



Diseño, construcción y validación numérica de un separador ciclónico para aplicaciones académicas.

Estevez Burbano, Javier Aldair y Ramirez Lucio, Luis Enrique

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Msc. Calvopiña Enríquez, Héctor Alejandro

31 de julio de 2026



Certificado de análisis
Compilatio Magister+ | ESPE-ECU

TESIS-SEPARADOR CICLONICO-ESTEVEZ-RAMIREZ_rev3

ID : 86b049359978fd6e66f31adf2663c49847fc610b



10%
Textos sospechosos

Nombre del fichero : TESIS-SEPARADOR CICLONICO-ESTEVEZ-RAMIREZ_rev3.txt
Tamaño del archivo original : 2,16 MB
Número de palabras : 12.957

Depositante : HECTOR ALEJANDRO CALVOPÍÑA ENRIQUEZ
Fecha de depósito : 23 de julio de 2026
Tipo de carga : interface
fecha de fin de análisis : 23 de julio de 2026

Resumen (sección 1/2)

Localización de los textos sospechosos en el documento :



Incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



Similitudes

0%

Pasajes con similitudes a fuentes encontradas en diferentes colecciones.



Detección de IA

10%

Textos estilísticamente próximos a un texto generado por una IA.

Este índice es un indicador y no una prueba. Comprueba con el autor si domina los conocimientos mencionados en el documento.



Idiomas no reconocidos

0%

Pasajes en los que parte del vocabulario utilizado no forma parte del diccionario de la lengua.
Puede tratarse de un intento del autor de modificar el texto para evitar ser detectado.

No incluido en el porcentaje de textos sospechosos :



Textos entre comillas

0%

Pasajes entre comillas, a menudo indicativos de una cita.

HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ

Firmado digitalmente por HECTOR
ALEJANDRO CALVOPINA ENRIQUEZ
Fecha: 2026.08.18 07:41:20 -05'00'

Msc. Calvopiña Enríquez, Héctor Alejandro
Director



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **“Diseño, construcción y validación numérica de un separador ciclónico para aplicaciones académicas”** fue realizado por los señores **Estevez Burbano, Javier Aldair y Ramirez Lucio, Luis Enrique**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; habiéndose efectuado una revisión integral de forma y de fondo conforme a los lineamientos y formatos institucionales vigentes. Además, fue revisado y analizada en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 31 de julio de 2026

HECTOR
ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ

Firmado
digitalmente por
HECTOR ALEJANDRO
CALVOPINA
ENRIQUEZ
Fecha: 2026.08.18
07:41:46 -05'00'

Msc. Calvopiña Enríquez, Héctor Alejandro

Director

C.C.: 1718823303



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Estevez Burbano, Javier Aldair y Ramirez Lucio, Luis Enrique**, con cédulas de ciudadanía n° 1004574818 y 2300563745, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular: **Diseño, construcción y validación numérica de un separador ciclónico para aplicaciones académicas** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 31 de julio de 2026



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JAVIER ALDAIR
ESTEVEZ BURBANO**

Estevez Burbano, Javier Aldair

C.C.: 1004574818



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LUIS ENRIQUE
RAMIREZ LUCIO**

Ramirez Lucio, Luis Enrique

C.C.: 2300563745



Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Mecatrónica

Autorización de Publicación

Nosotros **Estevez Burbano, Javier Aldair y Ramirez Lucio, Luis Enrique**, cédulas de ciudadanía n° 1004574818 y 2300563745, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular: **Diseño, construcción y validación numérica de un separador ciclónico para aplicaciones académicas** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 31 de julio de 2026



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**JAVIER ALDAIR
ESTEVEZ BURBANO**

Estevez Burbano, Javier Aldair

C.C.: 1004574818



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LUIS ENRIQUE
RAMIREZ LÚCIO**

Ramirez Lucio, Luis Enrique

C.C.: 2300563745

Dedicatoria

Dedico este trabajo de integración curricular, en primer lugar, a Dios, por brindarme la fortaleza, sabiduría y la gran oportunidad de culminar esta etapa tan importante en mi formación profesional.

A mis padres y a mi familia, por su amor incondicional, esfuerzo sacrificio y apoyo que me brindaron durante estos años, quienes siempre creyeron en mí y me motivaron a superar cada desafío presentado a lo largo de toda esta travesía.

A mi novia que me brindó su amor, apoyo, comprensión y palabras de aliento en los momentos más difíciles, convirtiéndose en una fuente de inspiración para alcanzar esta meta.

Y sobre todo a mí, por no rendirme cuando el camino se volvió difícil. Por las largas jornadas de estudio, el esfuerzo constante, los momentos de incertidumbre y los sacrificios realizados durante estos años de formación universitaria. Este logro simboliza que cada obstáculo superado contribuyó a mi crecimiento personal y profesional, y me recuerda que la perseverancia siempre tiene su recompensa.

- **Javier Estevez**

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, cuya guía y fortaleza infinita fueron la luz que me permitió recorrer y culminar esta etapa importante de mi vida. A mis padres, Luis Ramirez y Lorena Lucio, el pilar fundamental de todo lo que soy, por su respaldo absoluto, por cada sacrificio silencioso y por ser la inspiración constante detrás de este logro. Con un inmenso y especial cariño, ofrezco este triunfo a Sandra Paz y Georgina Morales, dos mujeres que han sido como segundas madres para mí, su ayuda incansable y su firmeza para no dejar rendirme en los momentos más difíciles fueron de mucha importancia en este proceso. De igual manera, a mi hermano, Ronny Ramirez, cuyo cariño constante fue el refugio que me recargó de energías en mis días más pesados, dándome la valentía para mantenerme fuerte hasta el final. Y finalmente, a mi mejor amigo, Maikol Rivas, que ha sido un compañero leal que estuvo siempre a mi lado sin dudar, brindándome su apoyo tanto en los buenos momentos y sobre todo en los malos. A todos ustedes, infinitas gracias por ser mi mayor bendición y el motor de mi vida.

- **Luis Ramirez**

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios por otorgarme la fortaleza, la salud y la perseverancia necesarias para culminar satisfactoriamente este trabajo final de mi carrera.

A mi director de tesis, por su orientación, conocimientos, paciencia y valiosas observaciones durante el desarrollo de esta investigación. Su experiencia y acompañamiento fueron fundamentales para alcanzar los objetivos propuestos desde un inicio.

A la Universidad y a la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, por brindarme la formación académica y las herramientas necesarias para mi desarrollo profesional. Asimismo, agradezco a los docentes que contribuyeron con sus enseñanzas a lo largo de mi formación universitaria.

Finalmente, agradezco a mi familia y amigos por su apoyo incondicional, comprensión y constante motivación durante todo este proceso, siendo un pilar fundamental para culminar esta importante etapa de mi vida.

- **Javier Estevez**

La culminación de este proyecto representa el cierre de una etapa de mucho esfuerzo, aprendizaje y dedicación, logro que no habría sido posible sin el acompañamiento de personas importantes.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres y a toda mi familia, gracias por ser mi soporte incondicional, por brindarme la estabilidad, el amor y el aliento necesario en cada paso de mi formación académica y personal.

A mi primo, Elian Paz, quien siempre ha sido un pilar de apoyo constante en mi vida. De igual manera, un agradecimiento especial a Kevin Chacha, por tenderme su mano en esta recta final, brindándome conocimientos, consejos, y el impulso moral necesario para no rendirme y cruzar la meta.

A mis grandes amigos y compañeros de la Universidad, con quienes compartí inolvidables anécdotas, haciendo una mención muy especial a Banda Beyaca y a Los Niños, gracias por su inmensa amistad, por hacer más llevaderos los momentos de mayor tensión académica y por celebrar juntos cada pequeño triunfo. Asimismo, un agradecimiento muy sincero a mis grandes amigos Maikol, Jhorman y Ángel, por su amistad invaluable, por estar siempre presentes y por acompañarme incondicionalmente a lo largo de este camino.

Un reconocimiento muy especial a mi compañero, Javier Estevez. Gracias por el compromiso, la responsabilidad y el excelente trabajo en equipo; tu dedicación y apoyo mutuo fueron claves para superar cada reto.

Finalmente, agradezco profundamente al Ing. Héctor Calvopiña, por su excelente guía, por compartir su experiencia y por el acompañamiento brindado a lo largo de todo este proceso. Su visión y orientación fueron fundamentales para el desarrollo y culminación de este proyecto. A todos ustedes, mi infinita gratitud.

- **Luis Ramirez**

Índice de contenidos

Dedicatoria	6
Agradecimiento	8
Resumen	15
Capítulo I: Generalidades	17
1. Antecedentes	17
2. Alcance	18
3. Objetivos	20
Objetivo general	20
Objetivos específicos	20
Capitulo II: Estado del arte	20
1. Fundamentos teóricos de los separadores ciclónicos	20
2. Clasificación y principios de operación	21
3. Simulación numérica (CFD) aplicada a ciclones	22
Capitulo III	26
Metodología	26
1. Modelado y configuración del problema	28
A. Definición conceptual del separador ciclónico	28
B. Diseño de la geometría del separador ciclónico	30
C. Caracterización de las partículas	33
2. Definición del modelo numérico	35
A. Dominio computacional (CFD)	35
B. Independencia de la malla	40

3. Optimización multiobjetivo	45
A. Diseño de experimentos (DOE)	45
B. Metodología de superficie de respuesta (RSM)	46
C. Definición del algoritmo genético	47
Capítulo IV	49
Resultados, optimización y validación	49
Validación estadística del modelo	49
Modelado empírico y capacidad predictiva	51
Análisis de frente de Pareto	52
Verificación computacional del algoritmo genético mediante CFD.	53
4. Validación experimental del prototipo físico	54
A. Selección de la configuración óptima	54
B. Construcción del prototipo	58
C. Pruebas de funcionamiento del prototipo	78
D. Comparación de resultados de simulaciones CFD con el prototipo físico	

80

Capítulo V	81
Conclusiones y recomendaciones	81
1. Conclusiones	81
2. Recomendaciones	82
3. Propuesta de trabajos futuros	83
Referencias	84
Apéndices	87

Índice de tablas

Tabla 1. Relaciones geométricas del ciclón Stairmand.....	29
Tabla 2. Dimensiones del modelo geométrico inicial	30
Tabla 3. Resultados de las medidas del diámetro de partículas.....	34
Tabla 4. Resultados de la densidad de la partícula.....	35
Tabla 5. Condiciones de frontera y configuración	39
Tabla 6. Resultados de caída de presión y variación relativa según el tamaño de elementos.....	42
Tabla 7. Parámetros utilizados para la configuración del algoritmo genético NSGA-II ..	48
Tabla 8. Resultados de la validación del modelo CFD frente a las predicciones del algoritmo NSGA-II.....	54
Tabla 9. Resultados experimentales de las pruebas, velocidad, masa de entrada, masa recolectada y eficiencia	78
Tabla 10. Validación de las simulaciones con el prototipo físico	80

Índice de figuras

Figura 1. Representación de un separador ciclónico.....	21
Figura 2. Secciones de la capa límite.....	25
Figura 3. Diagrama metodológico utilizado en este trabajo.....	27
Figura 4. Modelo tridimensional del separador ciclónico desarrollado en Autodesk Inventor	32
Figura 5. Caracterización de partículas.....	33
Figura 6. Regiones de dominio. (a) Paredes, (b) Entrada, (c) Salida 1, (d) Salida 2.	36
Figura 7. Malla tetraédrica utilizada en las simulaciones, (a) vista isométrica, (b) vista superior, (c) vista en corte transversal	41
Figura 8. Gráfica de caída de presión vs el número de elementos.	42
Figura 9. Contorno de Y^+	44
Figura 10. Matriz de espacio de diseño DOE 32.	46
Figura 11. Gráfico de R^2 y R^2 ajustado de eficiencia y caída de presión	50
Figura 12. Representación de las superficies predichas por el polinomio de segundo grado para, (a) la eficiencia de separación y (b) la caída de presión.....	51
Figura 13. Gráfico de Pareto con las soluciones óptimas obtenidas con algoritmo NSGA-II.....	53
Figura 14. Perfil de velocidad de los resultados de la simulación CFD.....	55
Figura 15. Perfil de presión de la simulación CFD vista en (a) corte transversal y (b) isométrica por secciones circulares	56
Figura 16. Perfil de distribución de la velocidad de las partículas.	57
Figura 17. Corte plasma CNC de las piezas del separador ciclónico	59
Figura 18. Proceso de rolado de las láminas de acero del separador ciclónico	59
Figura 19. Proceso de soldadura MIG en las uniones de las piezas del separador ciclónico	60

Figura 20. Unión por soldadura del cuerpo cilíndrico con la entrada del separador ciclónico	61
Figura 21. Unión del cuerpo cilíndrico y la parte cónica del separador ciclónico	61
Figura 22. Proceso de pulido para obtener superficies uniformes en el separador ciclónico	62
Figura 23. Prototipo físico final	64
Figura 24. Diagrama de bloques general del sistema de control y adquisición de datos del prototipo	64
Figura 25. Placa de desarrollo ESP-WROOM-32 implementada como unidad central de control.....	67
Figura 26. Módulo de pantalla HMI basado en ESP32-32E para la visualización de datos.....	67
Figura 27. Anemómetro digital UT363 utilizado para la medición del flujo de aire.	68
Figura 28. Conjunto de celda de carga de 1 kg y módulo convertidor ADC HX711.	69
Figura 29. Dispositivos de mando y de seguridad mecánica.....	70
Figura 30. Arreglo de indicadores visuales para la monitorización de estados operativos.....	70
Figura 31. Módulo de relés implementado.	71
Figura 32. Aspiradora utilizada para el separador ciclónico	71
Figura 33. Diagrama esquemático de conexiones eléctricas y electrónicas del sistema.	72
Figura 34. Diagrama de flujo del algoritmo central de instrumentación y control.....	76
Figura 35. Representación mediante gráfico de cajas de la distribución de a) velocidad de entrada, b) la masa recolectada y c) la eficiencia del prototipo.....	78

Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo diseñar, optimizar, construir y validar numéricamente un separador ciclónico para aplicaciones académicas, destinado a servir como plataforma experimental para la enseñanza y la investigación en mecánica de fluidos y separación gas-sólido. Como punto de partida se adoptó la geometría Stairmand de alta eficiencia, a partir de la cual se desarrolló el modelo tridimensional mediante diseño asistido por computadora y se caracterizó experimentalmente el material particulado empleado en las simulaciones. El análisis fluidodinámico se realizó mediante Dinámica de Fluidos Computacional utilizando ANSYS Fluent 2025 R2, empleando un modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable, el Modelo de Fase Discreta para el seguimiento de partículas y un estudio de independencia de malla que garantizó la confiabilidad de los resultados. Posteriormente, se utilizó un Diseño de Experimentos factorial completo 3^2 y la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) para obtener modelos predictivos de la eficiencia de separación y la caída de presión del separador ciclónico en función de la longitud del buscador de vórtices y el diámetro de la descarga inferior. Estos modelos obtenidos fueron utilizados en funciones objetivo en un proceso de optimización multiobjetivo mediante el algoritmo genético NSGA-II, permitiendo identificar configuraciones geométricas con un equilibrio gran eficiencia y baja pérdida de caída de presión. Finalmente, se construyó e instrumentó un prototipo físico del separador ciclónico, el cual fue sometido a pruebas experimentales para validar las predicciones numéricas realizadas. Los resultados obtenidos demostraron una alta concordancia entre las simulaciones CFD y el comportamiento real, registrándose una eficiencia de separación experimental de 93,53 % frente al 95,22 % predicho numéricamente, con un error relativo de 1,51 %, lo que confirma la validez de la metodología empleada y la utilidad del equipo como herramienta para aplicaciones académicas e investigaciones futuras.

Palabras clave: Optimización Multiobjetivo; Separador Ciclónico; RSM; NSGA-II; Prototipo, CFD.

Abstract

The objective of this study was to design, optimize, construct, and numerically validate a cyclone separator for academic applications, intended to serve as an experimental platform for teaching and research in fluid mechanics and gas-solid separation. The high-efficiency Stairmand geometry was adopted as a starting point, from which the three-dimensional model was developed using computer-aided design. The particulate material used in the simulations was then experimentally characterized. The fluid dynamic analysis was performed using Computational Fluid Dynamics with ANSYS Fluent 2025 R2, employing a realizable $k-\epsilon$ turbulence model, the Discrete Phase Model for particle tracking, and a mesh independence study that ensured the reliability of the results. Subsequently, a 3^2 full factorial Design of Experiments and Response Surface Methodology (RSM) were used to obtain predictive models of the separation efficiency and pressure drop of the cyclone separator as a function of the vortex finder length and the lower discharge diameter. These models were used as objective functions in a multi-objective optimization process using the NSGA-II genetic algorithm, allowing the identification of geometric configurations that balance high efficiency with low pressure drop. Finally, a physical prototype of the cyclone separator was built and instrumented, and subjected to experimental testing to validate the numerical predictions. The results showed a high degree of agreement between the CFD simulations and the actual performance, with an experimental separation efficiency of 93.53% compared to the numerically predicted 95.22%, and a relative error of 1.51%. This confirms the validity of the methodology used and the usefulness of the equipment as a tool for academic applications and future research.

Keywords: Optimización Multiobjetivo; Separador Ciclónico; RSM; NSGA-II; Prototipo, CFD

Capítulo I: Generalidades

1. Antecedentes

El separador ciclónico es un dispositivo cuya función es la de separar partículas sólidas de corrientes de un fluido contaminado y se ha empleado durante mucho tiempo en aplicaciones industriales como la generación de energía, turbinas de gas, procesos químicos, etc. El campo de flujo altamente turbulento dentro de un ciclón es muy complejo, incluyendo las interacciones entre las fases de partículas y fluido. [1]

Estos dispositivos se basan en el principio de la fuerza centrífuga creada por una corriente de fluido giratorio para realizar su separación. La unidad separadora puede consistir en una sola cámara y varias cámaras pequeñas en paralelo o en serie, o en una unidad dinámica similar a un soplador.

Se utilizan para la acumulación de partículas de tamaño mediano y grueso (mayor a 10 μm). Su fabricación es relativamente sencilla, debido a la ausencia de piezas móviles, lo que resulta en la reducción de costos de capital y de mantenimiento a diferencia de otros dispositivos encargados de la separación de partículas. Por sí solos, no cumplen con la separación completa del fluido, pero se utilizan prelimpiadores para otros dispositivos de control más costosos.

Los separadores ciclónicos se utilizan generalmente para eliminar partículas difícilmente eliminan partículas con una eficiencia superior al 90%, a menos que el tamaño de partículas sea de 25 μm o más. Los ciclones de alta eficiencia pueden eliminar partículas de hasta 5 μm . Independientemente del diseño, la eficiencia de eliminación de cualquier ciclón disminuye significativamente a partir de cierto tamaño de partícula. [2]

La creciente demanda industrial y las regulaciones ambientales cada vez más estrictas exigen sistemas de separación gas-sólido más eficientes y sostenibles. La separación de partículas finas no solo es crucial para la recuperación de productos valiosos, como catalizadores en procesos de FCC (método principal en el refinamiento de petróleo para romper

moléculas de hidrocarburos pesados y convertirlas en productos ligeros como gasolina o gas licuado), sino también para el control de emisiones de material particulado que representa un riesgo para la salud pública y el medio ambiente. Además, la aparición de nuevos contaminantes, como los micro plásticos en cuerpos de agua, ha ampliado el campo de aplicación de la tecnología ciclónica a desafíos ambientales emergentes. [3]

La justificación de este trabajo radica en la necesidad de contar con una plataforma experimental y de simulación versátil bien caracterizada para el laboratorio de mecanismos de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. Un equipo de estas características permite:

- **Formación Académica:** Brindar a los estudiantes una herramienta práctica para comprender los complejos fenómenos de la mecánica de fluidos multifásicos, la transferencia de momento y los principios de separación inercial.
- **Investigación Aplicada:** Servir como modelo base para probar y validar nuevas propuestas de diseño, variando parámetros geométricos o añadiendo más elementos como toberas o aletas.
- **Validación de modelos Numéricos:** Generar datos experimentales fiables para validar y refinar modelos de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que son la herramienta principal para el diseño y optimización de estos equipos en la actualidad.

2. Alcance

El presente trabajo abarca el ciclo completo de desarrollo de un separador ciclónico para aplicaciones académicas, desde su concepción teórica hasta su validación. El alcance se define en las siguientes fases:

- **Diseño conceptual y detallado:** El alcance de este trabajo comprende el desarrollo del diseño conceptual y detallado de un separador ciclónico con fines académicos. En esta etapa se establecen dimensiones geométricas iniciales del equipo a partir de criterios de diseño ampliamente utilizados en la literatura, las cuales posteriormente son modelados mediante software de diseño asistido por computadora (CAD). El diseño generado

constituye la base para las simulaciones numéricas, el proceso de optimización y la posterior fabricación del prototipo físico.

- **Definición del material de la partícula a utilizarse:** El trabajo contempla la selección y la caracterización del material particulado empleado en las simulaciones numéricas y en la validación experimental. Para ello se realizó un estudio acerca de las propiedades físicas del material que comprende la determinación de la densidad y el tamaño de partícula de cierto tipo de arena, garantizando con esto que las condiciones de análisis sean representativas del fenómeno de separación evaluado y permitan una comparación consistente entre los resultados numéricos y experimentales.
- **Definición de las condiciones de frontera:** Dentro del alcance se definen las condiciones de fronteras requeridas para las simulaciones CFD, para ello, se consideran las características del flujo de entrada como la de las salidas, el fenómeno que sucede en las partes del ciclón, las propiedades del fluido, la inyección de partículas y la configuración del modelo de turbulencia que se empleará, con el fin de establecer un sistema bajo condiciones controladas.
- **Optimización multiobjetivo:** El presente proyecto se centra en mejorar la geometría del separador ciclónico a través de una evaluación multiobjetivo, tomando en cuenta, criterios fundamentales que buscan cumplir, tales como, el aumento de la eficiencia de separación y la disminución de la caída de presión, a través de este procedimiento es posible hallar un punto de balance entre ambos objetivos, lo que garantiza un diseño viable para la posterior fabricación del prototipo.
- **Construcción y validación del prototipo:** El alcance del estudio concluye con la manufactura y validación experimental del separador ciclónico, de modo que, finalizando las pruebas de funcionamiento, se realiza una comparativa entre los resultados físicos frente a los datos simulados numéricamente, con el fin de validar el rendimiento del prototipo propuesto y las simulaciones CFD.

3. Objetivos.

Objetivo general

- Diseñar, optimizar, construir y validar numéricamente un separador ciclónico para aplicaciones académicas.

Objetivos específicos

- Revisar la literatura sobre fundamentos teóricos de separación ciclónica, tipos de modelo geométrico de ciclón.
- Diseñar un modelo CAD referencial en base a las relaciones geométricas establecidas que sirva como base para las simulaciones y posteriores etapas del trabajo.
- Realizar una optimización multiobjetivo utilizando herramientas como diseño de experimentos (DOE), metodología de superficie de respuesta (RSM) y algoritmo NSGA-II con el fin de obtener una mejora de eficiencia de separación con un menor costo computacional.
- Construir un prototipo físico con la geometría final optimizada, instrumentación del mismo y pruebas de funcionamiento.
- Comparar los datos experimentales obtenidos de los resultados numéricos simulados, con el prototipo físico para su posterior validación.

Capítulo II: Estado del arte

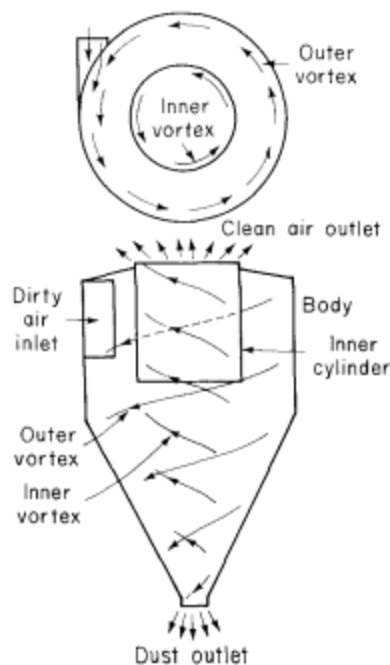
1. Fundamentos teóricos de los separadores ciclónicos

El principio fundamental de un separador ciclónico se basa en la transformación de la velocidad de entrada del flujo en un vórtice giratorio confinado. La mezcla de gas y partículas que ingresan tangencialmente al cuerpo cilíndrico del ciclón, lo que genera un fuerte flujo en espiral descendente a lo largo de la pared exterior, conocido como el vórtice externo. Este movimiento crea una intensa fuerza centrífuga, mayor que la gravedad, puesto que empuja a las partículas de mayor densidad hacia la pared.

Asimismo, las partículas se deslizan por las paredes hasta la tolva de almacenamiento que se encuentra en la parte inferior del ciclón, el flujo del fluido limpio se invierte para formar un núcleo interno más pequeño que sale por la parte superior del dispositivo. Además, posee un tubo buscador de vórtices, el cual se extiende hacia abajo dentro del cilindro que ayuda a dirigir el vórtice interno fuera del dispositivo.

Este tipo de ciclón se utiliza a menudo como prefiltros para eliminar partículas grandes. Esta unidad opera con baja caída de presión y puede manejar grandes caudales volumétricos. [4]

Figura 1. Representación de un separador ciclónico



Fuente: (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953414001172>)

2. Clasificación y principios de operación

Los separadores ciclónicos pueden clasificarse según diversos criterios, según su geometría, dirección del flujo de fase y el ámbito de aplicación. Una comprensión clara de estas

clasificaciones orienta la elección del diseño adecuado para cada tarea de separación. A continuación, se presentan algunas clasificaciones típicas.

Por su dirección de flujo:

- Ciclones de coflujo o flujo directo, en los que los flujos de entrada y salida discurren en la misma dirección general, es uno de los menos comunes utilizados.
- Ciclones de flujo inverso (contraflujo), en los que el fluido cargado de partículas entra tangencialmente, desciende en espiral, luego asciende invertidamente a través del vórtice central y sale del ciclón por la salida superior. Esta configuración es ampliamente utilizada debido a su eficaz rendimiento de separación.

