuó en el diseño final del canasto, el que fue incluido en las tres partes físicas mencionadas en párrafos anteriores y en la parte posterior un accesorio que permite posicionar los enchufes que otorgan energía a las barras de cobre, así como fijar axialmente la barra, por esto se nombró fijación axial a esta pieza. En la parte delantera se añadió una manilla para facilitar el ensamble del conjunto del canasto dentro de la cámara de recolección.

Al ensamblar estas partes se obtuvo un diseño de set de placas como el expuesto en Figura 22, donde las placas de acero inoxidable son de color más oscuro y el resto del ensamble es PLA. En el Anexo C, se observan vistas desde otros ángulos para comprender mejor el ensamble completo del set.

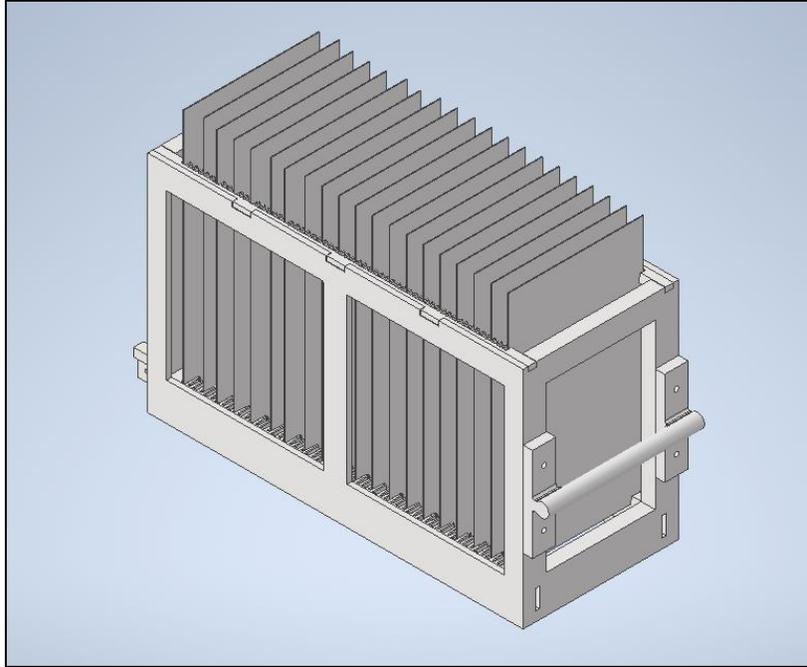


Figura 22: Ensamble de set de placas.

El ensamble de todas las piezas de la cámara de recolección se muestra en la Figura 23. A este ensamble es necesario añadir los pernos en cada agujero establecido, los que tienen un diámetro de 6 [mm] los que sujetan la guía para los canastos, 5 [mm] los que apertan la manilla y la fijación axial, y 4 [mm] los que apertan los seguros para las puertas.

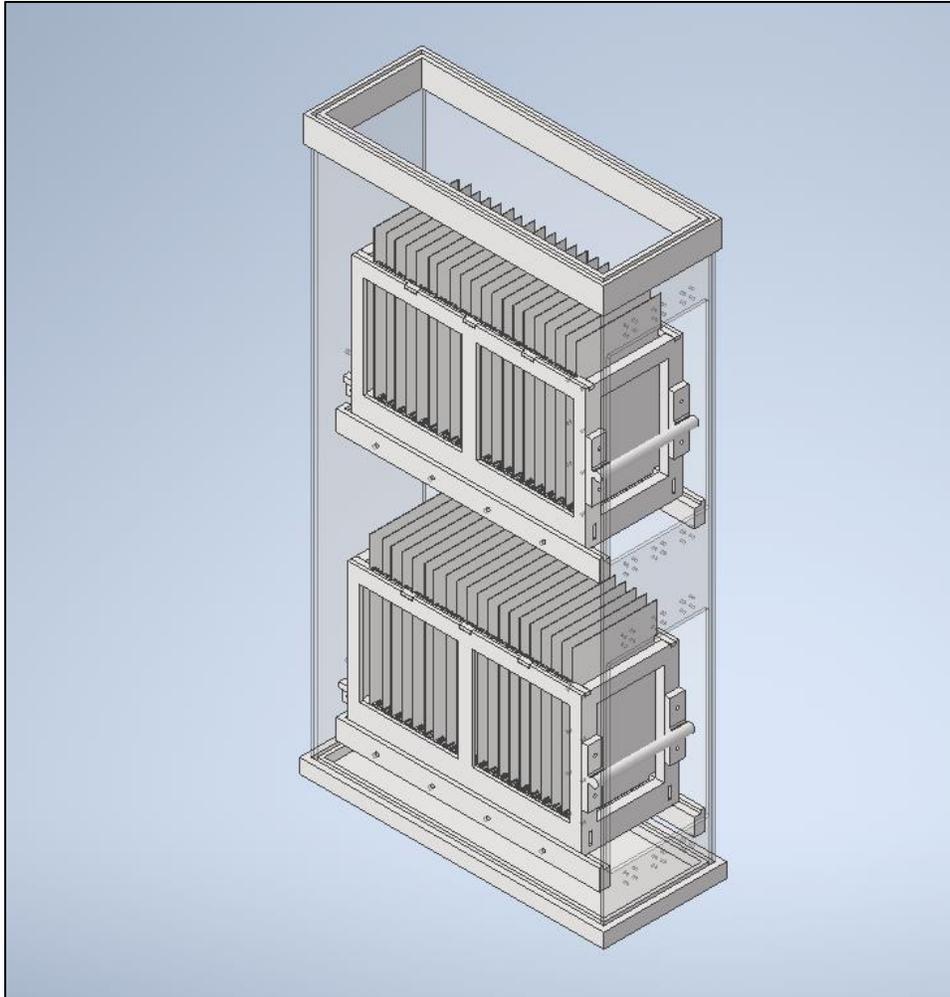


Figura 23: Vista isométrica del ensamblaje de estructura con los canastos.

Mediante el mismo software de modelación 3D “Inventor Autodesk”, se realizó un análisis de elementos finitos a las caras laterales de acrílico antes de establecer el diseño final, donde se aplicó la fuerza que ejerce cada etapa con el máximo de placas (60 placas por set) montadas a 6 [mm] de distancia entre ellas, los que consideran un factor de seguridad de 2, generando cargas en cada orificio de 49 [N], en la Figura 24 se ve que se experimenta un esfuerzo de Von Mises de 6.58 [MPa] en los agujeros donde se apernaron las guías y soportaron el peso aplicado por la masa de cada set de placas. Valor que es menor a la resistencia del acrílico comercial a la compresión [26][27], que oscila entre 100 y 115 [MPa].

Para este análisis se realizó un mallado de la pieza, refinándolo en las secciones concentradoras de esfuerzo, resultando en 94 915 nodos y 57 288 elementos. Además, al elemento se le aplicó la restricción de fijar sus caras superior e inferior, mostrado en la misma figura, lo que es el caso más desfavorable comparado al fijar también ambas caras laterales del elemento estudiado.

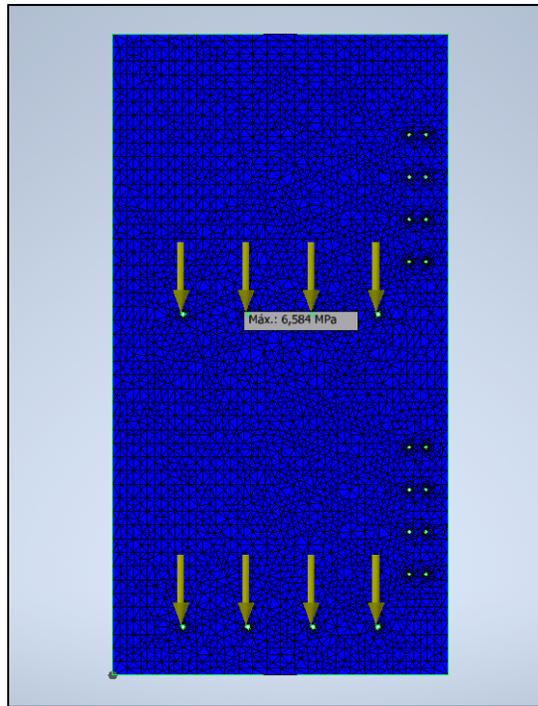


Figura 24: Ensayo de elementos finitos de carga en caras laterales de acrílico.

En paralelo mediante el mismo software, se realizó una simulación de elementos finitos a la estructura de la cámara de recolección donde el objeto de estudio fue definir la presión interna máxima generada por el fluido, que puede contener la estructura sin presentar deformaciones o riesgo de fisuras. El acrílico tiene una resistencia máxima a la tracción de 79.8 [MPa]. En la Figura 25 se muestra cómo se aplicaron las cargas de presión en las paredes de acrílico, así como la restricción de fijar la base y el conector al deflector. Se aplicó desde valores muy mínimos de presión hasta obtener que con una presión interna en las caras de 0.16 Bar, se presenta un valor máximo del esfuerzo de Von Mises de 76.9 [MPa], mostrado en la Figura 26, por lo que esta presión será la máxima permitida en la operación. De todos modos, es importante recordar que una de las dos caras laterales presenta un orificio donde se conectará una manguera de media pulgada hacia un filtro de agua, por lo que el fluido desde el deflector ubicado más arriba continuará su curso hacia el exterior a través del filtro, por tanto, el fluido nunca permanecerá acumulándose dentro de la estructura de acrílico, sin presentar un riesgo de sobrepresión.

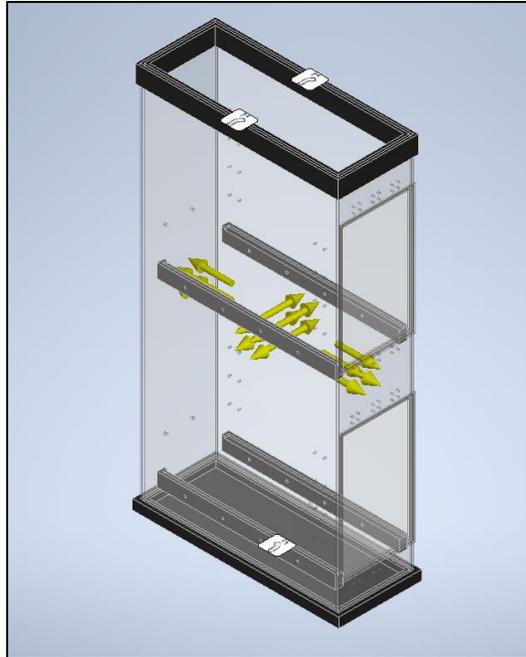


Figura 25: Condiciones para análisis de presión interna en caras laterales de acrílico mediante elementos finitos.

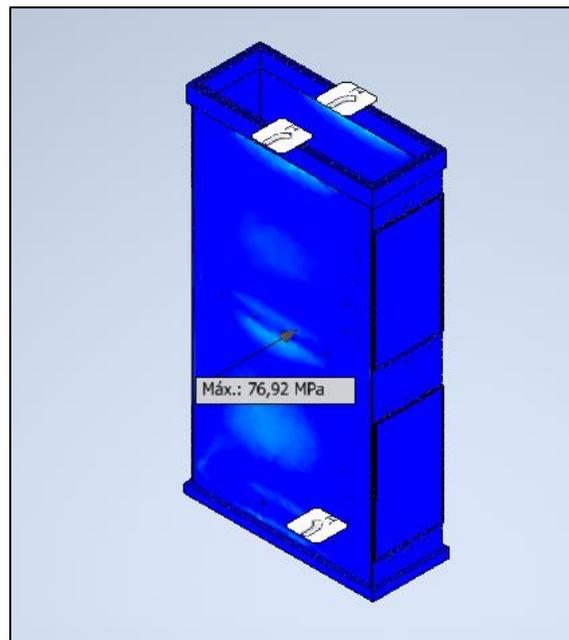


Figura 26: Resultado de simulación de elementos finitos de presión interna.

4.2 Dimensionamiento de Flujo de Gas en Cámara de Recolección

4.2.1 Aspectos generales de dimensionamiento para el flujo de gas

Como se dijo anteriormente, de la literatura [28] se sabe que el dimensionamiento del ESP es en función de la relación “A/Q”, que es la relación del área de recolección, y el caudal de gas que pasa por el sistema.

Antes de realizar cualquier cálculo respecto al caudal de gas, se puede introducir el término de “velocidad de migración de partícula”, el que corresponde a la velocidad a la que una partícula una vez cargada, migra hacia el electrodo colector puesto a tierra. Las variables que afectan la velocidad de la partícula son el tamaño de partícula, la intensidad del campo eléctrico y la viscosidad del gas. Esta velocidad esta denotada por la letra w . Este valor es importante ya que representa la capacidad de recolección de partícula dentro de los límites de un ESP específico. La velocidad de migración está determinada por la ecuación (1):

$$w = \frac{d_p E_o E_p}{4\pi\mu} \quad (1)$$

Donde: d_p = diámetro de partícula, [μm]
 E_o = Intensidad del campo en que se cargan las partículas, [V/m]
 E_p = Intensidad del campo en que se colectan las partículas, [V/m]
 μ = Viscosidad del gas, [Pa · s]

Como se demostró en la ecuación (1), la velocidad de migración depende de la intensidad de los campos, tanto en la carga como en la recolección. Entonces, el precipitador debe ser diseñado usando el voltaje máximo del campo eléctrico para una máxima eficiencia de recolección. También se deduce que, a mayor tamaño de partículas, son más fácil de recolectar que las más pequeñas.