Por la geometría y diseño estructural:

- Ciclones de una sola cámara, es decir que posee una sola sección cilíndrica y cónica, versus multiciclones los cuales poseen pequeños ciclones en paralelo que ofrecen mayor rendimiento

3. Simulación numérica (CFD) aplicada a ciclones

La Dinámica de Fluidos computacional (CFD) se ha demostrado en comparación con los procedimientos experimentales, ser una herramienta diable cuando se utiliza con una selección adecuada de modelos de turbulencia [5], asimismo, es una herramienta fundamental en el diseño y la optimización de separadores ciclónicos gracias a su capacidad para describir el complejo flujo multifásico y turbulento dentro de estos dispositivos. El campo de flujo interno de un ciclón incluye un fuerte movimiento en forma de remolino, puesto que, la ruptura de vórtices y las interacciones entre partículas y fluidos, se hacen difíciles de visualizar o medir experimentalmente, a razón de ello, el CFD permite tener un mejor enfoque numérico de las partículas, ofreciendo información para mejorar la eficiencia de separación.

Al aplicar las ecuaciones de Navier-Stokes para flujo incomprensible, las cuales, combinadas con modelos de turbulencia y seguimiento de partículas, permite que la simulación

CFD del comportamiento del flujo gas-sólido sean en condiciones controladas. Este enfoque reduce los costos experimentales del prototipo.

Ecuaciones gobernantes y enfoque de modelado

Debido al tipo de flujo en el ciclón, es necesario utilizar un modelo de turbulencia para el desarrollo de las simulaciones. En el mundo real, la mayoría de los flujos de ingeniería son de tipo turbulento y esto esencialmente es un proceso aleatorio caracterizado por fluctuaciones en las magnitudes transportadas, como la velocidad del flujo, la presión, la temperatura, etc. [6]. Estas fluctuaciones pueden representarse descomponiendo la velocidad instantánea en una media y una componente fluctuante:

$$\vec{u} = \bar{u} + u'$$

Donde $\bar{u}$ es la velocidad media y u' es la velocidad fluctuante

Para modelar este comportamiento turbulento, se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS). Estas ecuaciones describen el movimiento promediado en el tiempo del fluido e incluyen términos adicionales que representan los efectos de la turbulencia. Las ecuaciones RANS para la velocidad media se expresa como:

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j}$$

Donde R_{ij} representa el tensor de tensión de Reynolds, que debe modelarse mediante un modelo de turbulencia adecuado. Entre estos el Modelo de Tensión de Reynolds (RSM) puede utilizarse para simulaciones de alta precisión, ya que resuelve directamente las ecuaciones de transporte para cada componente de tensión de Reynolds, aunque con un mayor coste computacional [7]

Modelos de turbulencia

Debido a la fuerte naturaleza rotacional y anisotrópica del flujo dentro de los ciclones, la selección de un modelo de turbulencia adecuado es crucial, existiendo modelos como:

- Modelo estándar $k-\epsilon$: Es el más utilizado por su robustez y eficiencia computacional, aunque tiende a sobreestimar el núcleo del vórtice y a subestimar la velocidad tangencial cerca de la pared.
- Modelo RNG $k-\epsilon$: Este modelo incorpora un parámetro adicional en la ecuación de la tasa de disipación para una mejor representación de los flujos arremolinados y la turbulencia a pequeña escala.
- Modelo realizable $k-\epsilon$: Modelo que permite mejorar la predicción de las regiones de separación y recirculación.
- Modelo $k-\omega$: SST: Proporciona una mejor resolución cerca de la pared y es adecuado para flujos con fuertes gradientes presión adversos.
- Modelo de Esfuerzos De Reynolds (MSR): Resuelve directamente las ecuaciones de transporte para los esfuerzos de Reynolds, lo que lo convierte en el modelo más preciso para flujos ciclónicos, pero también el más costoso computacionalmente.

En este trabajo en particular se seleccionó el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable, debido a su reconocida robustez numérica y a su capacidad para presentar flujos rotacionales, separaciones de flujo y gradientes de presión adversos presentes en separadores ciclónicos [8].

El modelo $k-\epsilon$ realizable resuelve dos ecuaciones de transporte: una para la energía cinética turbulenta k y otra para su tasa de disipación ϵ , permitiendo estimar la viscosidad turbulenta y cerrar el sistema de ecuaciones RANS. Diversos estudios han reportado que este modelo proporciona predicciones satisfactorias de la caída de presión y de los patrones

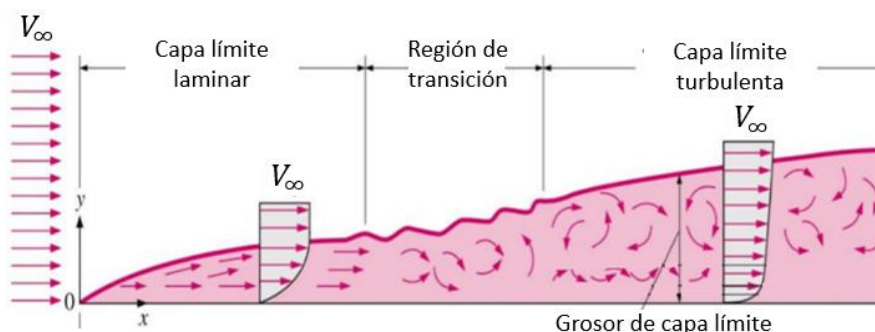
generales de flujo en ciclones, manteniendo un costo computacional significativamente menor que modelos más complejos como el Modelo de Esfuerzos de Reynolds (RSM) [9], [10].

Aunque el modelo RSM suele ofrecer una descripción más detallada de la anisotropía de la turbulencia en flujos altamente rotacionales, su elevado costo computacional limita su aplicación en estudios de optimización que requieren un gran número de simulaciones. Considerando que en este trabajo involucró múltiples evaluaciones CFD dentro de un esquema DOE-RSM-NSGA-II, el modelo $k-\epsilon$ realizable representó una alternativa adecuada al proporcionar un equilibrio favorable entre precisión numérica y eficiencia computacional [11], [12]

Capa límite

La capa límite es la delgada región de fluido cercana a la superficie de un objeto donde la viscosidad es significativa y eleva el arrastre [13]. En esta zona, la velocidad pasa de cero en el contacto directo hasta aproximadamente el 99% de la corriente libre, evolucionando según la distancia y la velocidad a través de tres regímenes: el laminar, donde el flujo es ordenado, pero se desprende fácilmente; el de transición, donde se generan pequeñas turbulencias; y el turbulento, que es el mas grueso, caótico y tiene mayor adherencia a superficies curvas antes de separarse.

Figura 2. Secciones de la capa límite



Fuente: (<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>)

En el presente trabajo, el enfoque principal reside en el comportamiento fluido dinámico y la trayectoria de las partículas dentro del volumen central del fluido, donde la resolución microscópica de la subcapa viscosa, región donde se manifiesta la capa límite adyacente a la pared, no representa una variable crítica para el diseño. Por lo tanto, se optó por implementar funciones de pared (wall functions), lo cual permite modelar adecuadamente la influencia de los límites sólidos sin incurrir en los costos computacionales excesivos de una malla extremadamente densa. Bajo este criterio, se seleccionó el modelo de turbulencia épsilon realizable como la opción más robusta. A diferencia de las versiones estándar, esta variante incorpora una formulación matemática optimizada que mejora significativamente la predicción de flujos caracterizados por vórtices intensos, una fuerte rotación (swirl) y líneas de corriente con curvatura pronunciada, fenómenos físicos predominantes que dictan el rendimiento operativo de un separador ciclónico.

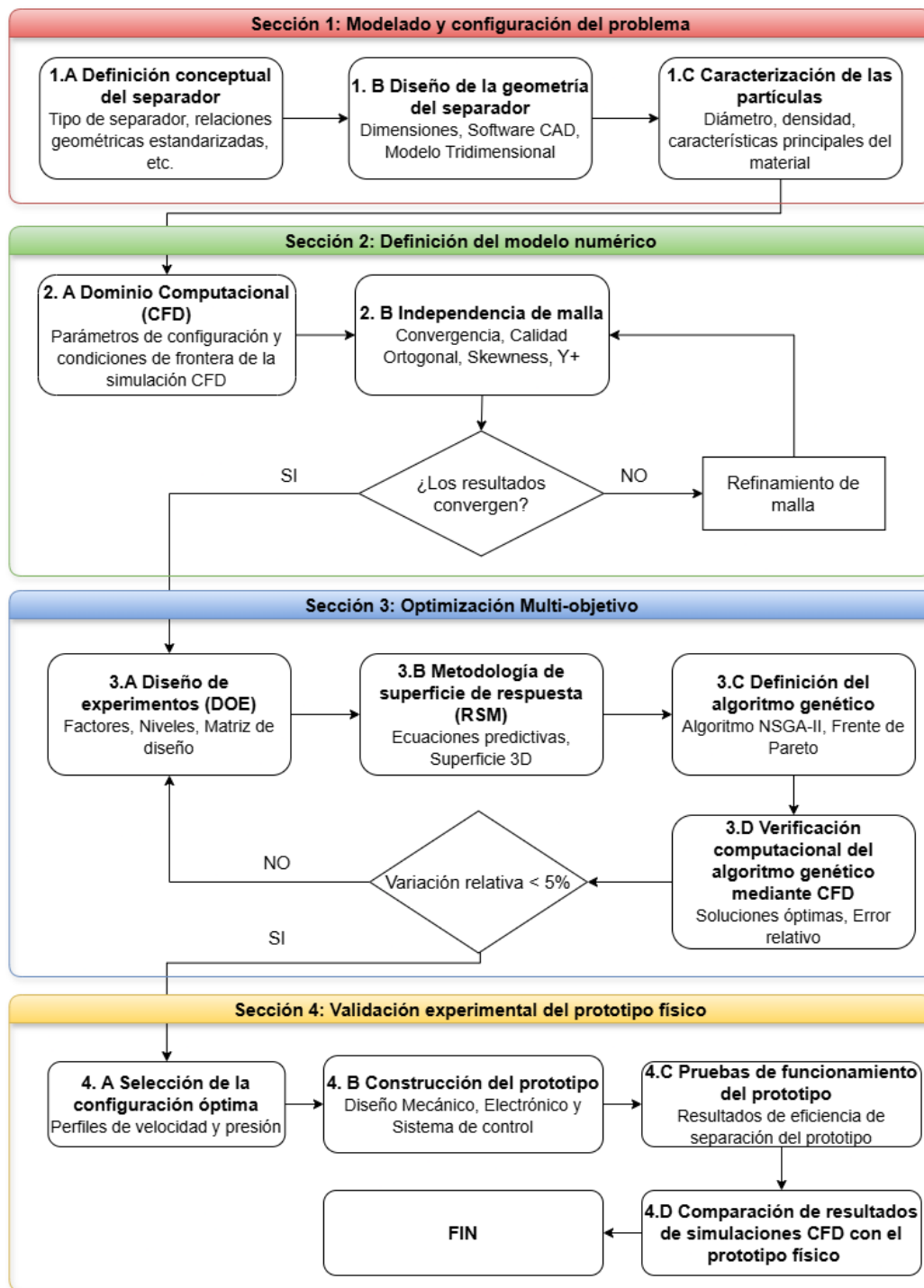
Capítulo III

Metodología

El presente trabajo investigativo se fundamenta en un enfoque computacional estructurado, con el propósito de optimizar el rendimiento de un separador ciclónico. Para lograr este objetivo, el estudio implementa herramientas como: CFD, Diseño de Experimentos (DOE), Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) y optimización multiobjetivo.

La estructura metodológica se encuentra esquematizada en la **Figura 3**, la cual permite evaluar de forma sistemática la influencia que ejercen parámetros geométricos clave como la longitud del buscador de vórtice (L_v) y el diámetro de la salida de partículas (D_u) sobre la eficiencia de separación y la caída de presión del separador. Asimismo, para garantizar la fiabilidad del modelo propuesto, la investigación incorpora una fase de validación experimental mediante ensayos en un prototipo físico, un paso fundamental para contrastar los datos teóricos y certificar la estricta concordancia entre los resultados numéricos y el comportamiento empírico del sistema.

Figura 3. Diagrama metodológico utilizado en este trabajo.



Fuente: Autoría propia

1. Modelado y configuración del problema

A. Definición conceptual del separador ciclónico

El diseño conceptual constituye la primera etapa del desarrollo metodológico del presente trabajo, ya que define la geometría base sobre la cual serán desarrolladas las etapas posteriores en cuanto a simulación numérica, optimización multiobjetivo y su respectiva validación experimental. La configuración de un separador ciclónico influye directamente sobre la estructura de flujo interno, la intensidad del vórtice, la distribución de presiones y la trayectoria de las partículas, parámetros que determinan el desempeño del equipo en términos de eficiencia de separación y caída de presión. Diversos diseños de separadores ciclónicos han sido propuestos para aplicaciones industriales específicas; sin embargo, el ciclón Stairmand de alta eficiencia es una de las geometrías de referencia más empleadas tanto en investigaciones experimentales como en estudios de dinámica de fluidos computacional (CFD). Su amplia aceptación se debe a que presenta un adecuado equilibrio entre eficiencia de separación, pérdidas de energía y facilidad de fabricación, además de contar con relaciones geométricas estandarizadas que facilitan la comparación de resultados entre diferentes investigaciones [14].

Una característica relevante del diseño Stairmand es que todas las dimensiones principales se expresan mediante relaciones adimensionales respecto al diámetro del cuerpo del ciclón (D_c). Este enfoque permite mantener una similitud geométrica al modificar la escala del equipo, garantizando que el comportamiento fluido-dinámico conserve las características fundamentales del diseño original. Gracias a ello, la geometría puede adaptarse a diferentes capacidades de operación sin alterar las proporciones responsables de la formación del doble vórtice característico de flujo ciclónico. [14].