La velocidad de migración también puede ser determinada por la siguiente ecuación (2).

$$w = \frac{qE_p}{6\pi\mu r} \quad (2)$$

Donde: q	=	Carga de la partícula, [C]
E_p	=	Intensidad del campo en que se colectan las partículas, [V/m]
μ	=	Viscosidad del gas, [Pa · s]
r	=	Radio de la partícula, [μm]

Volviendo a la idea desarrollada previamente, para el dimensionamiento del ESP es necesario tener como objetivo un valor de eficiencia de recolección para el proceso. En este caso se calcula con una eficiencia esperable de 90%. Esta eficiencia está formulada por Deutsch-Anderson [29][30], dada por la ecuación (3):

$$\eta = 1 - e^{-w(A/Q)} \quad (3)$$

Donde: η	=	Eficiencia de recolección del precipitador, [-]
e	=	Base de logaritmo natural = 2.718, [-]
w	=	Velocidad de migración, [cm/s]
A	=	Área efectiva de recolección del precipitador, [m^2]
Q	=	Caudal de gas a través del precipitador, [m^3/s]

Esta ecuación ha sido usada por años para calcular la eficiencia teórica. Desafortunadamente, aunque es científicamente válida para la teoría, una serie de parámetros de funcionamiento pueden afectar los resultados, implicando errores por un factor de 2 o más.

Se pueden obtener estimaciones más precisas de la eficacia de recolección modificando la ecuación de Deutsch-Anderson. Esto se consigue sustituyendo la velocidad de migración w , por el índice de precipitación efectiva w_e , o bien disminuyendo el valor del cálculo de la eficacia de recolección en un factor k , que es constante, proveniente de la ecuación de Matts-Ohnfeldt.

Así, modificando [31] la ecuación de Deutsch-Anderson, e implementando w_e en la ecuación (3), resulta la siguiente ecuación (4):

$$\eta = 1 - e^{-w_e(A/Q)} \quad (4)$$

Donde: η	=	Eficiencia de recolección del precipitador, [-]
e	=	Base de logaritmo natural = 2.718, [-]
w_e	=	Velocidad de migración efectiva, calculada experimentalmente [m/s]
A	=	Área efectiva de recolección del precipitador, [m ²]
Q	=	Caudal de gas a través del precipitador, [m ³ /s]

La velocidad de migración w hace referencia a la velocidad en la que una partícula individual cargada migra al electrodo colector, mientras que la velocidad de migración efectiva w_e se refiere a la velocidad promedio empírica a la que todas las partículas de la masa de polvo se mueven al electrodo colector, la que es determinada en base a valores de otros ESP instalados en la industria o plantas pilotos de estudio.

Otra modificación a la ecuación de Deutsch-Anderson que toma en cuenta los efectos no ideales del proceso, es la constante aplicada por Sigvard Matts y Per-Olaf Ohnfeldt, formulado en la ecuación (5).

$$\eta = 1 - e^{-w_k(A/Q)^k} \quad (5)$$

Donde: η	=	Eficiencia de recolección del precipitador, [-]
e	=	Base de logaritmo natural = 2.718, [-]
w_k	=	Velocidad de migración promedio, [cm/s]
k	=	Una constante, varía de 0.4 a 0.6
A	=	Área efectiva de recolección del precipitador, [m ²]
Q	=	Caudal de gas a través del precipitador, [m ³ /s]

El termino w_k , siendo la velocidad de migración promedio en (5), es determinada por la información obtenida desde otras instalaciones similares. El valor de k , varía entre 0.4 y 0.6, dependiendo de la desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula y de otras propiedades que afectan la eficiencia de recolección. Generalmente se usa un valor de 0.5, obteniendo valores satisfactorios [32].

Considerando un área total de recolección $A = 0.075$ [m²] y un $k = 0,5$ por lo descrito en el párrafo anterior. Con base en la literatura se sabe que una relación A/Q igual a 1, es la que concede un rendimiento de 90 %, tomando esto como punto inicial para los cálculos desarrollados tenemos que $Q = 0.075$ [m³/s], lo que en una unidad de medida más común corresponde a 1.25 [lt/min].

Con los conceptos ya explicados ahora se puede modificar la ecuación (2) donde se obtiene w , para obtener w_k , para esto es necesario aplicar el Factor de Cunningham “C”, resultando (6).

$$w_k = \frac{qEC_u}{6\pi\mu r} \quad (6)$$

Donde: q = Carga total de la partícula, [C]
 E = Intensidad del campo en que se colectan las partículas, [V/m]
 C_u = Factor de Cunningham [-]
 μ = Viscosidad del gas, [kg/ms]
 r = Radio de la partícula, [μ m]

El factor de Cunningham, utilizado en la dinámica de fluidos, surge para corregir la solución de la ecuación de esfuerzo de roce obtenida mediante la ley de Stokes cuando las partículas en el gas son del orden del espacio libre entre partículas de gas o menores, creando discontinuidades en este, donde se obtiene (7):

$$F_D = \frac{6\pi\mu r v}{C_u} \quad (7)$$

Donde: v = Velocidad de la partícula relativa al fluido, [m/s]

El resto de los componentes de la ecuación (7) hacen referencia a los mismos que en la ecuación (6).

El factor de Cunningham a su vez es obtenido en función del número de Knudsen, que es un factor adimensional referente a la longitud de camino libre medio (“mean free path” en inglés) entre dos partículas de gas con una longitud característica del flujo, como un diámetro de un tubo, largo de una placa, diámetro de partícula, etc. El número de Knudsen “Kn” se define en (8).

$$K_n = \frac{\lambda}{r} \quad (8)$$

Con: λ = Longitud de camino libre molecular [m]

De la literatura se obtienen diferentes valores de longitud de camino libre para dimensionar con respecto al argón (Ar) y oxígeno (O₂), calculados a 0 [°C] pueden ser corregidos con la temperatura asumida para la salida de la cámara de reacción de 35 [°C], así se obtiene Tabla 1.

Tabla 1: Longitud de camino libre molecular para los diferentes gases de trabajo.

Gas de trabajo	Longitud de camino libre medio [m]
Argón (Ar)	$7.13e^{-8}$
Oxígeno (O ₂)	$7.24e^{-8}$

Definidos los Kn para ambos gases de trabajo, el factor de Cunningham queda definido por (9).

$$C_u = 1 + K_n \cdot \left(\alpha + \beta \cdot e^{\left(\frac{-\gamma}{K_n}\right)} \right) \quad (9)$$

Donde: α = Constante de valor 1.231 [-]

β = Constante de valor 0.469 [-]

γ = Constante de valor 1.178 [-]

Así se obtienen los siguientes valores del factor de Cunningham para los gases de trabajo, tabulado en Tabla 2.

Tabla 2: Factor de Cunningham para los gases de trabajo.

Gas de trabajo	Factor de Cunningham [-]
Argón (Ar)	5.39
Oxígeno (O ₂)	5.47

4.2.2 Carga de la partícula

La carga de la partícula queda determinada por (10)

$$q_a = \frac{4\pi \cdot \epsilon_0 \cdot r \cdot k \cdot T}{e} \quad [C] \quad (10)$$

Donde: ϵ_0 = Permisividad del vacío ($8.85 \cdot 10^{-12}$ [F/m])

r = Radio de partícula [m]

k = Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ [J/K])

T = Temperatura (308 [K])

e = Carga de un electrón ($1.6 \cdot 10^{-19}$ [C])

Obteniendo $q_a = 1.47 * 10^{-19}$ [C].

Aun con la posibilidad de considerar más factores para la carga de partícula, se toma este valor para los siguientes cálculos, ya que es el caso más desfavorable que se puede presentar en el proceso.

La distancia entre electrodos seleccionada para los cálculos y pruebas de funcionamiento está fijada arbitrariamente en 0.018 [m], con el objetivo de poder aprovechar en futuros proyectos el análisis a mayor o menor distancia. El voltaje seteado en las fuentes de voltaje es de 7000 [V] para aplicar en la zona de recolección. Así el campo eléctrico de recolección E está dado por (11):

$$E = \frac{V}{d} = 388\ 888.889 \left[\frac{V}{m} \right] \quad (11)$$

Con: d = Distancia entre placas.

La viscosidad de los gases en condiciones de trabajo se tabulo en Tabla 3:

Tabla 3: Viscosidad de los gases en condiciones de trabajo.

Gas de trabajo	Viscosidad de los gases [kg/ms]
Argón (Ar)	$2.4e^{-5}$
Oxígeno (O ₂)	$2.17e^{-5}$

Volviendo a la ecuación (6) para despejar w_t , obtenemos Tabla 4.

Tabla 4: Velocidad de migración de los gases de trabajo.

Gas de trabajo	Velocidad de migración [m/s]
Argón (Ar)	0.013
Oxígeno (O ₂)	0.015

Del caudal de gas de 0.075 [m³/s] (1.25 [lt/min]), se obtiene un área transversal dentro de la cámara de recolección igual a 0.089 [m²] y por ende una velocidad del gas de 0.85 [m/s].

Analizando, que la distancia entre las placas del precipitador se encuentran a 0.018 [m], se predice que las nanopartículas en suspensión están a una distancia máxima de 0.009 [m] de una placa, considerando la velocidad de migración del argón (la que es más desfavorable al indicar una magnitud menor) tenemos que la nanopartícula que circula justo por una distancia equidistante de las placas necesita 0,69 [s] para estar en contacto con una de estas, pero por la velocidad que lleva el flujo en ese intervalo de tiempo podría llegar a recorrer una distancia de 0.58 [m], la que es mayor a los 0.52 [m] de longitud vertical que suman los dos sets juntos.

Una solución a este problema fue disminuir el caudal de entrada de gas a 1 [lt/min] o equivalente a 0.06 [m³/s], generando una velocidad del flujo que atraviesa la cámara de recolección de 0.68 [m/s], logrando que teóricamente la nanopartícula equidistante solo recorra verticalmente 0.47 [m], lo que es menor a la distancia vertical que suman las placas, asegurando la recolección de las nanopartículas.

Con este valor de caudal y razón de 1,25 en A/Q, se espera un rendimiento de 91,55% según la literatura.

CAPÍTULO 5: Puesta en Marcha y Obtención de Nanopartículas

Como instancia previa a la puesta en marcha, se realizó un prototipo para comprobar la fabricación y funcionamiento de lo diseñado, donde la parte fundamental es comprobar el magnetismo del precipitador electrostático. Este prototipo se fabricó solo considerando utilizar una etapa del precipitador, acotando los tiempos de fabricación y recurso económico.

La estructura realizada se compuso de una estructura externa por los laterales y fondo de acrílico, mientras que el conector entre la cámara de recolección y el deflector se fabricó en PLA mediante impresión 3D. Mostrado en la Figura 27 y Figura 28 respectivamente.



Figura 27: Prototipo de prueba ensamblado y montado.



Figura 28: Prototipo de prueba ensamblado y montado visto desde otra perspectiva.

El funcionamiento fue exitoso luego de diversas variaciones en los parámetros de la reacción, observando en primera instancia la correcta adhesión de las nanopartículas en el set de placas. En la Figura 29, se muestra el set de placas posterior al funcionamiento alimentado por zinc y oxígeno.



Figura 29: Set de placas con nanopartículas de zinc adheridas a las placas.

La combinación de la que se obtuvo mayor cantidad de nanopartículas fue la de alambre de zinc en conjunto al oxígeno, mostrado en la Figura 28 y Figura 29.



Figura 30: Vista superior del frasco de muestra con nanopartículas de zinc con oxígeno.



Figura 31: Vista lateral del frasco de muestra con nanopartículas de zinc con oxígeno.

Concluida la etapa de pruebas con el prototipo, con resultados satisfactorios en cuanto a: la viabilidad de fabricación del modelo diseñado en software computacional, en la selección los primeros parámetros para una reacción constante, así como posteriormente una correcta adhesión del material a las placas, la correcta hermeticidad de la estructura externa de la cámara de recolección, el fácil desmontaje del set de placas desde el interior de la cámara de recolección y el posterior desmontaje de las placas respecto a los sets en sí. Además, de no presentar inconvenientes en lo que respecta a la conexión eléctrica que energiza las placas del precipitador, donde la continuidad desde las conexiones exteriores a las placas montadas al interior de la cámara de recolección, se comprobaron mediante un multitester.

Se dio paso a la fabricación del diseño final. Para las caras laterales de la estructura se seleccionó acrílico transparente de 0,5 [mm], mientras que para el resto de estructura se utilizó PLA mediante la impresión 3D, también se utilizaron algunos broches de apriete rápido (abajo y arriba de cada puerta) y de tracción en las puertas para así asegurar hermeticidad (en los laterales), mostrados en la Figura 32.



Figura 32: Cámara de recolección fabricada.

Luego se procedió a ensamblar la cámara de recolección en conjunto al resto de la máquina DARC-AC, fotografía en Figura 33. Después, se realizó una prueba de hermeticidad de la cámara utilizando zinc en conjunto a argón, mostrado en Figura 34, donde se aprecia la nube de material generado en la cámara de reacción e impulsado a la cámara de recolección de manera correcta, así como inexistentes fugas en las puertas que permiten ingresar los sets de placas dentro de esta.



Figura 33: Cámara de recolección en conjunto al resto de la máquina.



Figura 34: Prueba de hermeticidad de la cámara de recolección.

Se realizaron diversas pruebas de reacción de la DARC-AC, variando el amperaje de la máquina soldadora y la velocidad de avance del material de aporte que se introduce a la cámara de reacción, resultando así los valores óptimos mostrados en la Tabla 5. Estos valores obtenidos se realizaron ejecutando pruebas con ambos gases.

Tabla 5: Parámetros funcionamiento DARC-AC.

Material de Aporte	Amperaje	Velocidad de Avance
Cobre	160 [A]	20 [mm/s]
Zinc	25 [A]	29 [mm/s]
Aluminio	200 [A]	25 [mm/s]

Con los parámetros seleccionados se realizaron las pruebas finales para el estudio, logrando reacciones estables del arco eléctrico en la cámara de reacción y visualmente, una correcta adhesión de material a las placas.

El primer material para reaccionar fue el alambre de cobre con gas argón, mostrando en la Figura 35 la nube de nanopartículas de cobre que llega a la cámara de recolección. Se puede visualizar la correcta adhesión a los sets de placas en la Figura 36, y en la Figura 37 se extrajeron las nanopartículas de una sola mitad para que sea más notoria la adhesión en comparación a la placa de acero inoxidable. Más fotografías de la recolección de cobre con argón se muestran en el Anexo D.

**Figura 35: Cámara de recolección con nanopartículas de cobre en suspensión.**



Figura 36: Set de placas con nanopartículas de cobre.



Figura 37: Placa con nanopartículas de cobre.

De la misma forma se realizaron las pruebas para los materiales de aporte zinc con el gas argón. Mostrando en la Figura 37 la cámara de recolección con la nube de material, en la Figura 39 un set de placas con el material adherido y en la Figura 40 una placa con el material. De forma análoga para el material aluminio en las Figura 41, Figura 42 y Figura 43. En el Anexo E y Anexo F se muestran más fotografías de la recolección de los materiales descritos.



Figura 38: Cámara de recolección con nanopartículas de zinc en suspensión.



Figura 39: Set de placas con nanopartículas de zinc.



Figura 40: Placa con nanopartículas de zinc.



Figura 41: Cámara de recolección con nanopartículas de aluminio en suspensión.



Figura 42: Set de placas con nanopartículas de aluminio.



Figura 43: Placa con nanopartículas de aluminio.

Se pueden ver las muestras recolectadas de las pruebas en la Figura 44, de izquierda a derecha nanopartículas de: cobre, zinc y aluminio.



Figura 44: Muestras recolectadas de materiales reaccionados con argón.

Luego se pasó a reemplazar el tanque de gas de argón por uno de oxígeno, realizando pruebas a los tres materiales y obteniendo las muestras de los óxidos de estos. Las muestras se pueden ver en la Figura 45, conservando el orden de izquierda a derecha de óxido de cobre, óxido de zinc y óxido de aluminio.

Respecto al funcionamiento de la máquina DARC-AC, cuando se inyecta gas oxígeno se dificulta el ámbito de la reacción, debido a que este al no ser un gas inerte el electrodo de tungsteno que permite realizar la reacción de arco con el material de aporte se combustiona en el proceso, se gasta demasiado rápido y evita que se realice el arco eléctrico de la soldadora en la cámara de reacción. Esto genera que el motor que impulsa el alambre de aporte siga introduciendo material a la cámara hasta un punto en que choca físicamente con la pared interna, por lo que para evitar esta interrupción de reacción es necesario apagar la máquina unos segundos, para así acercarse manualmente con un destornillador el electrodo hacia dentro y que continúe la reacción.

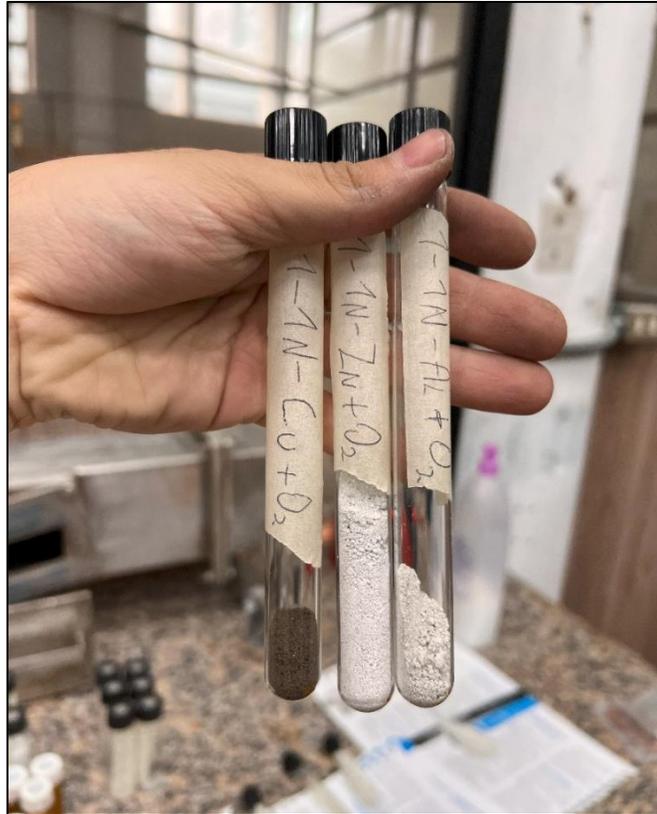


Figura 45: Muestras recolectadas de materiales reaccionados con oxígeno.

Las muestras de nanopartículas obtenidas son estudiadas con la ayuda de un microscopio de transmisión (TEM). En las Figura 46 a Figura 49 se pueden ver algunas de estas muestras.

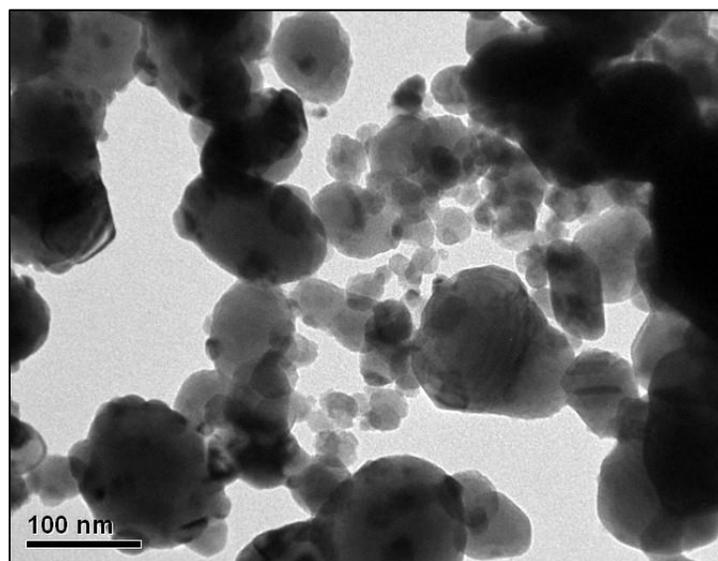


Figura 46: Muestras analizadas en TEM de Cobre con Argón.

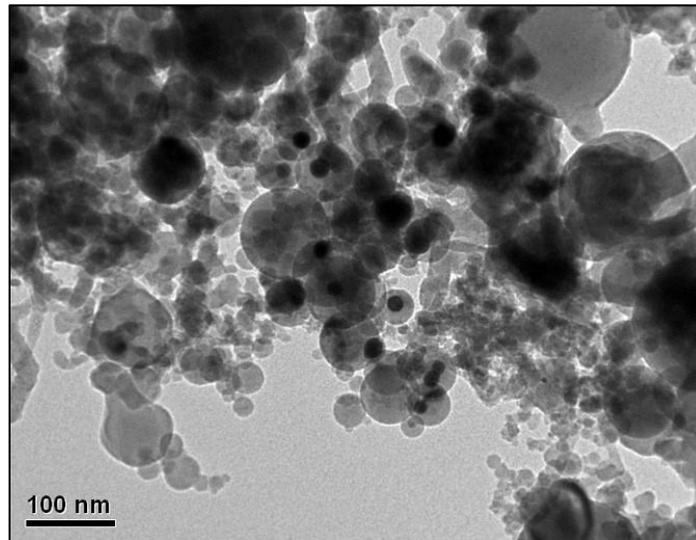


Figura 47: Muestras analizadas en TEM de Aluminio con Argón.

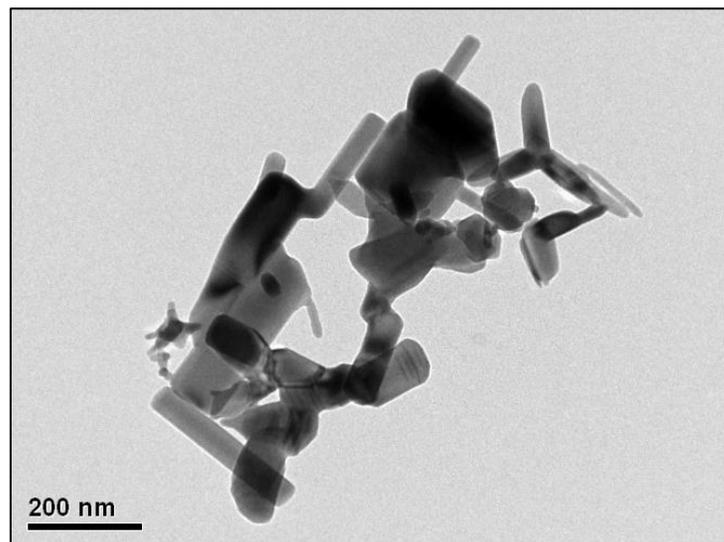


Figura 48: Muestras analizadas en TEM de Zinc con Argón.

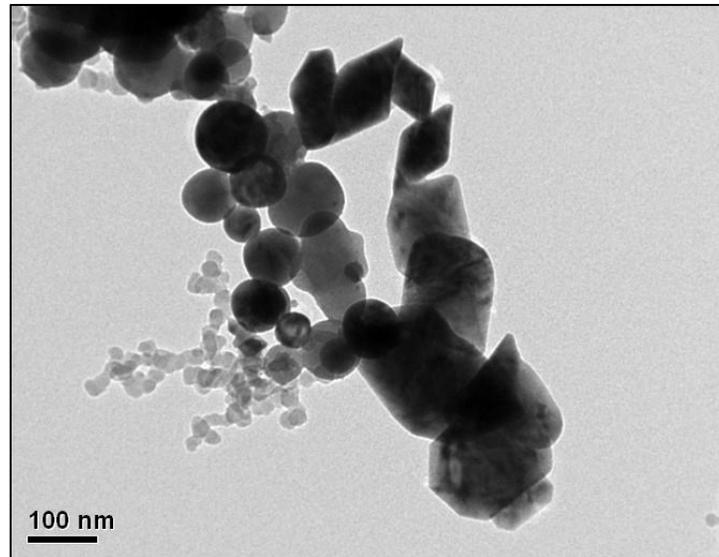


Figura 49: Muestras analizadas en TEM de Aluminio con Oxígeno.

Se logra apreciar los diversos tamaños y formas de las nanopartículas de acuerdo con la muestra analizada.

Algunos valores importantes del análisis están tabulados en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros importantes del análisis de muestras.

Material de Aporte	Gas inyectado	Nanopartículas contadas	Tamaño promedio [nm]	Tamaño máximo [nm]	Tamaño mínimo [nm]
Cobre	Argón	483	46.61	242.42	8.23
Cobre	Oxígeno	208	68.24	310.11	9.88
Zinc	Argón	69	80.41	185.05	11.63
Zinc	Oxígeno	856	73.98	444.44	11.53
Aluminio	Argón	981	37.84	227.27	1.15
Aluminio	Oxígeno	515	80.56	541.67	19.69

Se graficaron los resultados de las muestras por cada material con cada gas, mostrados en las Figura 50 a Figura 55, considerando en el Eje X el intervalo de tamaño de nanopartículas y en el Eje Y se consideró la frecuencia absoluta de nanopartículas en ese rango.