En el presente trabajo se adoptó la geometría Stairmand de alta eficiencia como modelo de referencia debido a que constituye una configuración ampliamente validada en la literatura y proporciona una base confiable para evaluar posteriormente el efecto de modificaciones geométricas mediante técnicas de optimización. De esta manera, cualquier mejora obtenida

durante el proceso de optimización podrá compararse objetivamente con un diseño reconocido internacionalmente.

Tomando como parámetro principal del diámetro del ciclón (D_c), se establecieron las dimensiones del resto de los componentes utilizando las relaciones geométricas propuestas para el ciclón Stairmand de alta eficiencia, dichas relaciones se presentan en la **Tabla 1**. Relaciones geométricas del ciclón Stairmand, donde se incluyen las proporciones correspondientes a la entrada tangencial, el detector de vórtices, la sección cilíndrica, la sección cónica y la descarga inferior de partículas.

Tabla 1. Relaciones geométricas del ciclón Stairmand

Dimensión	Nomenclatura	Ciclón Stairmand
Diámetro del ciclón	D_c/D_c	1.0
Altura de la entrada	a/D_c	0.5
Ancho de la entrada	b/D_c	0.2
Altura de la salida	L_v/D_c	0.5
Diámetro de la salida	D_v/D_c	0.5
Altura parte cilíndrica	L_c/D_c	1.5
Altura parte cónica	z/D_c	2.5
Altura total del ciclón	H/D_c	4.0
Diámetro salida de partículas	D_u/D_c	0.375

Las relaciones mostradas en la **Tabla 1**. Relaciones geométricas del ciclón Stairmand permitieron definir el modelo geométrico inicial utilizado durante este trabajo. Cabe recalcar que las dimensiones de la geometría no corresponden al diseño final del separador, puesto que, representa la configuración inicial a partir de la cual se desarrolló el proceso de simulación CFD y optimización. De esta manera, este modelo constituye el punto de partida para analizar la influencia de diferentes parámetros geométricos sobre la eficiencia de separación y la caída de presión.

Además, establecer un modelo inicial normalizado permite que las modificaciones introducidas durante la etapa de optimización puedan analizarse de forma independiente, facilitando la identificación de las variables geométricas con mayor impacto del separador. De esta manera, la optimización desarrollada posteriormente se fundamenta en una geometría ampliamente aceptada por la comunidad científica, garantizando que las mejoras obtenidas puedan compararse objetivamente con los resultados reportados en investigaciones previas.

B. Diseño de la geometría del separador ciclónico

En base a estas relaciones adimensionales se seleccionó un diámetro del cuerpo del ciclón de 150 mm, dimensión que permitió construir un prototipo de laboratorio compatible con las capacidades de un banco experimental y con las restricciones computacionales asociadas a la versión estudiantil del software ANSYS Fluent 2025 R2. A partir de este diámetro se calcularon el resto de las dimensiones de los componentes del separador, las cuales se presentan en la **Tabla 2**. Dimensiones del modelo geométrico inicial.

Tabla 2. Dimensiones del modelo geométrico inicial

Parámetro	Símbolo	Valor (mm)
Diámetro del cuerpo	Dc	150
Altura del tubo de entrada	a	75
Ancho del tubo de entrada	b	30
Longitud del detector de vórtices	Lv	75
Diámetro del detector de vórtices	Dv	75
Longitud de la parte cilíndrica	Lc	225
Longitud del cono	z	375
Altura total del ciclón	H	600
Diámetro de la espiga	Du	56

La geometría inicial obtenida constituye un modelo de referencia cuya finalidad es proporcionar una base confiable para el análisis numérico posterior. En consecuencia, no se

considera un diseño definitivo, sino una configuración inicial sobre la cual se evaluará la influencia de diferentes parámetros geométricos en el comportamiento del flujo interno, la eficiencia de separación y la caída de presión.

Una vez definidas las dimensiones del ciclón Stairmand de alta eficiencia, se procedió al desarrollo del modelo tridimensional mediante técnicas de diseño asistido por computadora (CAD). Esta etapa tuvo como propósito obtener una representación geométrica precisa del separador ciclónico, garantizando que todas las dimensiones establecidas durante el diseño conceptual fueran reproducidas con exactitud antes de iniciar las simulaciones numéricas y la fabricación del prototipo experimental.

Para el desarrollo del modelo se utilizó el software Autodesk Inventor, por sus capacidades para modelado paramétrico de componentes mecánicos y por su facilidad para la utilización de herramientas de análisis CFD. Cabe recalcar que, al realizar un modelado paramétrico permitió modificar de manera sencilla las dimensiones geométricas durante las etapas posteriores de optimización, facilitando el diseño de nuevas configuraciones sin necesidad de reconstruir completamente el modelo.

Se partió con la construcción individual de cada uno de los elementos que conforman el separador ciclónico, incluyendo la entrada tangencial, el cuerpo cilíndrico, la sección cónica, el buscador de vórtices y la descarga inferior de partículas, esto se desarrolló respetando las relaciones geométricas definidas en la sección anterior, garantizando la continuidad de las superficies internas y la correcta correspondencia entre las dimensiones nominales del diseño.

Posteriormente, los componentes fueron integrados mediante un proceso de ensamblaje, obteniéndose el modelo tridimensional completo del separador ciclónico. Durante esta etapa se verificó la correcta y la continuidad del volumen interno por donde circula el fluido. Estas verificaciones son fundamentales, ya que pequeñas discontinuidades o solapamientos pueden afectar la generación de la malla computacional y producir errores durante la solución numérica del flujo.

Figura 4. Modelo tridimensional del separador ciclónico desarrollado en Autodesk Inventor



Fuente: Autoría propia

Una vez finalizado el modelo CAD, se realizó una revisión dimensional para comprobar que todas las medidas coincidan con los valores obtenidos a partir de las relaciones geométricas del ciclón Stairmand. Con esto nos aseguramos que el modelo utilizado en CFD representará fielmente la geometría de diseño y que el prototipo fabricado posteriormente mantenga las mismas características dimensionales.

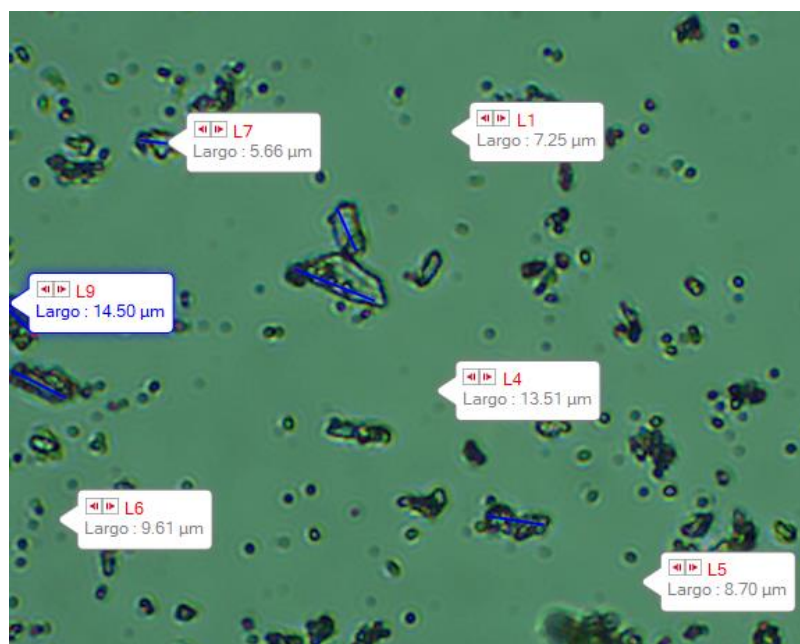
El modelo tridimensional obtenido constituyó la base para las siguientes etapas del trabajo. En primera instancia, se empleó el modelo para generar el dominio computacional utilizado en las simulaciones mediante ANSYS. Luego, el modelo presentó la flexibilidad necesaria para incorporar las modificaciones geométricas propuestas durante el proceso de optimización multiobjetivo, por lo que, permitió actualizar de forma eficiente las dimensiones de los parámetros de diseño evaluados mediante DOE y el algoritmo NSG-II, manteniendo la consistencia entre el modelo geométrico, las simulaciones CFD y la fabricación del prototipo optimizado.

C. Caracterización de las partículas

En este trabajo se utilizan partículas de arena las cuales caracterizamos para establecer como parámetro fijo dentro del CFD. El tipo de partícula que utiliza es un tipo de arena que se compone de partículas de diferentes tamaños, para lo cual se necesitó un paso previo de tamizado de la muestra, con el fin de determinar la distribución del tamaño de partículas (granulometría) y la forma de la misma, lo que garantiza la calidad, homogeneidad y el comportamiento físico adecuado.

Posterior al tamizado de la muestra se procede con el estudio de granulometría mediante el uso de un microscopio óptico vertical de grado profesional Motic Ba310 el cual procesa las imágenes de las partículas mediante el software propio de la marca. En el que se observó que la partícula tiene forma irregular, por lo cual se hizo una aproximación redonda para efectos del estudio con el fin de determinar la medida del diámetro. En la **Figura 5**. Caracterización de partículas Se observa la imagen de las partículas de arena de la muestra tomada. Una vez efectuadas las mediciones, se tabularon los resultados en la **Tabla 3** de las cuales se tomó un promedio para utilizar dentro de las configuraciones para las simulaciones en ANSYS.

Figura 5. Caracterización de partículas



Fuente: Autoría propia

Tabla 3. Resultados de las medidas del diámetro de partículas.

	Tamaño de partículas muestra 1 (μm)	Tamaño de partículas muestra 2 (μm)
	12.04	14.32
	5.66	9.63
	7.25	10.30
	14.5	5.21
	9.61	7.02
Promedio	13.57	5.57
	10.27	11.7
	8.7	12.5
	4.41	8.19
	9.56	9.38
	9.56	9.38
Promedio Final	9.47	

Además, se determinó la densidad de la partícula de manera calculada en base al peso de la arena que ocupa dentro de un recipiente rectangular de volumen conocido con medidas de 88.5 mm (ancho), 88.5 mm (largo y 65 mm (profundidad). A partir de la ecuación que relaciona la masa con el volumen se obtiene la densidad.

$$\rho = \frac{m}{v}$$

Se realizaron cuatro pruebas iguales para obtener un valor promedio de densidad el cual se utilizará en el CFD.

Tabla 4. Resultados de la densidad de la partícula

	Masa (kg)	Volumen (m^3)	Densidad (Kg/m^3)
Prueba 1	0.413	5.09×10^{-4}	813.01
Prueba 2	0.426	5.09×10^{-4}	836.77
Prueba 3	0.414	5.09×10^{-4}	813.21
Prueba 4	0.420	5.09×10^{-4}	824.99
Promedio			821.99

2. Definición del modelo numérico

A. Dominio computacional (CFD)

La representación adecuada del dominio computacional constituye una etapa fundamental en cualquier estudio de dinámica de fluidos computacional (CFD), ya que define el espacio físico sobre el cual se resolverán numéricamente las ecuaciones que describen el comportamiento de flujo. La calidad de esta representación influye directamente en la precisión de los resultados, debido a que la geometría determina la trayectoria del fluido, la formación de

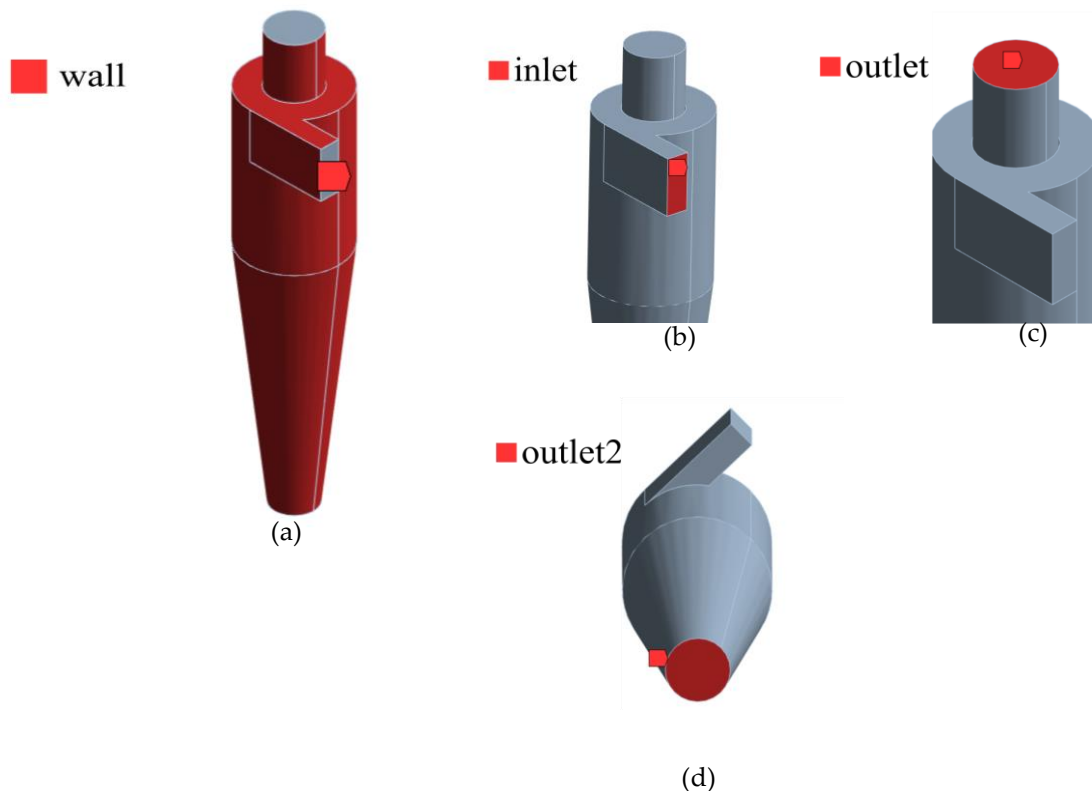
estructuras en forma de vértice y la interacción entre la fase continua y la fase discreta durante el proceso de separación de partículas.