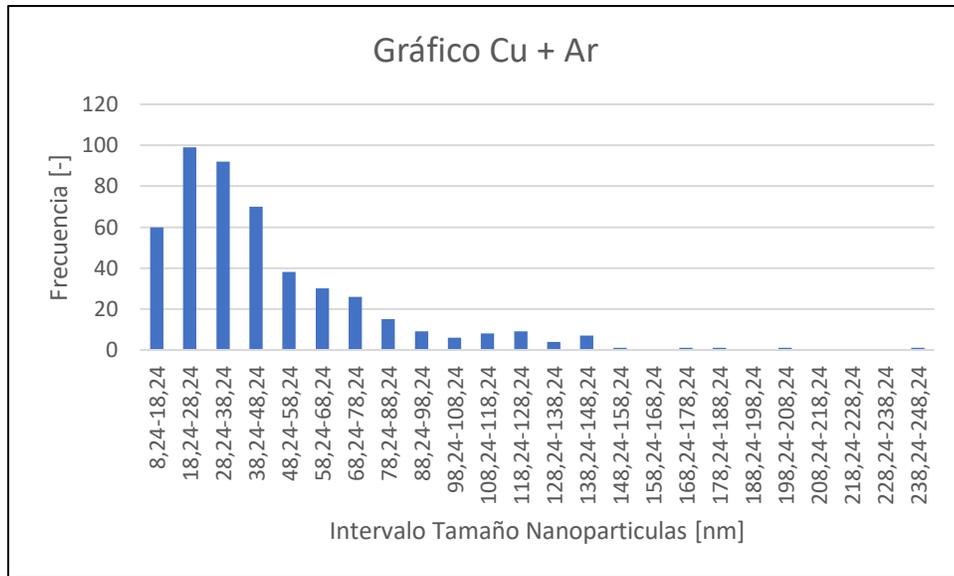


Figura 50: Gráfico de línea nanopartículas de cobre con argón.

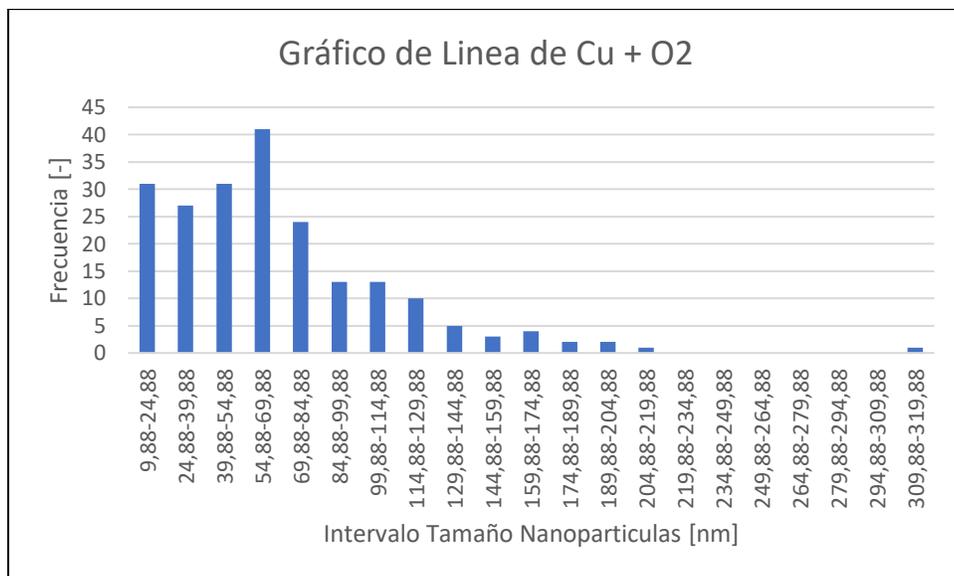


Figura 51: Gráfico de línea nanopartículas de cobre con oxígeno.

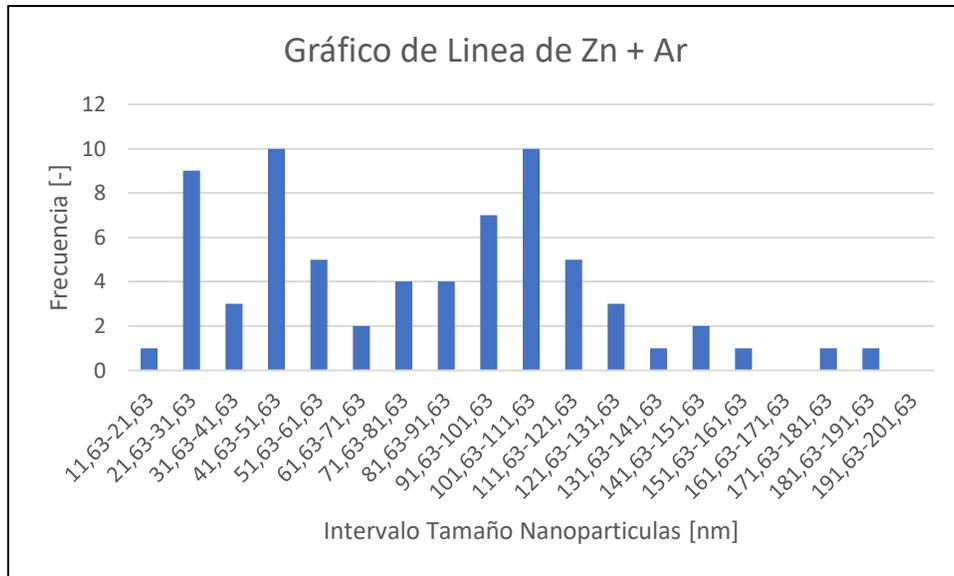


Figura 52: Gráfico de línea nanopartículas de zinc con argón.

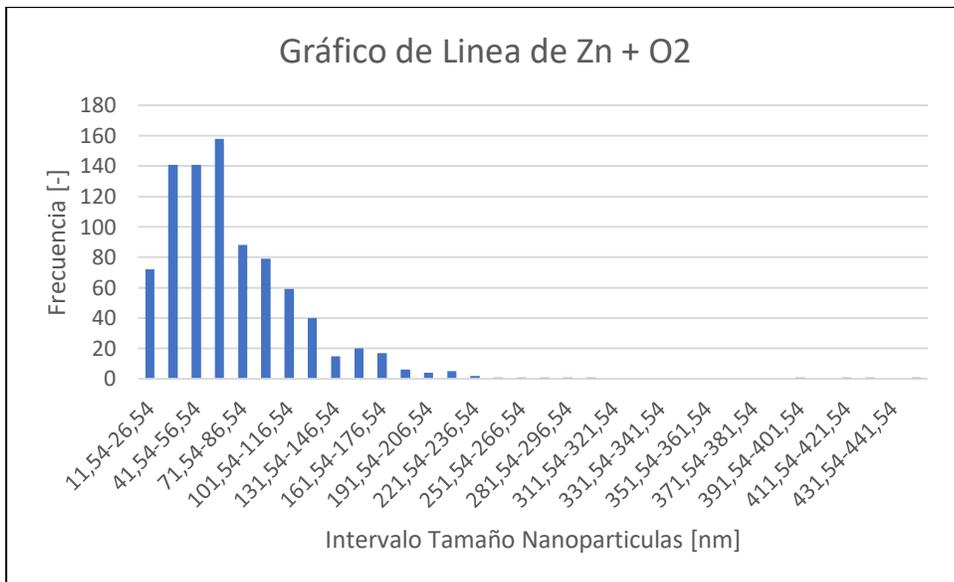


Figura 53 Gráfico de línea nanopartículas de zinc con oxígeno.

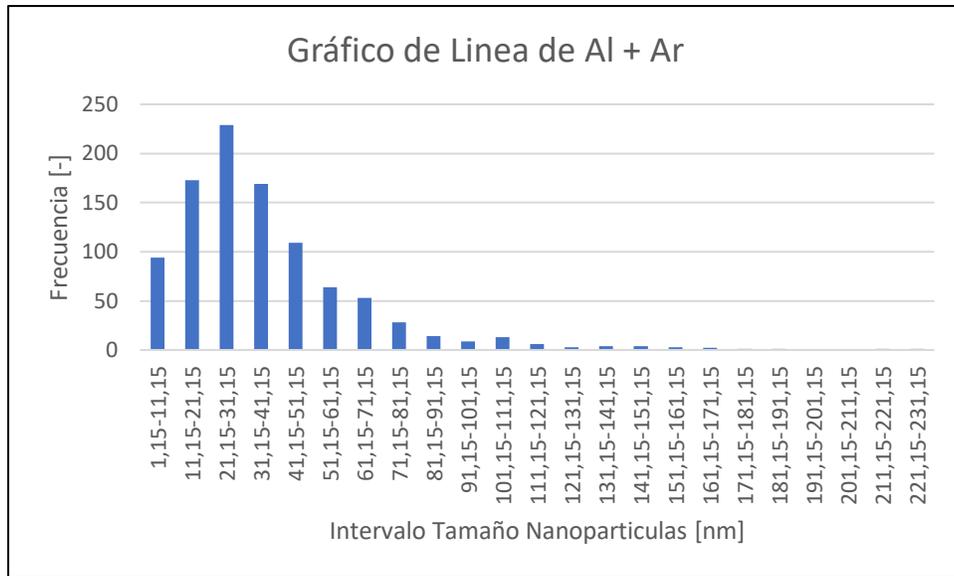


Figura 54: Gráfico de línea nanopartículas de aluminio con argón.

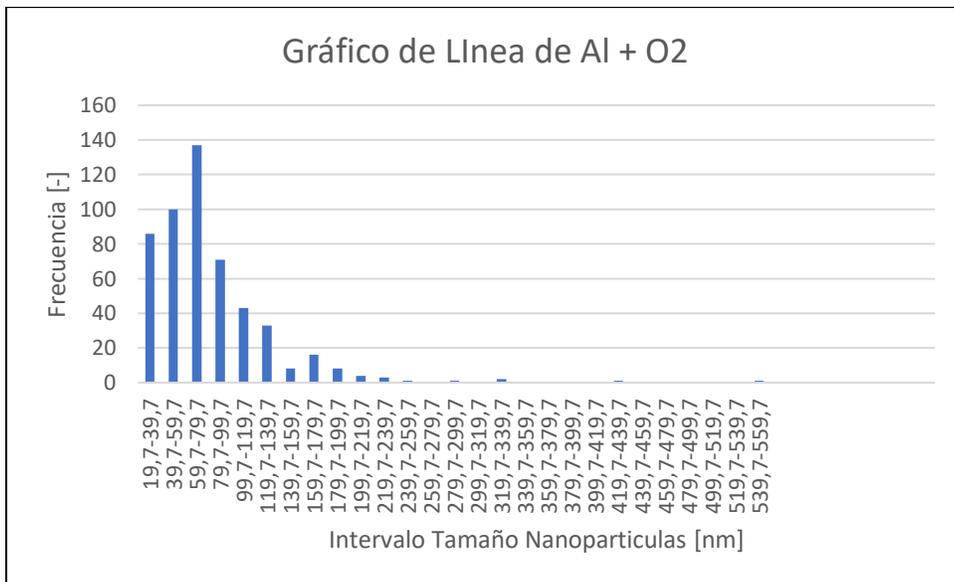


Figura 55: Gráfico de línea nanopartículas de aluminio con oxígeno.

Cada gráfico presenta una curva similar respecto a los otros, pero para un mejor análisis se procede a buscar formas de acotar los extremos menos significativos.

Observando la dispersión de los datos y verificando en las tablas de datos, solo una cantidad mínima superan los 200 [nm]. Se tabula en Tabla 7.

Tabla 7: Parámetros importantes del análisis de muestras.

Material de Aporte	Gas inyectado	Nanopartículas contadas	Nanopartículas de tamaño superior a 200 [nm]	% de NP superior respecto al total de muestra
Cobre	Argón	483	2	0.4 %
Cobre	Oxígeno	208	2	0,96 %
Zinc	Argón	69	0	0 %
Zinc	Oxígeno	856	16	1.8 %
Aluminio	Argón	981	2	0.2 %
Aluminio	Oxígeno	515	9	1.7 %

Con esto podemos realizar un gráfico comparativo de cada metal por gas de reacción considerando las nanopartículas de tamaño menor a 200 [nm], considerando en el Eje X intervalo de tamaños de nanopartículas cada 10 [nm] y en el Eje Y se consideró ahora la Frecuencia Relativa de nanopartículas contadas respecto al total de la muestra de cada metal (columna 3 de la tabla anterior). En la Figura 56 se graficó respecto al gas de reacción argón, mientras que en la Figura 57 se realizó con respecto al oxígeno.