El dominio considerado para la simulación corresponde exclusivamente al volumen interno ocupado por el fluido, ya que este representa la región donde ocurren los fenómenos físicos de interés, tales como la aceleración del flujo, la generación del doble vórtice, la distribución de presiones y el movimiento del ciclón no fue incluido dentro del dominio computacional, puesto que su influencia sobre el comportamiento fluido-dinámico interno resulta despreciable para los objetivos del presente trabajo.

La utilización del volumen interno como dominio de cálculo permite reducir el costo computacional sin comprometer la representación física del fenómeno analizado. Esta simplificación es ampliamente empleada en simulaciones CFD de separadores ciclónicos, dado que el interés principal radica en caracterizar el comportamiento del flujo y evaluar el desempeño del equipo mediante variables como la caída de presión y la eficiencia de separación.

Luego de importar la geometría al entorno de simulación, se llevó a cabo un acondicionamiento del modelo para verificar la integridad del dominio, dado que, se evaluó que el espacio interno no tuviera interrupciones y que partes importantes como la entrada tangencial, las zonas cilíndrica y cónica, el buscador de vórtices y la descarga de partículas encajaran correctamente, asimismo, se limpió el diseño descartando superficies repetidas o aristas abiertas, con el fin de evitar errores al generar la malla y garantizar que la resolución numérica sea correcta.

Figura 6. Regiones de dominio. (a) Paredes, (b) Entrada, (c) Salida 1, (d) Salida 2.



Fuente: Autoría propia

Las condiciones de frontera asignadas al modelo se muestran en la **Figura 6**. Regiones de dominio. (a) Paredes, (b) Entrada, (c) Salida 1, (d) Salida 2. La superficie inlet se definió como una entrada de velocidad (Velocity Inlet) con una magnitud de 14 m/s y una intensidad de turbulencia calculada del 5 %, mientras que outlet1 y outlet2 se configuran como salidas de presión (Pressure Outlet) a presión atmosférica.

Para el seguimiento de partículas mediante el Modelo de Fase Discreta (DPM), estableció una condición de escape (escape) en outlet1, representando las partículas que abandonan el ciclón junto con el flujo de aire, y una condición de captura (Trap) en outlet2, simulando su recolección. Todas las superficies clasificadas como wall fueron definidas bajo una condición de no deslizamiento (No-Slip Wall), ampliamente utilizada en simulaciones de ciclones para representar los efectos viscosos y la formación de la capa límite [11], [15]. La interacción partícula-pared se modeló mediante una condición de reflexión (Reflect) para

considerar el rebote de partículas sobre las superficies internas. La fase discreta se resolvió mediante un enfoque lagrangiano, inyectando partículas desde inlet con una distribución Rosin-Rammler. Esta distribución fue seleccionada por su capacidad para representar adecuadamente distribuciones granulométricas típicas del material [16], [17], [18].

Debido a que la entrada en el separador ciclónico es un rectángulo tenemos lo siguiente para el diámetro hidráulico:

$$Dh = \frac{2 * a * b}{a + b}$$

Teniendo en cuenta que los valores de la entrada de nuestro separador son $a=0.075\text{m}$ y $b=0.030\text{m}$ tenemos:

$$Dh = \frac{2 \times 0.075 \times 0.030}{0.075 + 0.030} = 0.049 \text{ m}$$

Para calcular el porcentaje de intensidad de turbulencia se tienen los siguientes cálculos:

Para flujos internos (conductos, entradas de ciclones), la correlación estándar es:

$$I = 0.16 Re^{-1/8}$$

Para esto debemos calcular el número de Reynolds en base al diámetro hidráulico que tenemos. $Dh = 0.0429 \text{ m}$.

$$Re = \frac{\rho U Dh}{\mu}$$

Suponiendo entrada de aire a 25°C :

- $\rho = 1.184 \text{ kg/m}^3$
- $\mu = 1.85 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
- $v = 15 \text{ m/s}$

$$Re = \frac{1.184 * 15 * 0.0429}{1.85 \times 10^{-5}}$$

$$Re = 4.1 \times 10^4$$

Intensidad de turbulencia en porcentaje

$$I = 0.16 \times (4.1 \times 10^4)^{-1/8}$$

$$I = 0.16 \times 0.272 = 0.0424 * 100\%$$

$$I = 4.2 \%$$

En base a todos los cálculos realizados y los criterios establecidos para los flujos dentro del ciclón se tiene en la **Tabla 5**. Condiciones de frontera y configuración un resumen de las condiciones de frontera y las configuraciones utilizadas dentro del software de simulación para todas las simulaciones realizadas durante todo este trabajo.

Tabla 5. Condiciones de frontera y configuración

Tipo	Propiedad	Valor
General	Tipo de solucionador	Pressure-Based
	Tiempo	Steady
	Gravedad	9.81 m/s^2
Residuales	Criterio de convergencia	10^{-4}
Aire	Densidad	1.225 kg/m^3
	Viscosidad	$1.79 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
Modelo	Viscoso	$K - \varepsilon$ realizable

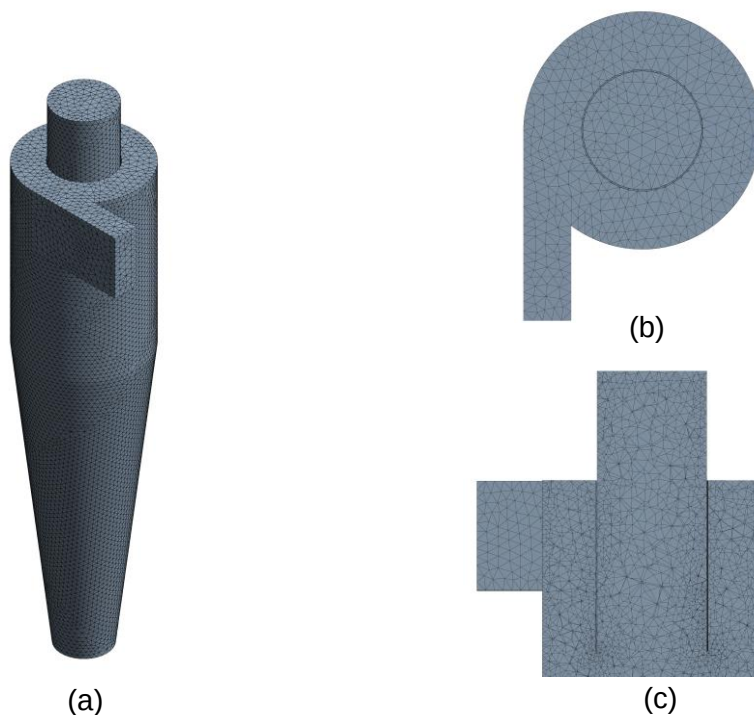
	Fase discreta	On
Partícula	Diámetro min	5 μm
	Diámetro Max	14 μm
	Diámetro medio	9.5 μm
	Densidad	822 kg/m^3
	Distribución de diámetros	Rosin-Rammler
Condiciones de frontera de entrada	Velocidad de entrada	14 m/s
	Intensidad de turbulencia	5%
	Diámetro hidráulico	0.043 m
	DPM Type	Reflect
Condiciones de frontera de salida 1	Intensidad turbulenta del reflujo	5%
	Diámetro hidráulico del reflujo	0.075 m
	DPM Type	Escape
Condiciones de frontera de salida 2	Intensidad turbulenta del reflujo	5%
	Diámetro hidráulico del reflujo	0.065 m
	DPM Type	Trap

B. Independencia de la malla

Con el fin de evaluar la influencia de la discretización espacial sobre los resultados, se desarrolló un estudio de independencia de malla utilizando diferentes niveles de refinamiento. Para cada configuración se calcularon las variables de respuesta empleadas durante la investigación, particularmente la caída de presión y la eficiencia de separación, debido a que constituyen los indicadores principales del desempeño del separador ciclónico. En la **Figura 7**. Malla tetraédrica utilizada en las simulaciones, (a) vista isométrica, (b) vista superior, (c) vista en corte transversal se presenta el resultado de la malla utilizada para la obtención de

resultados de la simulación CFD, como se observa en la imagen se aprecia un tipo de malla tetraédrica.

Figura 7. Malla tetraédrica utilizada en las simulaciones, (a) vista isométrica, (b) vista superior, (c) vista en corte transversal



Fuente: Autoría propia

La comparación entre las diferentes configuraciones permitió identificar el punto a partir del cual el incremento en el número de elementos producía variaciones despreciables en las variables de interés. En consecuencia, se seleccionó la malla que ofrecía el mejor compromiso entre precisión y costo computacional, evitando tanto el uso de mallas excesivamente gruesas, que pueden introducir errores de discretización, como de mallas innecesariamente finas, cuyo incremento en el tiempo de cálculo no representa mejoras significativas en la solución numérica. Los resultados presentados en la **Tabla 6**. Resultados de caída de presión y variación relativa según el tamaño de elementos., evidencian que la solución alcanza la independencia aproximadamente 500000 elementos. A partir de este nivel de refinamiento, las

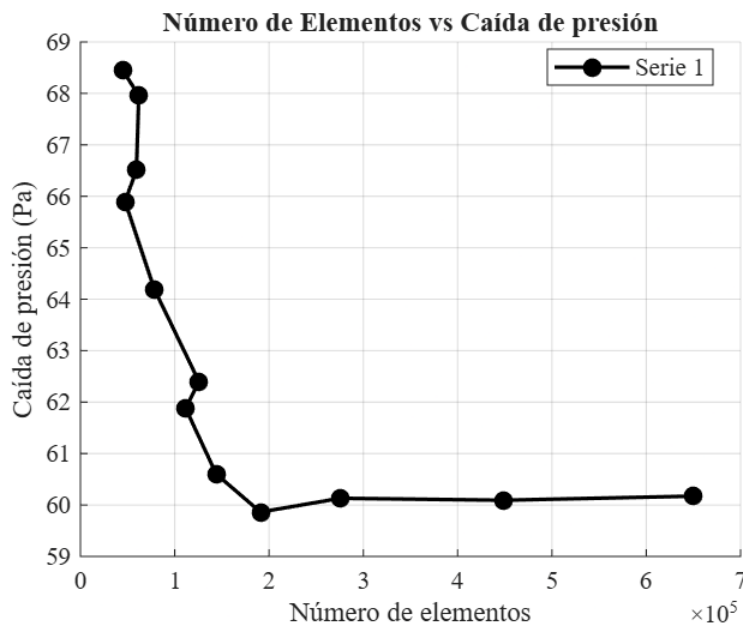
variaciones en la caída de presión fueron despreciables, por lo que esta configuración fue seleccionada para las simulaciones posteriores.

Tabla 6. Resultados de caída de presión y variación relativa según el tamaño de elementos.

Tamaño de la malla (mm)	Número de elementos	Caída de presión (Pa)	Variación relativa (%)
14	45015	68.44	--
13	61901	67.96	0.70
12	59390	66.51	2.13
11	47392	65.90	0.92
10	78566	64.19	2.60
9	125764	62.40	2.79
8	111529	61.88	0.83
7	144006	60.60	2.07
6	190928	59.86	1.22
5	275475	60.13	0.45
4	449050	60.09	0.06

En el gráfico se representan los datos de la tabla anterior y como se puede observar la caída de presión se estabiliza a partir de aproximadamente 200 mil elementos, entonces con este resultado podemos garantizar que los datos que se calculan con una malla con este número de elementos o mayor, tendrán resultados acordes con la realidad.

Figura 8. Gráfica de caída de presión vs el número de elementos.



Fuente: Autoría propia

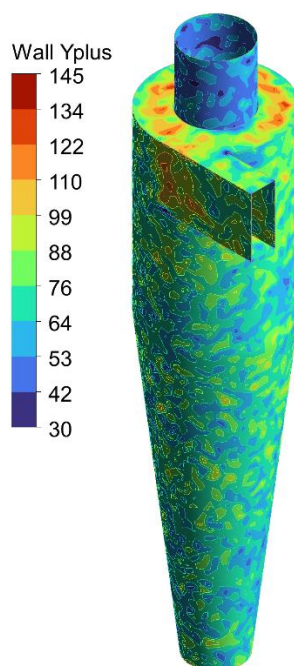
Finalmente, luego de haber realizado todo el estudio de independencia de malla, se escogió un tamaño de elementos de 4 mm, lo que corresponde a un total de 449050 elementos tetraédricos. Priorizando el tiempo y costo computacional sobre el número de elementos máximos que se puede utilizar debido a la licencia estudiantil de ANSYS.

Tras validar el modelo mediante el análisis de independencia, la estructura tetraédrica inicial fue convertida a una geometría poliédrica con el propósito de optimizar los recursos computacionales y minimizar los tiempos de procesamiento. Como resultado de esta transformación, la malla alcanzó una calidad ortogonal promedio de 0.73 y registró un valor medio de asimetría (skewness) de 0.26. La combinación de estos indicadores métricos corrobora que la malla definitiva cuenta con la estabilidad geométrica indispensable para asegurar una correcta convergencia en las simulaciones CFD.