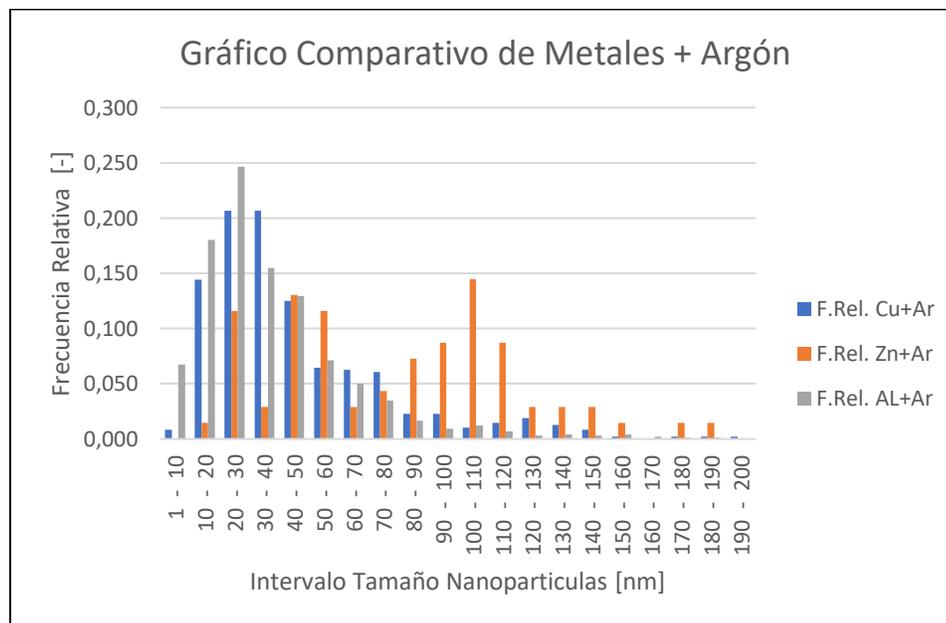


Figura 56: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 200 nm reaccionadas con argón.

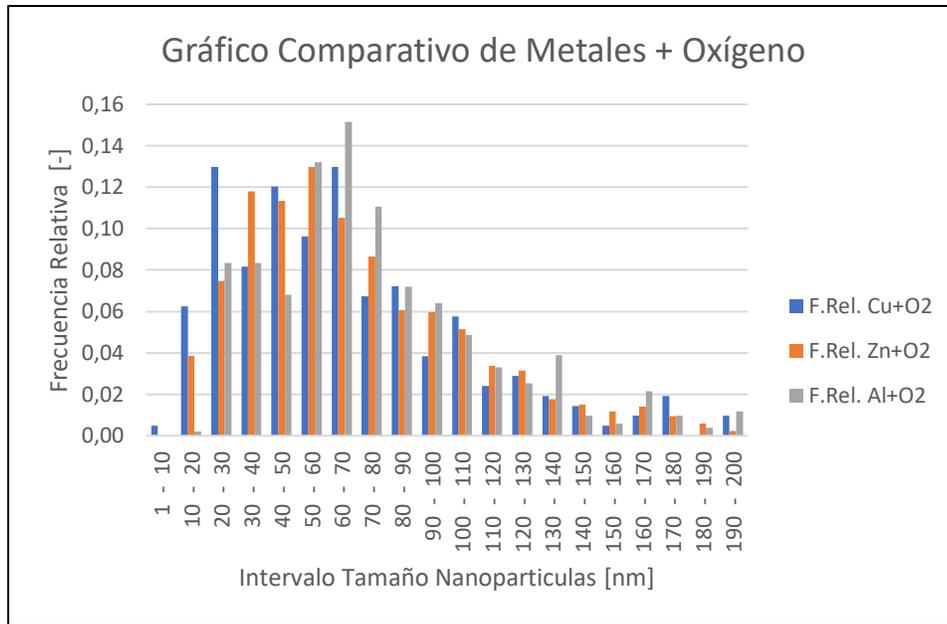


Figura 57: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 200 nm reaccionadas con oxígeno.

Según la norma ISO 80004-1:2023, un nanoelemento se considera nanopartícula cuando sus dimensiones son menores a 100 [nm], por lo que se realizó la misma metodología anterior, pero respecto nanopartículas con dimensiones menores a 100 [nm]. Realizando los gráficos comparativos mostrados en la Figura 58 y Figura 59. Los valores analizados en este análisis se muestran en la Tabla 8. De este análisis es importante destacar que un 85.71% de las muestras cumplen con la normativa y el tamaño promedio de estas es de 45.33 [nm].

Tabla 8: Parámetros importantes del análisis de muestras según Norma ISO 80004-1:2023.

Material de Aporte	Gas inyectado	Nanopartículas contadas	Nanopartículas de tamaño superior a 100 [nm]	% de NP superior respecto al total de muestra
Cobre	Argón	483	36	7,45%
Cobre	Oxígeno	208	25	12,02%
Zinc	Argón	69	39	56,52%
Zinc	Oxígeno	856	41	4,79%
Aluminio	Argón	981	183	18,65%
Aluminio	Oxígeno	515	120	23,30%

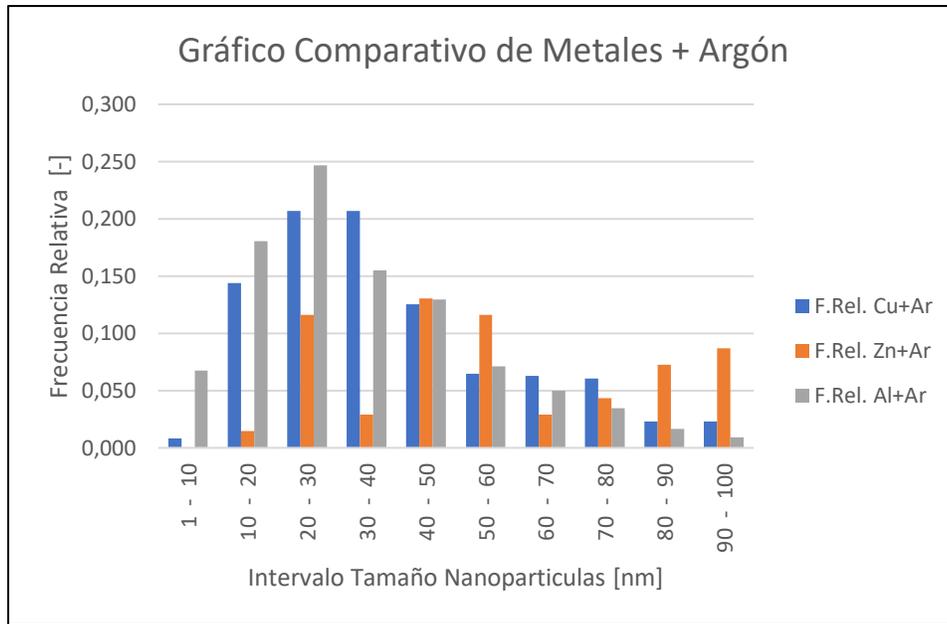


Figura 58: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 100 nm reaccionadas con argón.

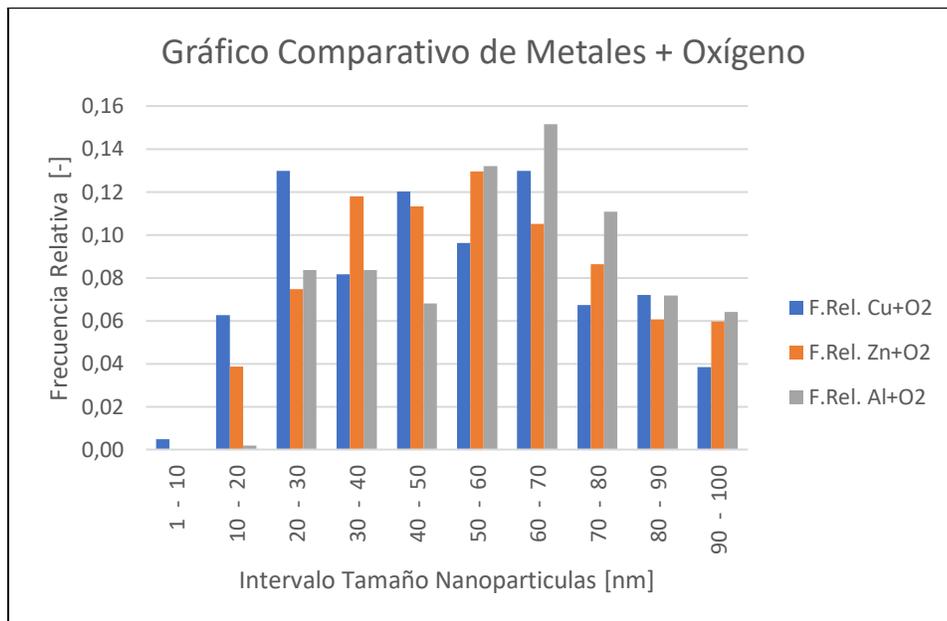


Figura 59: Gráfico comparativo de nanopartículas menores a 100 nm reaccionadas con argón.

Respecto al rendimiento másico que se obtiene en las pruebas, donde se considera para el cálculo la masa de alambre que ingreso a la cámara de reacción en cada prueba, restando la masa de las secciones de alambre que no reaccionaron y quedaron depositadas al fondo de la cámara de reacción en cada una, se hace notar que el porcentaje de masa del alambre que reacciona y queda en suspensión en la nube varía entre el 11,29 y 34,50% del total de masa que se ingresa por alambre a la cámara de

reacción. Luego este valor de masa realmente reaccionada se compara a la masa de cada muestra de nanopartículas, obteniendo los datos reales del rendimiento másico del precipitador. Estos valores se encuentran tabulados para una mejor comprensión en la Tabla 9.

Tabla 9: Rendimiento de reacción y rendimiento másico por muestra.

Metal	Gas	Rendimiento Reacción	Rendimiento másico
Cobre	Argón	34,50%	15,67%
	Oxígeno	11,29%	11,68%
Zinc	Argón	30,37%	42,11%
	Oxígeno	27,43%	38,04%
AL	Argón	19,27%	17,24%
	Oxígeno	28,50%	28,07%

CAPÍTULO 6: Análisis de Funcionamiento

Concluida la etapa de pruebas experimentales, hay que destacar varios puntos que son factores fundamentales a la hora de llevar a cabo estas pruebas, ya que se procura extenderlas en un rango de duración entre 8 y 10 minutos. Partiendo por la etapa de reacción que fue la que presentó mayores inconvenientes y sus soluciones tardaron varios días, debido a tener que cotizar el material en bruto, comprar, esperar el envío desde Santiago y luego la fabricación de la pieza en los talleres de la Universidad, donde los trabajadores tenían otras tareas que realizar en paralelo.

La reacción de arco eléctrico del alambre de aporte con el electrodo de tungsteno en la cámara de reacción, luego de varias pruebas de reacción se consiguió llegar a valores de los parámetros del amperaje de la soldadora, así como a la velocidad a la que ingresa el alambre de aporte mediante el motor eléctrico puesto en la parte superior de la cámara de reacción. Estos valores en la teoría permiten realizar las pruebas de manera constante y sin mayores interrupciones, pero en la práctica se presentan otros problemas que no permiten simplemente prender la soldadora y motor de alimentación y dejar el equipo sin necesidad de variar parámetros.

El principal problema se dio en el conjunto boquilla porta tungsteno, boquilla de alambre de aporte y el mismo tungsteno en sí. Durante la reacción y al estar cerrada la puerta de supervisión para la reacción, que es la condición normal y segura de operación de la DARC-AC, muchas chispas de material caliente y escoria rebotan en las paredes internas, chocando posteriormente con alguno de los elementos mencionados, material que al enfriarse se fija a estos elementos y termina ocasionando una obstrucción o problema en la reacción.

En la Figura 60, se ve la boquilla que guía al alambre de aporte obstruida en el extremo que va en el interior de la cámara de reacción, por el mismo alambre que se soldó con chispas de cobre que rebotaron al interior de la cámara. Esto mientras el motor sigue intentando ingresar más alambre a la cámara, generando una obstrucción entre la boquilla y el segundo eje del motor que hace que el material tome forma de zigzag poniendo en peligro la integridad y funcionamiento de este.

Luego de repetidas pruebas fallidas la boquilla de bronce se fue desgastando al eliminar este material soldado de su punta, mostrado en la Figura 61.

Este desgaste de la boquilla que guía se acumuló hasta el punto en que el alambre de aporte no lograba hacer el arco eléctrico con el tungsteno fijo, por lo que se tuvo que fabricar boquillas guías de repuesto.

Una solución momentánea a este problema fue la implementación de un protector en el extremo de esta boquilla, realizado a partir de un tubo de bronce. Mostrado en la Figura 62.



Figura 60: Boquilla obstruida por chispas de cobre soldadas.



Figura 61: Boquilla con desgaste producto de chispas soldadas y su posterior limpieza.



Figura 62: Boquilla con protector en su extremo.

En varias ocasiones durante las pruebas de aluminio, el electrodo fijo compuesto por el tungsteno acumulaba material derretido a muy alta temperatura, ver Figura 63, lo que ocasionaba un pequeño giro por el peso de este material y lo desviaba, interrumpiendo la reacción de arco eléctrico o también ocasionaba que se cerrara el circuito al estar en contacto ambos electrodos de la soldadora. En la Figura 64 se observa in situ esta acumulación de material y que detiene el funcionamiento.