Con el fin de verificar la adecuada resolución de la región cercana a las paredes, se evaluó la distribución del parámetro adimensional Y^+ sobre la superficie interna del ciclón, dichos valores dieron como resultado entre 30 y 144.63, indicando que la malla permite una representación adecuada para el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ realizable empleado en este

estudio. Dichos valores se mantienen dentro de los parámetros sugeridos para trabajar con funciones de pared, lo cual resulta ideal, puesto que nos permite registrar de forma correcta tanto los esfuerzos de corte como los fenómenos viscosos junto a las superficies sólidas, manteniendo a la vez el costo computacional en niveles bajos [19], [20]. En consecuencia, la discretización utilizada se consideró adecuada para la predicción de los patrones de flujo, la caída de presión y la eficiencia de separación del ciclón.

Figura 9. Contorno de Y^+



Fuente: Autoría propia

Los valores obtenidos de Y^+ fueron verificados para asegurar su compatibilidad con el tratamiento de pared utilizado durante las simulaciones, permitiendo representar adecuadamente los fenómenos de transferencia de cantidad de movimiento próximos a las superficies internas del ciclón. Esta evaluación resulta especialmente importante debido a que

la distribución de esfuerzos cortantes sobre las paredes influye directamente en la predicción de la caída de presión y en la estructura del flujo rotacional desarrollada dentro del separador.

La malla finalmente seleccionada fue utilizada en todas las simulaciones correspondientes al diseño de experimentos, al proceso de optimización multiobjetivo y a la validación numérica, garantizando que las diferencias observadas entre los distintos casos analizados respondieran exclusivamente a las modificaciones geométricas evaluadas y no a variaciones en la discretización espacial del dominio.

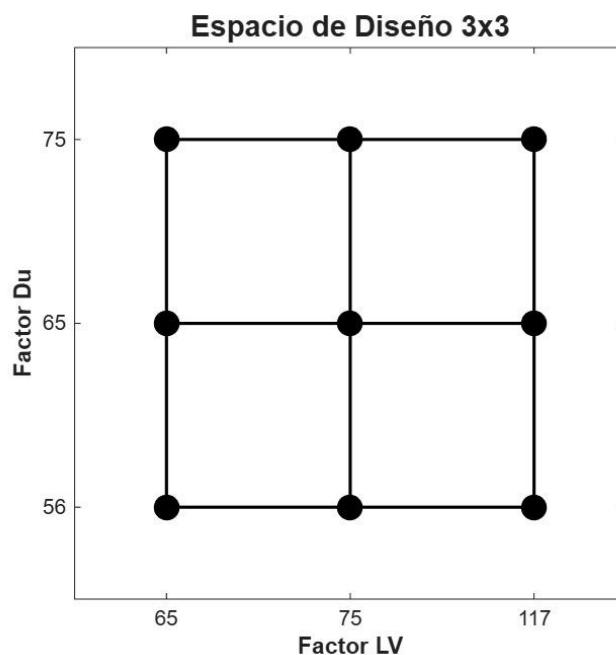
3. Optimización multiobjetivo

A. Diseño de experimentos (DOE)

Para la recopilación de datos numéricos y el análisis de la influencia de las variables geométricas sobre el desempeño del ciclón, se implementó un Diseño de Experimentos (DOE) factorial completo de 3^2 . Este enfoque permite evaluar simultáneamente los efectos principales y las posibles interacciones entre los factores de diseño, proporcionando una representación sistemática y estadística robusta del espacio experimental [21]. Se seleccionaron como variables de diseño la longitud del buscador de vórtices L_v y el diámetro de la salida inferior D_u , debido a su influencia reportada sobre la caída de presión y la eficiencia de separación en ciclones. [15], [18]. Para cada variable se definieron tres niveles equidistantes dentro de los rangos establecidos, generando un total de nueve configuraciones geométricas independientes. La estructura ortogonal del diseño factorial garantiza una cobertura uniforme del espacio de diseño y minimizando la correlación entre los factores evaluados, permitiendo cuantificar de manera confiable sus efectos sobre las respuestas de interés [21], [22].

La distribución de los puntos experimentales dentro del espacio de diseño se presenta en la figura 7, la cual proporciona una representación visual de la región analizada y constituye la base para la posterior construcción de los modelos de superficie de respuesta y el proceso de optimización.

Figura 10. Matriz de espacio de diseño DOE 3^2 .



Fuente: Autoría propia

B. Metodología de superficie de respuesta (RSM)

Los resultados obtenidos a partir del diseño de experimento DOE fueron utilizados para construir modelos de superficie de respuesta mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM). Esta técnica permite representar matemáticamente la relación existente entre las variables de diseño y las respuestas del sistema, proporcionando aproximaciones analíticas de fenómenos complejos mediante funciones polinómicas. [21], [22].

La aplicación de RSM resulta particularmente útil en estudios basados en CFD, ya que permite sustituir simulaciones numéricas de alto costo computacional por modelos predictivos de rápida evaluación. De esta manera, es posible estimar el comportamiento de nuevas configuraciones geométricas dentro de la región de diseño sin necesidad de realizar simulaciones adicionales, reduciendo significativamente el tiempo de cálculo requerido para los procesos de análisis y optimización [22].

Debido al carácter no lineal de los fenómenos fluido dinámicos presentes en los separadores ciclónicos, se emplearon modelos polinómicos de segundo orden para representar la eficiencia de separación y la caída de presión. Este tipo de modelo es ampliamente utilizado en estudios de optimización de ciclones, ya que permite capturar efectos cuadráticos e interacciones entre variables, proporcionando una descripción más precisa de la superficie de respuesta dentro del dominio analizado [9], [21], [23]. Las ecuaciones obtenidas se presentan a continuación.

$$\eta = 93.8267 + 0.3581L_{v,norm} + 2.1184D_{u,norm} - 0.3689L_{v,norm}^2 - 0.4082L_{v,norm}D_{u,norm} - 0.0945D_{u,norm}^2$$

$$\Delta P = 82.6784 - 0.0601L_{v,norm} + 9.0051D_{u,norm} - 0.1782L_{v,norm}^2 + 0.1120L_{v,norm}D_{u,norm} - 0.0736D_{u,norm}^2$$

C. Definición del algoritmo genético

La optimización geométrica del ciclón se realizó mediante el algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II), seleccionado por su capacidad para resolver problemas con objetivos en conflicto, como la maximización de eficiencia de separación y la minimización de la caída de presión. En estos casos, la solución se representa mediante un frente de Pareto compuesto por configuraciones de compromiso entre ambos criterios [24].

NSGA-II es ampliamente utilizado en optimización multiobjetivo debido a su capacidad para generar simultáneamente múltiples soluciones no dominadas. El algoritmo emplea operadores evolutivos de selección, cruce y mutación, junto con mecanismos de clasificación por dominancia y diversidad poblacional, lo que permite una exploración eficiente del espacio de diseño y la obtención de un frente de Pareto bien distribuido [24], [25]. Estas características

lo hacen adecuado para problemas de ingeniería con comportamiento altamente no lineal, como los separadores ciclónicos.

En lugar de ejecutar simulaciones CFD durante cada iteración, las evaluaciones del algoritmo se basaron en los modelos sustitutos derivados del RSM, logrando así una reducción del costo computacional. Además, se establecieron como variables de decisión la longitud del buscador de vórtices (L_v) y el diámetro de salida inferior de las partículas (D_u), restringido al espacio de diseño definido. A través de la evaluación iterativa de dichos modelos el algoritmo genético dio como resultado un frente de Pareto que resalta las geometrías con un balance óptimo entre la caída de presión y la eficiencia del separador.

La implementación se desarrolló en Python utilizando las bibliotecas NumPy y Pymoo, esta última especializada en optimización multiobjetivo basada en algoritmos evolutivos [25]. Los parámetros empleados se presentan en la **Tabla 7**. Parámetros utilizados para la configuración del algoritmo genético NSGA-II.

Tabla 7. Parámetros utilizados para la configuración del algoritmo genético NSGA-II

Parámetros	Descripción técnica y parametrización
Objetivos	Minimización de la pérdida de carga y maximización de la eficiencia de recolección
Dimensión poblacional	1000 soluciones geométricas evaluadas concurrentemente por ciclo.
Condición de finalización	A lo largo de 500 generaciones sucesivas.
Variables de decisión	2 parámetros continuos: Longitud de buscador de vórtices (L_v) y diámetro de la espiga inferior (D_u).

Intervalo de búsqueda	Intervalo operativo para el buscador: [65,117] mm / Intervalo operativo para la descarga: [56, 75] mm
Estrategia de inicialización	Generación de la población base mediante muestreo por hipercubo Latino (LHS) para asegurar una dispersión homogénea.
Recombinación genética (Crossover)	Operador de cruce binario simulado (SBX) configurado con una probabilidad del 90% e índice de distribución de 15 [24], [26].
Alteración paramétrica (Mutación)	Operador de mutación polinómica (PM) aplicado con una probabilidad del 20% en índice de distribución de 20 [24], [25].

Capítulo IV

Resultados, optimización y validación

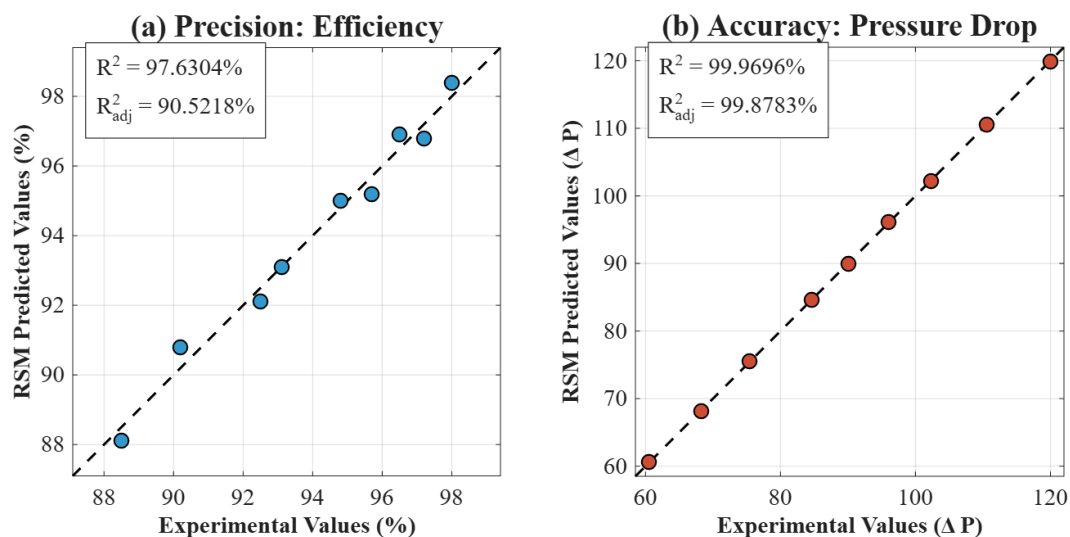
Validación estadística del modelo

Antes de evaluar el desempeño estadístico de los modelos de superficie de respuesta, fue necesario verificar que las simulaciones CFD reprodujeran adecuadamente los fenómenos fluidodinámicos característicos de un ciclón Stairmand. Los resultados obtenidos para la geometría de referencias evidenciaron la formación de la estructura de doble vórtice típica de estos separadores, compuesta por un vórtice externo descendente y un vórtice interno ascendente, así como elevadas velocidades tangenciales y una región de baja presión en el núcleo de flujo. Estos comportamientos concuerdan con los patrones reportados en estudios experimentales y numéricos de ciclones, confirmando que el modelo implementado representa adecuadamente la física del proceso de separación [11], [18].

Una vez verificada la consistencia física del modelo numérico, se evaluó la capacidad predictiva de las ecuaciones obtenidas mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RMS). Para ello, se utilizaron el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de determinación R^2 ajustado, indicadores ampliamente empleados para cuantificar la calidad del ajuste de modelos de regresión [21], [22].

Estos resultados presentados en la **Figura 11**. Gráfico de R^2 y R^2 ajustado de eficiencia y caída de presión indican que las ecuaciones desarrolladas explican la mayor parte de la variabilidad observada en las respuestas analizadas, evidenciando que las modificaciones en la longitud del buscador de vórtices L_v y el diámetro de salida inferior D_u ejercen una influencia significativa sobre el desempeño del ciclón. Asimismo, los elevados valores de R^2 obtenidos demuestran que los modelos generados son adecuados para describir el comportamiento del sistema dentro de la región de diseño y puede emplearse de manera confiable en el proceso de optimización multiobjetivo.

Figura 11. Gráfico de R^2 y R^2 ajustado de eficiencia y caída de presión



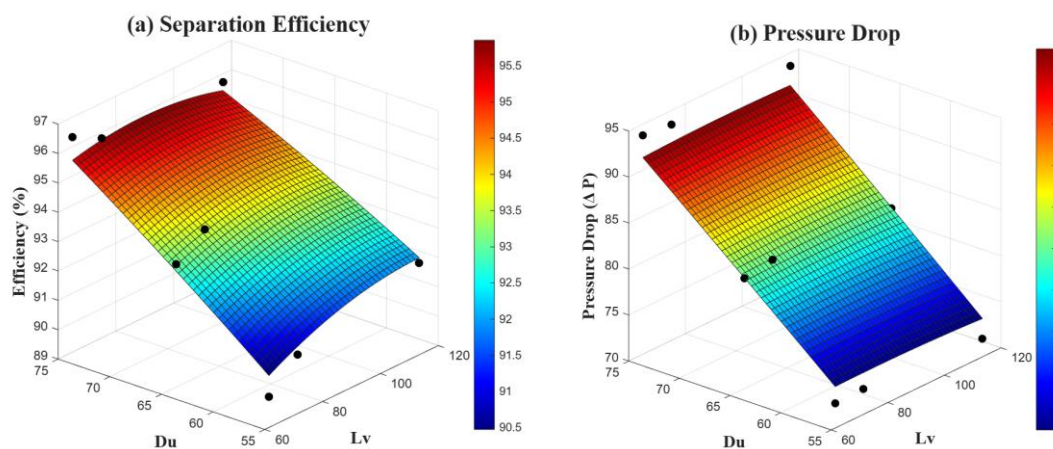
Fuente: Autoría propia

Modelado empírico y capacidad predictiva

A partir de los resultados obtenidos mediante el diseño de experimentos (DOE), se desarrollaron modelos empíricos de segundo orden para describir la eficiencia de separación η y la caída de presión ΔP en función de la longitud del buscador de vórtices (L_v) y el diámetro de salida inferior (D_u). Los modelos fueron construidos mediante RSM, la cual permite aproximar relaciones no lineales entre variables de diseño y respuestas del sistema mediante funciones polinómicas de segundo grado [21], [22].

Con el fin de mejorar la estabilidad numérica del ajuste y evitar efectos asociados a las diferentes escalas de las variables independientes, los factores de diseño fueron expresados en forma normalizada. Esta práctica es ampliamente utilizada en modelos de regresión y superficies de respuesta, ya que facilita la interpretación de los coeficientes y mejora la robustez del proceso de optimización [22].

Figura 12. Representación de las superficies predichas por el polinomio de segundo grado para, (a) la eficiencia de separación y (b) la caída de presión



Fuente: Autoría propia

La **Figura 12** presenta las superficies de respuesta obtenidas para la eficiencia de separación y caída de presión en función de la longitud del buscador de vórtices (L_v) y el

diámetro de salida inferior D_u . En ambos casos se observa una influencia predominante de D_u , evidenciada por la mayor pendiente de las superficies en dicha dirección, lo que indica que esta variable ejerce un efecto más significativo sobre el desempeño del ciclón que (L_v) . Por otro lado, la curvatura observada es una prueba de que las respuestas tienen un comportamiento no lineal, respaldando por completo la aplicación de modelos polinómicos de segundo orden. De igual manera, la orientación diagonal de estas superficies indica que existe una interacción directa entre las dos variables de diseño. Al contrastar los resultados, se evidencia la clásica contraposición del sistema: buscar la máxima eficiencia de separación penaliza la caída de presión, pues los puntos de mejor rendimiento coinciden con incrementos en la pérdida de carga. Este comportamiento justifica la aplicación de la metodología realizada en este trabajo.

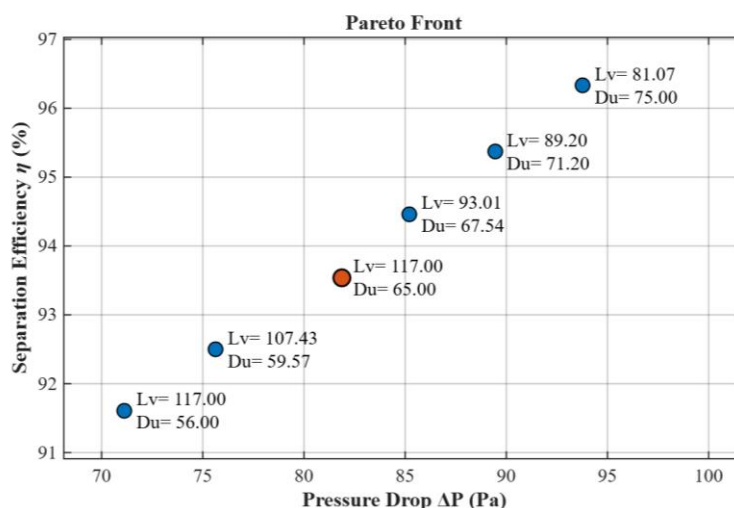
Análisis de frente de Pareto

Una vez verificada la capacidad predictiva de los modelos de segundo orden obtenidos mediante RSM, estos fueron utilizados como funciones objetivo dentro del algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II. El proceso de búsqueda se realizó mediante una población de 1000 individuos que evolucionó durante 500 generaciones, permitiendo explorar de manera eficiente el espacio de diseño definido por la longitud del buscador de vórtice L_v y el diámetro de salida inferior D_u .

A lo largo del proceso evolutivo, el algoritmo evaluó miles de soluciones potenciales y aplicó mecanismos de selección, cruce y mutación para identificar configuraciones geométricas no dominadas. Como resultado, se obtuvo el Frente de Pareto mostrado en la **Figura 13**. Gráfico de Pareto con las soluciones óptimas obtenidas con algoritmo NSGA-II, el cual representa el conjunto de soluciones óptimas que establecen el mejor compromiso entre la maximización de la eficiencia de separación y minimización de la caída de presión. Cada punto del frente corresponde a una geometría factible para la cual no es posible mejorar uno de los objetivos sin deteriorar simultáneamente el otro. La forma del Frente de Pareto confirma la existencia de un conflicto inherente entre ambas respuestas, ya que las configuraciones que

favorecen una mayor eficiencia de separación tienden a incrementar la caída de presión del sistema, comportamiento ampliamente reportado en la literatura para separadores ciclónicos. [9], [18].

Figura 13. Gráfico de Pareto con las soluciones óptimas obtenidas con algoritmo NSGA-II



Fuente: Autoría propia

Verificación computacional del algoritmo genético mediante CFD.

Con el fin de verificar la capacidad predictiva de los modelos obtenidos mediante RSM y optimizados mediante NSGA-II, las soluciones seleccionadas del Frente de Pareto fueron reevaluadas mediante simulación CFD independientes. Posteriormente, se compararon los valores predichos por el algoritmo con los resultados de eficiencia y caída de presión obtenidos, calculándose el error relativo para cada respuesta analizada.

Este procedimiento permitió validar la precisión de los modelos sustitutos empleados durante la optimización y comprobar que las soluciones propuestas por el algoritmo representan adecuadamente el comportamiento real del ciclón dentro de la región de diseño

estudiada. Los resultados de esta comparación se presentan en la **Tabla 8**. Resultados de la validación del modelo CFD frente a las predicciones del algoritmo NSGA-II.

Tabla 8. Resultados de la validación del modelo CFD frente a las predicciones del algoritmo NSGA-II

Lv	Du	Eficiencia NSGA-II (%)	Eficiencia simulación CFD (%)	Variación relativa eficiencia (%)	Caída de presión NSGA-II (Pa)	Caída de presión simulación CFD (Pa)	Variación relativa caída de presión (%)
117.00	56.00	91.61	91.84	0.25	71.13	71.01	0.17
107.43	59.57	92.50	91.45	1.15	75.64	75.62	0.03
117.00	65.00	93.54	93.00	0.58	81.86	81.87	0.01
93.01	67.54	94.46	93.57	0.95	85.20	84.60	0.71
89.20	71.20	95.37	94.78	0.62	89.44	88.91	0.60
81.07	75.00	96.33	96.18	0.16	93.76	93.46	0.32

4. Validación experimental del prototipo físico

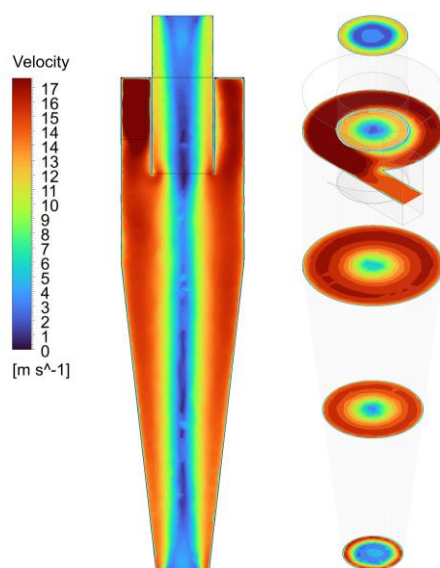
A. Selección de la configuración óptima

De la **Figura 13** se seleccionó la configuración Lv = 117 y Du = 65 mm debido a que representa la mejor solución de compromiso entre ambos objetivos. Esta configuración ofrece una relación óptima de intercambio, logrando maximizar la eficiencia η de separación sin comprometer el aumento de caída de presión ΔP .

A partir de las simulaciones realizadas en ANSYS se obtuvo los siguientes resultados gráficos tanto para la velocidad, la presión y también la distribución de las partículas dentro del ciclón. En la **Figura 14**. Perfil de velocidad de los resultados de la simulación CFD presenta los contornos de velocidad y presión obtenidos para la geometría optimizada. En el perfil de velocidad se observa la formación de una región central de alta velocidad asociada al vórtice

interno que asciende, mientras que las zonas cercanas a las paredes presentan velocidades relativamente menores debido a los efectos viscosos y al desarrollo de la capa límite. Este comportamiento es característico y comparable con varios estudios de los ciclones de alta eficiencia y evidencia la presencia de la estructura de doble vórtice responsable del proceso de separación de partículas [11], [18].

Figura 14. Perfil de velocidad de los resultados de la simulación CFD



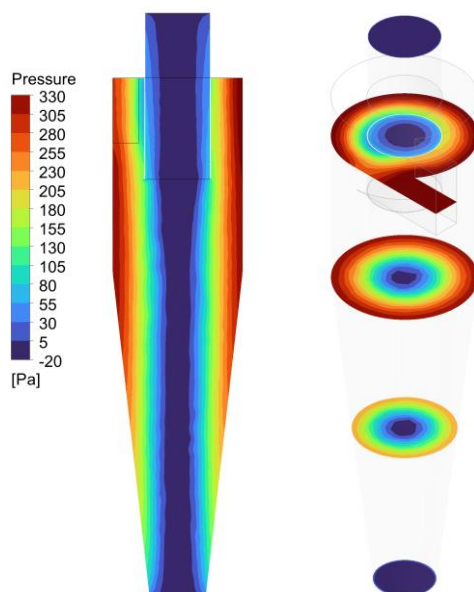
Fuente: autoría propia

En la **Figura 14** se denota de la formación del vórtice en el separador, de modo que las partículas ingresan por la entrada tangencial con una velocidad máxima aproximadamente los 17 m/s, además, debido a la fuerza centrífuga, son proyectadas inmediatamente hacia la pared exterior del cilindro, donde mantienen una alta energía cinética. Mientras que, a medida que se acercan al vortex Finder, las velocidades caen drásticamente, por debajo de los 6 m/s.

De la misma manera en la **Figura 15** el campo de presión muestra una distribución radial bien definida, con valores mínimos en el núcleo del ciclón y mayores presiones hacía las

regiones próximas a las paredes. Esta distribución es consecuencia directa de las elevadas velocidades tangenciales generadas en el interior del separador, las cuales inducen un gradiente de presión radial que favorece el desplazamiento de las partículas hacia la periferia bajo la acción de las fuerzas centrífugas [12].

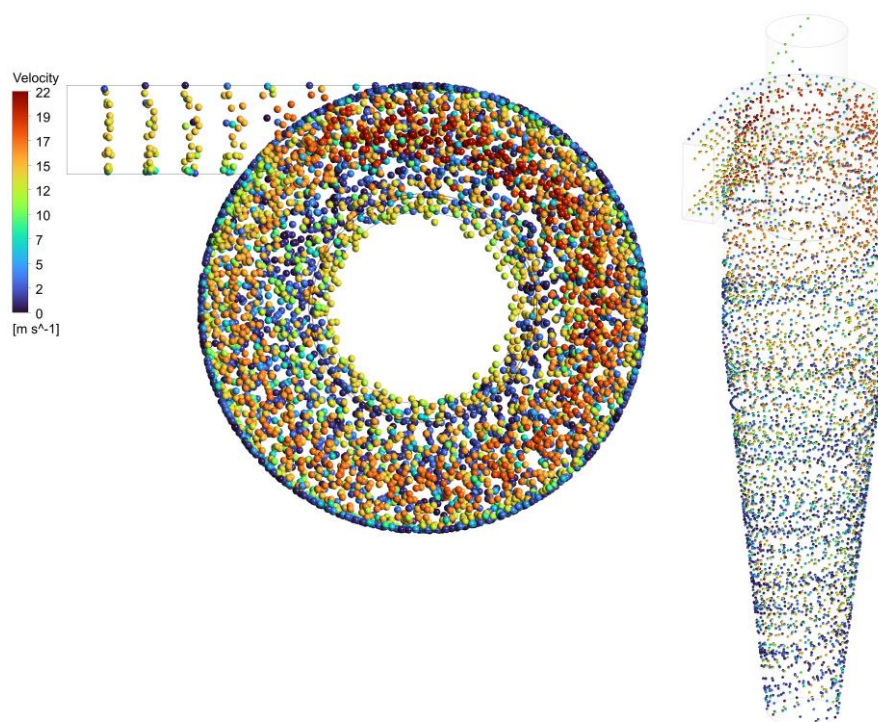
Figura 15. Perfil de presión de la simulación CFD vista en (a) corte transversal y (b) isométrica por secciones circulares



Fuente: Autoría propia

La presencia de una zona de baja presión estable a lo largo del eje central confirma la conservación del patrón de vórtices esperado para este tipo de geometrías, mientras que la distribución uniforme de presión observada en las paredes sugiere una reducción de perturbaciones locales y pérdidas energéticas innecesarias. Estos resultados indican que la geometría optimizada mantiene las características fluidodinámicas necesarias para una separación eficiente de partículas, contribuyendo simultáneamente a la disminución de la caída de presión observada durante el proceso de optimización.