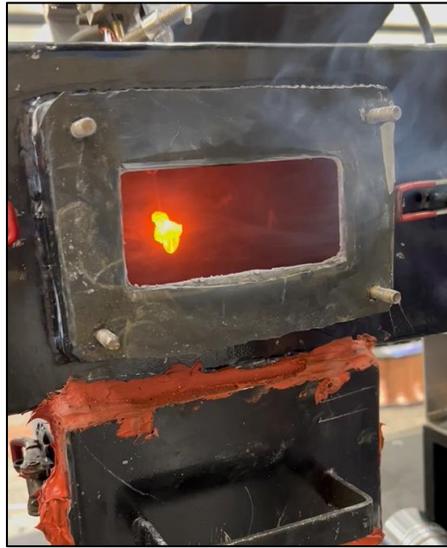


Figura 63: Tungsteno con material pegado a muy alta temperatura.



Figura 64: Tungsteno con material pegado a alta temperatura.

En la Figura 65 se muestra una comparativa de las puntas del tungsteno original contra el tungsteno con acumulación de material. Mientras que en la Figura 62, se hace una comparativa del tungsteno respecto al desgaste propio en su longitud cuando no presenta acumulación del material.



Figura 65: Comparativa de tungsteno original contra el tungsteno con acumulación de material.



Figura 66: Comparación de tungsteno original contra el tungsteno desgastado.

Debido a esta acumulación de temperatura en el tungsteno como en la boquilla que lo soporta, así como en la boquilla que guía al alambre, luego de varias pruebas de funcionamiento se fue devastando el hilo de las piezas de teflón que sujeta estas boquillas a las paredes de la cámara de reacción, generando un aflojamiento de las boquillas, cuando ocurre la reacción de arco eléctrico se provoca a la vez una desviación axial respecto al eje y tiene como consecuencia la no reacción de arco eléctrico entre electrodos. Cuando se presentó este problema se debió realizar la fabricación de estas piezas nuevamente en el taller de máquinas herramientas.

El electrodo de tungsteno en las pruebas que se utilizó como gas de operación, el argón no presentaba mayor desgaste, incluso sin necesidad de esmerilarlo para darle su forma de punta afilada durante las pruebas, ni girar el sistema que le permite estar más al interior de la cámara de reacción y en consecuencia más cerca del alambre de aporte para generar correctamente el arco eléctrico. Mientras que cuando se utilizó como gas el oxígeno, es necesario acercar el tungsteno al alambre en forma

recurrente, siendo en el caso más extremo, el de la reacción con cobre. Se debió aplicar la maniobra de acercamiento cada 60 segundos aproximadamente para poder reaccionar suficiente material. Esta maniobra consiste en apagar la soldadora por unos segundos y girar con un destornillador o taladro eléctrico el perno en la boquilla del tungsteno unas vueltas y así empujar axialmente este electrodo hacia el interior de la cámara de reacción.

La reacción de zinc se realizó con un arco eléctrico constante y presente en cada momento, mientras que la reacción de cobre y aluminio se realizaba en pulsos, generando el arco un instante, combustionando una sección de material y luego el metal de aporte que se mantenía ingresando lograba generar otra vez el arco y reaccionaba nuevamente.

En la sección que compete a la recolección de nanopartículas, se observó en algunas pruebas un aumento en la presión interna de la cámara de recolección cuando el caudal de gas inyectado fue superior a los 5 [m³/s], generando un efecto de inflado en la cámara cuando se hizo reaccionar los metales cobre y luego el aluminio, cabe destacar que esto ocurrió solo cuando se generaba el arco eléctrico en la cámara de reacción generando una mayor presión interna dentro de todo el sistema.

Se realizó una prueba de campo electrostático montando el máximo de placas permitido por cada set, siendo 60 placas en cada uno a una distancia de 6 [mm]. Inicialmente se configuraron las fuentes de voltaje a los 7000 [V], se generaron arcos eléctricos entre las placas durante la mitad del tiempo de prueba, mostrados en la Figura 67 y Figura 68, los que al tener la capacidad de energizar el medio gaseoso que une las placas y no presentar una resistencia considerable, se presenta una corriente teóricamente infinita, que durante un instante de tiempo cierra el circuito y pone en peligro el funcionamiento de las fuentes de voltaje. En la práctica estas tienen un fusible de 3 [A] el que no tuvo inconvenientes.



Figura 67: Arco eléctrico en placas del precipitador.

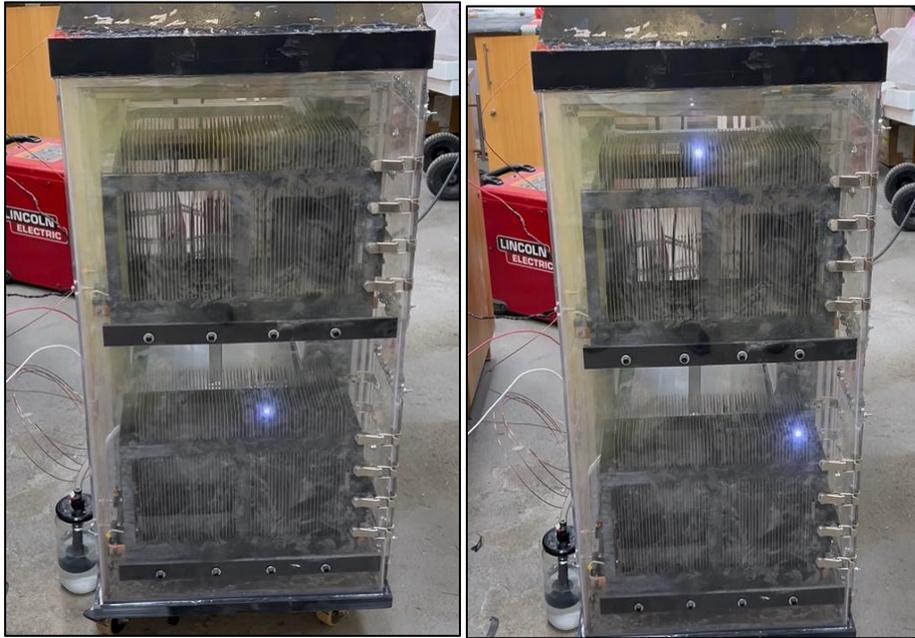


Figura 68: Arcos eléctrico en placas del precipitador con menos de 1 segundo de diferencia.

Otro punto importante es que se observó bastante material que fue reaccionado exitosamente en la cámara de reacción, pero se queda adherido en las paredes internas de esta cámara o en el deflector que la une a la cámara de recolección fabricada. En la Figura 69, se muestra una foto del interior de la cámara de reacción posterior al funcionamiento con zinc y argón. Se recuerda que las paredes de la cámara son de acero, el que tiene un color grisáceo y no blanco, al igual que las boquillas de bronce con su característico color mostrado en figuras anteriores como por ejemplo la Figura 62. Este problema condiciona la cantidad de material que ingresa a la cámara de recolección.

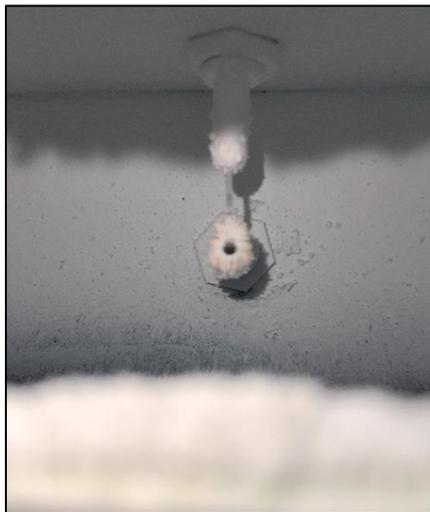


Figura 69: Interior de la cámara de reacción con material adherido.

CAPÍTULO 7: Conclusiones y trabajos futuros

7.1 Conclusiones

Completadas las etapas de desarrollo, diseño, fabricación de prototipo de prueba, fabricación de prototipo final y puesta en marcha de la máquina DARC-AC, se concluye lo siguiente:

Se definen completamente las limitaciones necesarias para realizar un diseño viable y funcional que permitan realizar un correcto diseño de la cámara de recolección y precipitador electrostático.

Se diseña computacionalmente la cámara de recolección y las piezas que conforman el precipitador electrostático, lo que permite obtener planos detallados y que abarcan en totalidad cada pieza necesaria para su posterior fabricación en el taller de máquinas-herramientas de la Universidad de Concepción.

Se fabricó un prototipo con la mitad de la capacidad de placas, para comprobar el funcionamiento correcto del precipitador electrostático, la viabilidad de fabricación de las piezas y su correcto ensamble entre ellas. Esto con la finalidad de estar completamente seguros de que el método de conexión eléctrica de las placas del precipitador sea funcional y práctico en la obtención de material desde ellas.

Con lo anterior, se dio paso a la fabricación del modelo final de cada una de las piezas que componen el precipitador electrostático, siendo necesario imprimir en PLA la mayoría de ellas, así como solicitar a empresa externa el acrílico y su maquinado, además de pedir las placas de acero inoxidable cortadas a maestranza local. Con todas las piezas necesarias ya fabricadas se ensambló en el laboratorio DARC-AC ubicado en el interior del taller de máquinas herramientas. Con esto se comprueba el correcto ensamble de las piezas móviles y se sellan herméticamente las que lo necesitan.

Se pone en funcionamiento la máquina DARC-AC, realizando pruebas de hermeticidad en las juntas necesarias y el flujo de gas a través del filtro que descarga al ambiente la nube de gas, luego se corroboró la correcta energización de las placas del precipitador. Con esto se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento definitivas donde se aplicó un campo electrostático en el precipitador, producido por las fuentes de poder solo a 6000 [V], y no 7000 [V] ya que a este valor se produjo la presencia de arcos eléctricos entre las placas colectoras, siendo un peligro para las fuentes de voltaje.

Finalmente, se obtienen nanopartículas de origen metálico, analizándolas mediante TEM, obteniendo un porcentaje de 85.71% de nanopartículas con tamaño inferior o igual a 100 [nm] y el tamaño promedio de estas muestras es de 45.33 [nm]. Respecto al rendimiento másico, se logra alcanzar un valor de 42%, lo que es muy bajo comparado al rendimiento ideal. Este rendimiento se asocia a la gran cantidad de material adherido a las paredes internas de la cámara de reacción y el deflector que la une posteriormente con la cámara de recolección, siendo este problema causado eventualmente por la estática de las partes metálicas fabricadas con anterioridad, algo exento al desarrollo de esta memoria de título. Considerando el porcentaje de partículas que cumplen con la condición de ser nanométricas se concluye que lo fabricado funciona cumpliendo las expectativas.

7.2 Trabajos futuros

El equipo fabricado cumple con los objetivos establecidos al principio del proyecto, pero es un diseño que aún se puede perfeccionar en cuanto a la funcionalidad de este, así como en los tiempos y costos de fabricación.

El principal desafío a afrontar en un futuro, es lograr que la nube de gas con nanopartículas generada en la cámara de reacción llegue de forma más íntegra a la cámara de recolección, ya que en el paso desde la cámara de reacción y deflector hay un gran porcentaje que se adhiere a las paredes internas de estas dos piezas, resultando posteriormente en una disminución considerable de la posible masa que se pueda adherir a las placas del precipitador electrostático. Una posible solución a esta problemática sería añadir una conexión a tierra que permita neutralizar la carga estática que presentan las piezas metálicas.

El mayor desafío del diseño fue poder extraer las placas de una forma fácil desde cada set de placas y a la vez montar estos sets de forma rápida al interior de la cámara de recolección, esto se cumplió sin embargo, la obtención de las nanopartículas desde cada placa sigue siendo una tarea tediosa y de sumo cuidado, ya que la manera en la que se ha estado “limpiando” cada placa, es con una brocha de pintar la que se pasa sobre estas verticalmente de forma manual y el material nanoparticulado barrido cae por gravedad en una hoja o recipiente para su recolección final y posterior análisis. Esta operación requiere de un tiempo aproximado de 1 hora en total para los dos sets con 20 placas montadas cada uno. Por ende, realizar un método de “limpieza” o barrido de placas más rápido es un desafío para versiones futuras del sistema.

Respecto a la fabricación de piezas en PLA se puede analizar las dimensiones mínimas de cada viga y columna, así como el porcentaje de relleno en la impresión 3D a utilizar, buscando acotar tiempo y material necesario para su fabricación. De igual forma, se puede buscar una alternativa al método de conexión de las placas con la barra, ya que para este proyecto fue utilizada la de menor medida disponible en el comercio nacional, pero se podría maquinarse o pedir a maestranza especializada en cobre alguna medida de menor área transversal y así disminuir la masa en cada set de placas.

El motor de alimentación que introduce el alambre de aporte a la cámara de reacción y su controlador necesitan ser aislados del campo electromagnético generado por el propio precipitador, ya que se produjeron interferencias en el funcionamiento del programa y fue necesario utilizar la parada de emergencia que dispone con un botón físico.

Cada día se desarrollan nuevos avances científicos y tecnológicos, lo que permite que futuras versiones puedan modernizar y perfeccionar lo fabricado y probado actualmente.

Referencias

- [1] C. Dhand, N. Dwivedi, X. J. Loh, A. N. Jie Ying, N. K. Verma, R. G. Beuerman, R. Lakshminarayanan, S. Ramakrishna, "Methods and strategies for the synthesis of diverse nanoparticles and their applications: a comprehensive overview", 2015
- [2] J. Park, Y.M. Kim, S. Hong, B. Han, K.T. Nam, & Y. Jung, "Closed-loop optimization of nanoparticle synthesis enabled by robotics and machine learning.", 2023
- [3] P. Singh, Y. Kim, D. Zhang, D. Yang, "Biological synthesis of nanoparticles from plants and microorganisms," 2016.
- [4] R. Crane, D. Sapsford, "Towards sustainable mass production of metallic nanoparticles: Selective synthesis of copper nanoparticles directly from malachite ore", 2023
- [5] S. Anu Mary Ealia, M. P. Saravanakumar, "A review on the classification, characterisation, synthesis of nano particles and their application", 2017
- [6] R. Saha, K. Subramani, S. Dey, S. Sikdar, A. Incharoensakdi, "Physicochemical properties of green synthesised ZnO nanoparticles and utilisation for treatment of breast cancer", 2023.
- [7] I. Restrepo, "Desarrollo de películas de nanocompuesto de ácido poliláctico/ZnO con propiedades antibacterianas," Universidad de Concepción, 2017
- [8] G. Moraga, "Desarrollo de máquina para la síntesis de nanopartículas por descarga de arco eléctrico DARC-02", "Universidad de Concepción 2018"
- [9] J. Escalona, "La técnica del sinterizado de polvos por arco eléctrico, Spark Plasma Sintering SPS - Estado tecnológico del arte, expectativas y límites", 2010
- [10] Y. Hernández, G. Holguín, M. Baquero, F. Gómez-Baquero, "Síntesis de nanotubos de carbono por el método de arco de descarga eléctrica"
- [11] A. Jaworek, A.T. Sobczyk, A. Marchewicz, A. Krupaa, T. Czecha, Ł. Śliwiński, A. Ottawab, A. Charchalisc, "Two-stage vs. two-field electrostatic precipitator", 2017.
- [12] A. Jaworek, A. Marchewicz, A.T. Sobczyk, A. Krupa, T. Czech, "Two-stage electrostatic precipitators for the reduction of PM2.5 particle emission", 2018
- [13] Berne, R. W., & Schummer, J. (2005). Teaching societal and ethical implications of nanotechnology to engineering students through science fiction. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 25(6), 459-468.
- [14] C. Buzea, I. Pacheco, K. Robbie, "Nanomaterials and nanoparticles: Sources and Toxicity", (2007).
- [15] T.S. Santra, F.G. Tseng, T.K. Barik, "Biosynthesis of Silver and Gold Nanoparticles for Potential Biomedical Applications—A Brief Review", 2014.
- [16] J. F. Rodriguez, U. F. Alarcón, O. García Bedoya, G. Benavides, "Diseño y Prototipo de un precipitador electrostático" (2017)
- [17] <https://www.iso.org/es/contents/data/standard/07/95/79525.html?browse=tc>
- [18] A. Jayakumar, S. Radoor, E.K. Radhakrishnan, I.C. Nair, S. Siengchin, J. Parameswaranpillai "Soy protein-based polymer blend and composites". 2022

- [19] G. Leyva Gómez, "Nanopartículas de plata: tecnología para su obtención, caracterización y actividad biológica", 2013.
- [20] A. Herráez, "Las asombrosas estructuras del carbono: fullerenos, grafenos y nanotubos", Apuntes de ciencias, 2011.
- [21] D. Saucedo, "Síntesis de nuevas nanoestructuras de carbono por descarga de arco eléctrico", Instituto Politécnico Nacional de México, 2008.
- [22] D. Mayorga, E. Viteri, E. Orna, E. Caballero, "Diseño y construcción de un sintetizador de nanotubos de carbono de bajo costo mediante descarga de arco eléctrico", Revista Polo del Conocimiento. Ed. 56, Vol. 6, pág. 1205-1228, Marzo 2021.
- [23] P. Gonzalez, "Precipitador electrostático a escala piloto para el laboratorio de aire de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucamaranga", 2019.
- [24] J. F. Rodriguez, U. F. Alarcón, O. García Bedoya, G. Benavides, "Diseño y Prototipo de un precipitador electrostático", 2017.
- [25] N. Guerrero, P. Cornejo, "Informe técnico IT-2022-DUC-001 - Análisis fluidodinámico del funcionamiento de equipo para generación de nanopartículas de polvo mediante dinámica de fluidos computacional", Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, 2022.
- [26] <http://vicalsa.com.ar/propiedades-fisicas.html>
- [27] <https://uruguay334.wordpress.com/category/informacion-tecnica/>
- [28] "Lesson 3 - ESP design parameters and their effects on collection efficiency"
- [29] W. Deutsch, "Annals of physics", 68:335, 1922.
- [30] E. Aderson, "Report, Western Precipitator Co", 16:69, 1919.
- [31] H.J. White, "Review of the state of the technology. Proceedings of the International Conference on Electrostatic Precipitation", 1981.
- [32] C.A. Gallaer, "Electrostatic Precipitator Reference Manual", Electric Power Research Institute. Project 1402-4, 1983.

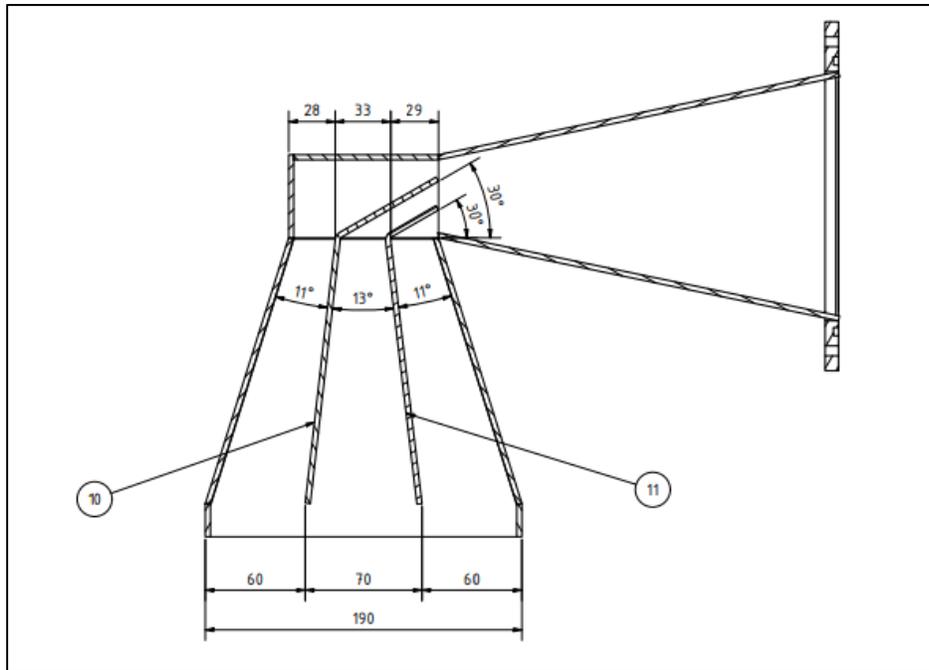


Figura A.3: Vista de corte A-A.

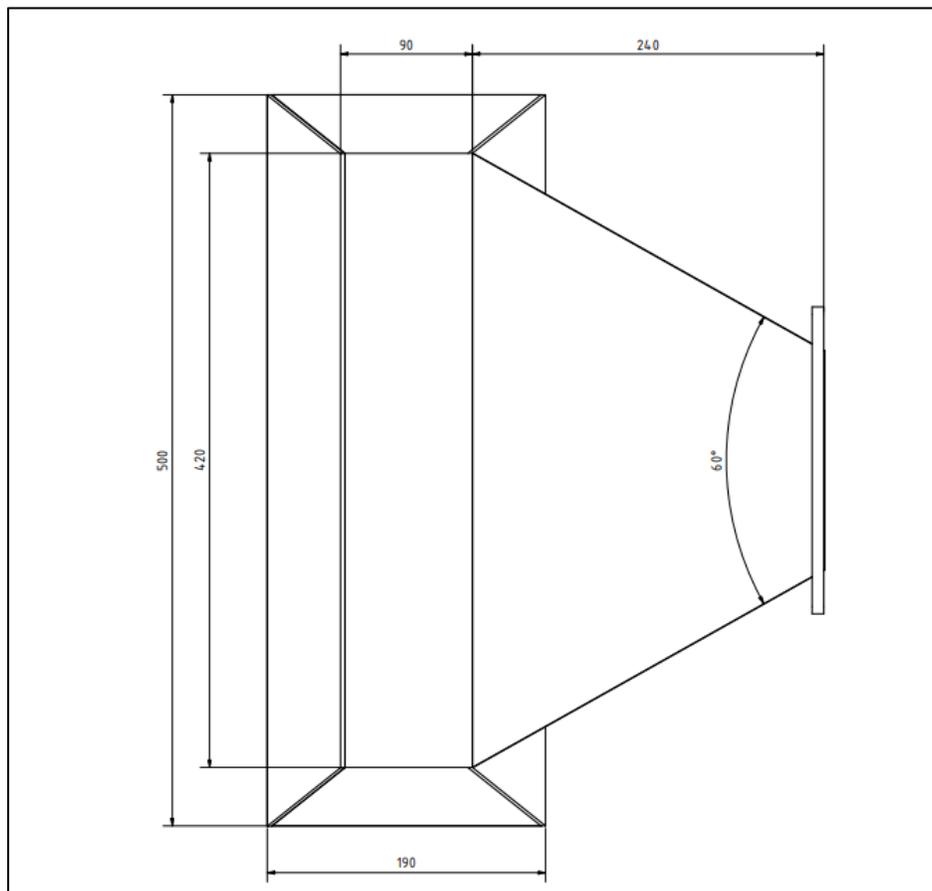


Figura A.4: Vista superior de deflector.

Anexo B: Plano caras cámara de recolección fabricadas en acrílico
Medidas en [mm].

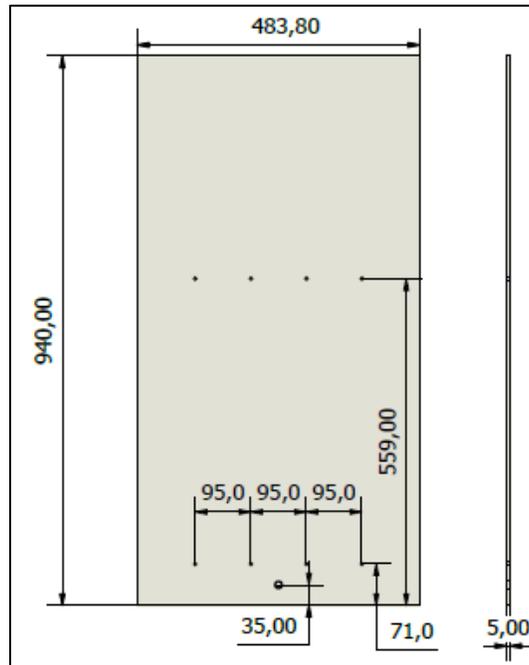
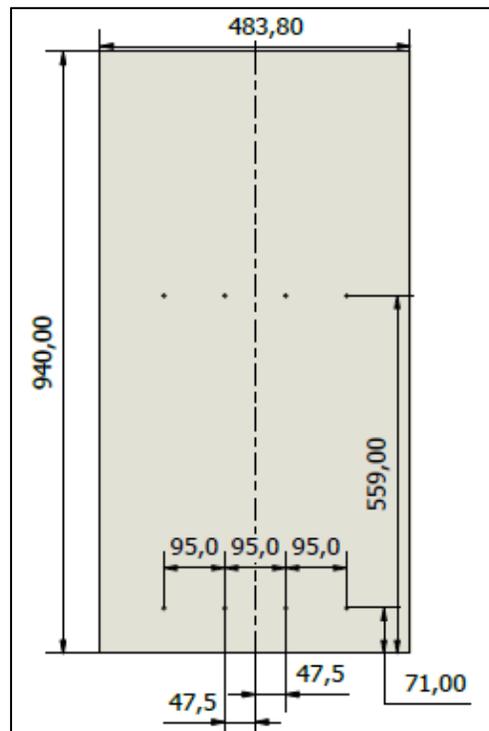


Figura B.1: Plano cara lateral con purga.



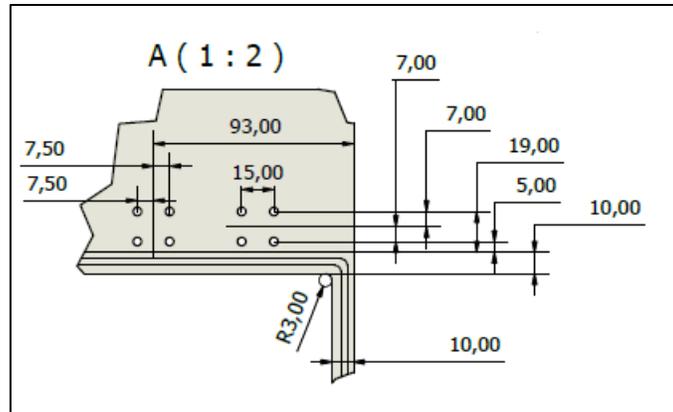


Figura B.5: Detalle zona A delimitado en Figura B.4 de cara frontal.

Anexo C: Set de porta placas con las placas montadas

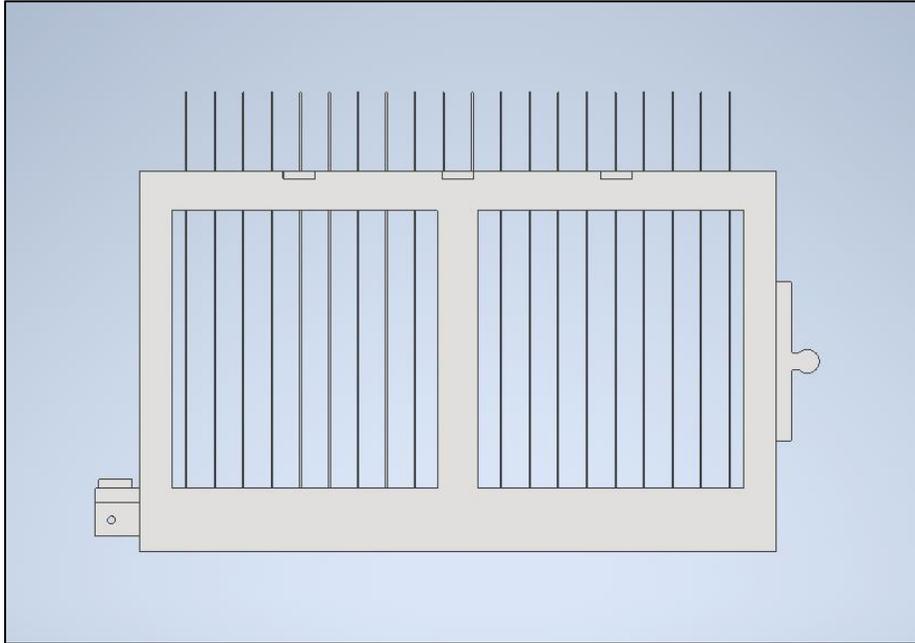


Figura C.1: Vista lateral del set de placas ensamblado.

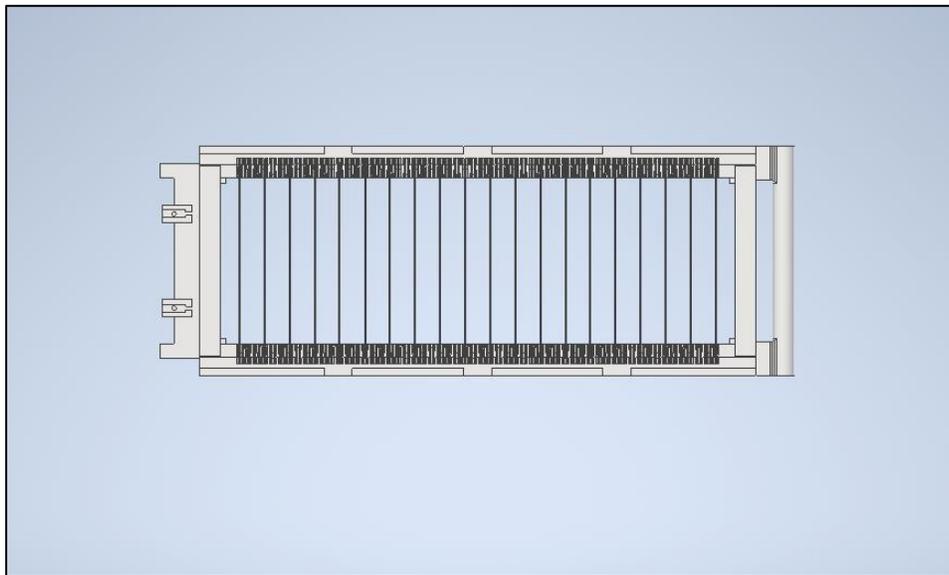


Figura C.2: Vista superior del set de placas ensamblado.

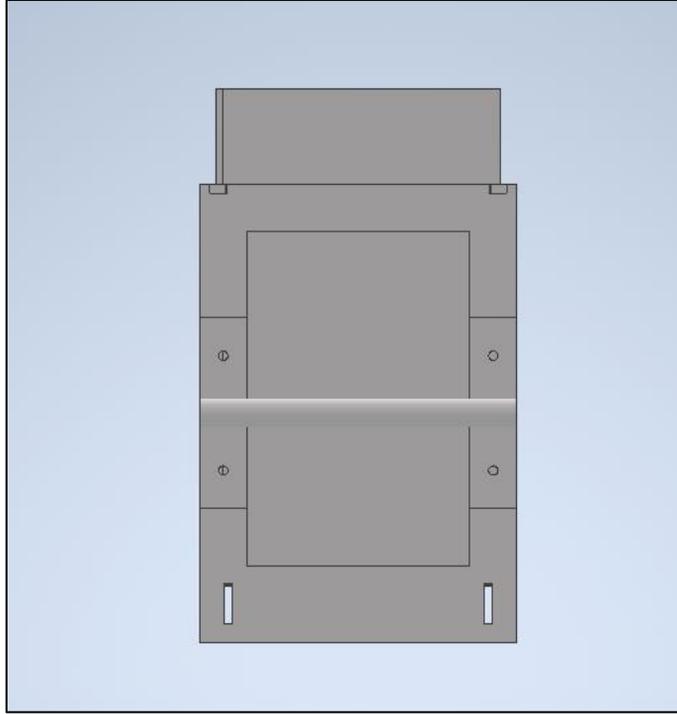


Figura C.3: Vista frontal del set de placas ensamblado.

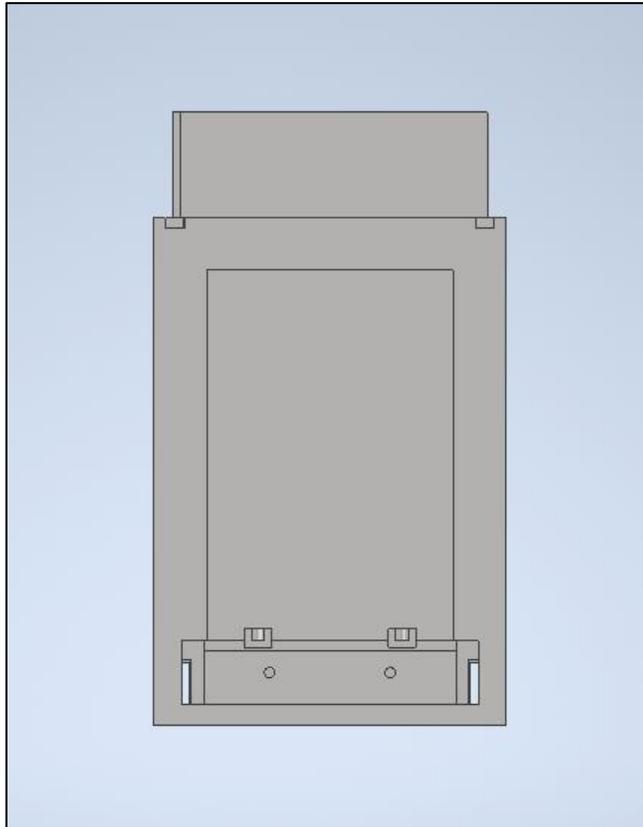


Figura C.4: Vista posterior del set de placas ensamblado.

Anexo D: Set de placas con nanopartículas de cobre reaccionado con argón



Figura D.1: Foto macro del set de placas con nanopartículas de cobre.



Figura D.2: Foto posterior del set de placas con nanopartículas de cobre.

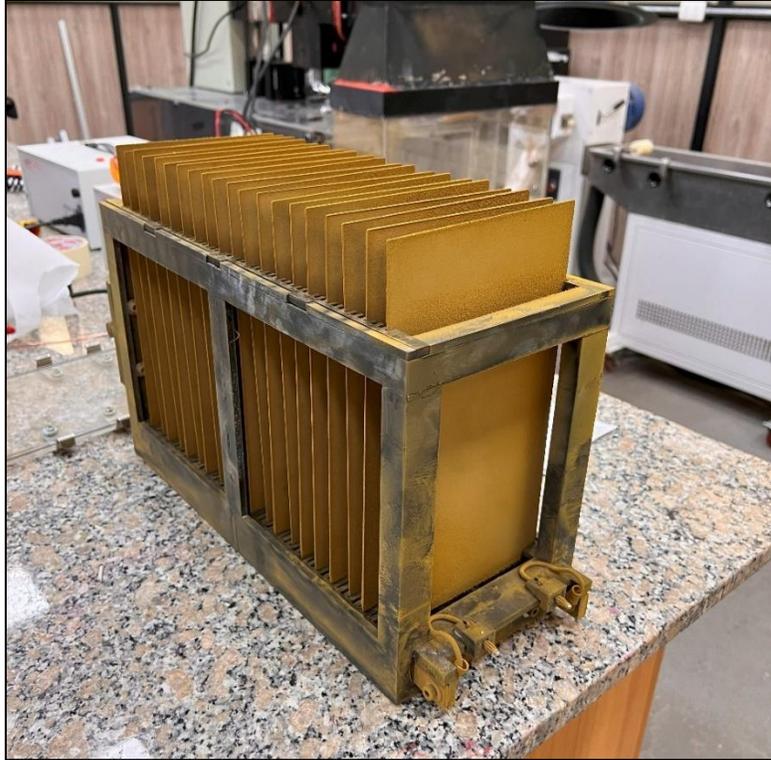


Figura D.3: Foto de otro ángulo del set de placas con nanopartículas de cobre.



Figura D.4: Foto macro del polvo de nanopartículas de cobre recolectado de las placas.

Anexo E: Set de placas con nanopartículas de zinc reaccionado con argón



Figura E.1: Foto macro del set de placas con nanopartículas de zinc.



Figura E.2: Foto posterior del set de placas con nanopartículas de zinc.



Figura E.3: Foto superior del set de placas con nanopartículas de zinc.

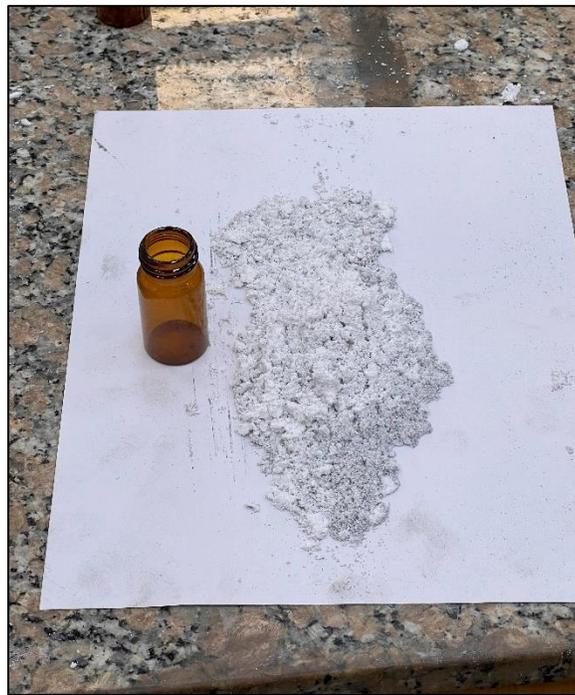


Figura E.4: Foto del polvo de nanopartículas de zinc recolectado en las placas.

Anexo F: Set de placas con nanopartículas de aluminio reaccionado con argón



Figura F.1: Foto del set de placas con nanopartículas de aluminio.

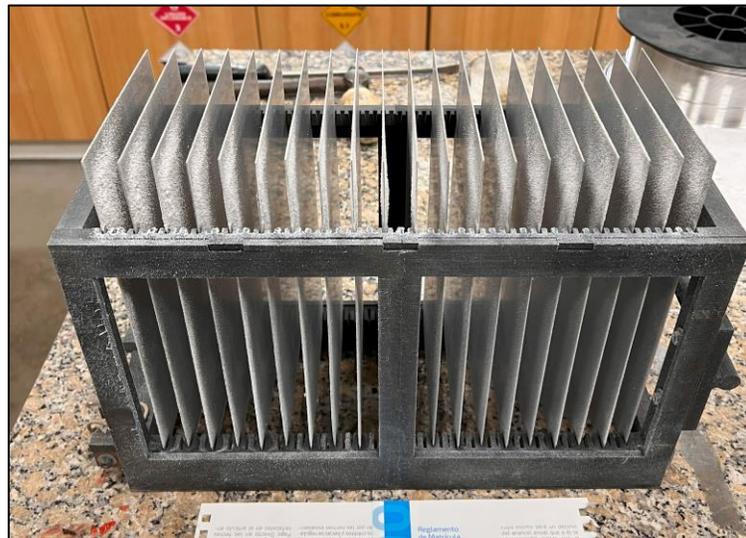


Figura F.2: Foto lateral del set de placas con nanopartículas de aluminio.



Figura F.3: Foto macro de placa con nanopartículas de aluminio adherido.