Figura 16. Perfil de distribución de la velocidad de las partículas.



Fuente: Autoría propia

La **Figura 16** ilustra la formación del vórtice en el separador, mostrando que las partículas ingresan a través de la entrada tangencial con una velocidad máxima de entre 20 y 22 m/s. Además, debido a la fuerza centrífuga, son proyectadas inmediatamente hacia la pared exterior del cilindro, donde conservan una elevada energía cinética. Por el contrario, a medida que se aproximan al tubo de salida del vórtice, las velocidades disminuyen drásticamente, cayendo por debajo de los 10 m/s.

La mayor velocidad tangencial se concentra en la sección cilíndrica superior (a la altura de la entrada), ya que allí se produce la mayor recirculación del flujo. Esta pérdida de velocidad permite que el material particulado finalmente precipite por gravedad hacia la salida inferior, separándose de la corriente de aire.

B. Construcción del prototipo

Diseño y parte mecánica

Tras la verificación numérico, la geometría óptima de Pareto seleccionada se fabricó como un prototipo físico y se evaluó bajo condiciones de laboratorio controladas. El objetivo de esta etapa fue determinar si las mejoras de rendimiento predichas por la optimización basada en CFD podrían reproducirse experimentalmente.

El prototipo se construyó con acero ASTM A36 de 1.4 mm debido a su óptima relación entre resistencia y facilidad de maquinado. Se utilizó el software Autodesk Inventor para generar los desarrollos de chapa y plasma CNC para realizar los cortes, lo que nos garantizó una alta fidelidad dimensional. Las secciones cilíndricas y cónicas se conformaron usando una roladora manual, y el ensamblaje definitivo del separador se consolidó mediante soldadura MIG.

Dado que los separadores ciclónicos son altamente sensibles a las fugas de aire, lo cual puede degradar severamente la eficiencia de recolección; se realizaron pruebas de sellado posterior a la soldadura. Cualquier fuga o micro fisura detectada fue corregida inmediatamente con resoldadura localizada para garantizar un sistema completamente hermético. Además, las superficies internas y externas fueron tratadas con pintura electrostática; eso proporcionó resistencia a la corrosión y mejoró la suavidad de la superficie. Con este paso se evitaron alteraciones de flujo ajenas a las condiciones ideales del modelo numérico. Finalmente, el separador se ancló sobre una base estructural fabricada a la medida para garantizar su estabilidad y mitigar las vibraciones durante su funcionamiento.

Una vez terminado el ensamblaje, se realizaron mediciones directas para comprobar las dimensiones finales y se denotó que las variaciones respecto al diseño numérico fueron menores al 1.4%. Esta alta fidelidad de construcción permite descartar los fallos de

manufactura, por lo tanto, cualquier diferencia posterior entre los resultados simulados y los reales se deberá únicamente a las incertidumbres experimentales o a las simplificaciones del software.

Figura 17. Corte plasma CNC de las piezas del separador ciclónico



Fuente: Autoría propia

Como primer paso, se realizó el corte de todas las piezas utilizando una máquina CNC de corte plasma, a partir de los archivos previamente generados en formato DXF. Este proceso permitió obtener las piezas en la lámina de acero.

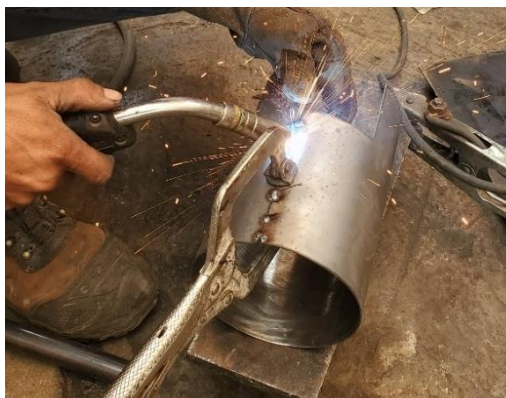
Figura 18. Proceso de rolado de las láminas de acero del separador ciclónico



Fuente: Autoría propia

A continuación, las piezas cortadas fueron sometidas a un proceso de pulido, con el objetivo de eliminar rebabas, escoria residual del corte y otras imperfecciones propias del proceso de plasma, asegurando superficies adecuadas para posteriormente realizar la unión de elementos mediante soldadura. Una vez acondicionadas las piezas, se procedió con un proceso de conformado mecánico. El cuerpo cilíndrico y el cono del separador fueron obtenidos mediante procesos de rolado de lámina, logrando las geometrías curvas requeridas. De igual manera, la sección de entrada del separador fue fabricada mediante un proceso de doblado, adaptándose a la configuración geométrica establecida en el diseño.

Figura 19. *Proceso de soldadura MIG en las uniones de las piezas del separador ciclónico*



Fuente: Autoría propia

Con las piezas ya conformadas, se inició el proceso de ensamblaje. En primer lugar, se realizó la unión de los bordes del cilindro y del cono mediante soldadura por proceso MIG, obteniendo así una estructura continua.

Figura 20. Unión por soldadura del cuerpo cilíndrico con la entrada del separador ciclónico



Fuente: Autoría propia

Finalmente, se efectuó la unión entre el cilindro y el cono, garantizando la correcta alineación entre ambos elementos.

Figura 21. Unión del cuerpo cilíndrico y la parte cónica del separador ciclónico



Fuente: Autoría propia

Como etapa final, se realizó un proceso de acabado de todas las uniones soldadas mediante desbaste y pulido, con el fin de tener todas las superficies uniformes y evitar posibles fugas de aire durante la operación del equipo.

Figura 22. *Proceso de pulido para obtener superficies uniformes en el separador ciclónico*



Fuente: Autoría propia

Al final de los procesos mecánicos realizados, se obtuvo una estructura sólida del separador ciclónico, con las medidas y especificaciones realizadas en el diseño previo a construcción.

Una vez construido el separador ciclónico se realizó una estructura metálica tipo mesa



Fuente: Autoría propia

Finalmente, el banco de pruebas experimental fue instrumentado con una interfaz humano-máquina (HMI) para la adquisición de datos en tiempo real. La velocidad del aire a la entrada fue monitoreada utilizando un anemómetro UT363 instalado en el conducto de entrada, mientras que la eficiencia de separación se determinó gravimétricamente a partir de la relación entre la masa de partículas recuperada y la masa de partículas inyectada utilizando una celda de carga calibrada.

Figura 23. Prototipo físico final



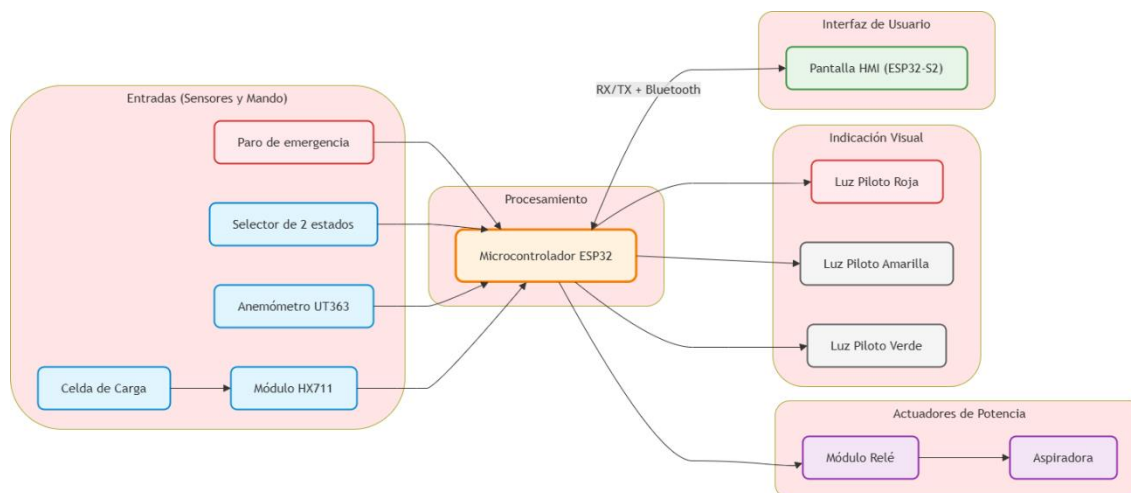
Fuente: Autoría propia

Diseño de la arquitectura electrónica y sistema de control

Para el desarrollo del prototipo, se implementó una arquitectura electrónica basada en un enfoque sistemático y modular, estructurada en bloques funcionales enlazados entre sí, esta configuración metodológica permite asilar las etapas de acondicionamiento de energía, adquisición de señales de instrumentación, procesamiento digital y control de potencia.

En la **Figura 24** se ilustra el diagrama de bloques estructurado que gobierna el comportamiento y flujo físico del sistema.

Figura 24. Diagrama de bloques general del sistema de control y adquisición de datos del prototipo



Fuente: Autoría Propia.

Se establece que el funcionamiento dinámico del prototipo se rige bajo la interacción de cinco subsistemas principales acoplados en una unidad central de procesamiento:

- **Subsistema de entradas (sensores y mando)**: Representa el canal de adquisición de datos del entorno físico. Está conformado por dispositivos de respuesta digital y analógica, incluyendo el sensor de flujo de aire (UT363), el sensor de fuerza y los periféricos de control mecánico como lo son el selector de 2 estados y el paro de emergencia.
- **Unidad de procesamiento central**: Construida con un microcontrolador ESP32, el cual actúa como el núcleo computacional y lógico del prototipo. Este dispositivo encargado de ejecutar las rutinas de muestreo periódico de los sensores, procesar los algoritmos de control, determinar las acciones sobre los actuadores y coordinar las tareas de comunicación con la interfaz externa.
- **Interfaz de usuario (HMI)**: Para la supervisión visual del operario, se incluyó una pantalla HMI comandada por un ESP32-S2. El intercambio de datos con la unidad central funciona a través de un canal híbrido que mezcla comunicación serie (RX/TX) y Bluetooth. Esta configuración dual fue clave para optimizar el

uso del ancho de banda y acelerar la velocidad con la que se actualizan los gráficos en pantalla.

- Subsistema de indicación física visual: Integrado por tres luces piloto independientes (roja, amarilla y verde). Este bloque actúa como una interfaz física de señalización rápida para comunicar al usuario el estado operativo actual del sistema, la presencia de fallas o la ejecución de rutinas automáticas mediante un código de colores industrial.
- Subsistema de actuadores de potencia: Encargado de modificar el estado físico del prototipo. Está integrado por un módulo relé que actúa como interfaz de aislamiento galvánico y de potencia, el cual conmuta la alimentación de corriente hacia el actuador principal del sistema: la aspiradora encargada de la generación del flujo dinámico de succión.

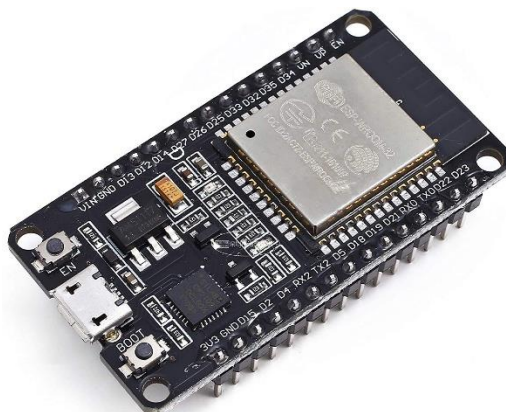
La selección de cada elemento se fundamentó en criterios de precisión, compatibilidad electrónica y fiabilidad operativa para el entorno del prototipo, a continuación, se detalla el principio de funcionamiento de los componentes físicos seleccionados para la integración en el entorno del mismo.

Unidad central de procesamiento e interfaz HMI

La arquitectura de control requiere de plataformas de procesamiento embebido capaces de manejar múltiples rutinas en tiempo real y gestionar protocolos de comunicación concurrentes.

- Microcontrolador Principal (ESP32): Se implementó una placa ESP32. Este microcontrolador cuenta con un procesador Tensilica Xtensa Dual-Core de 32 bits. Se seleccionó como unidad central por su capacidad para gestionar interrupciones de hardware, su alta densidad de pines GPI y su soporte nativo para los buses de comunicación requeridos por la instrumentación.

Figura 25. Placa de desarrollo ESP-WROOM-32 implementada como unidad central de control



Fuente: (<https://www.amazon.in/Allianztec-ESP-WROOM-32-Development-Microcontroller-Integrated/dp/B08VJ2CKG1>)

- Pantalla HMI con ESP32-S2: Para la interfaz gráfica de usuario (HMI), se integró un módulo de visualización gestionado por un microcontrolador ESP32-S2. Este dispositivo procesa exclusivamente el renderizado de la pantalla, liberando de carga computacional al controlador maestro. Recibe la trama de datos de los sensores mediante un canal híbrido RX/TX y Bluetooth y proyecta las variables de control en tiempo real para la supervisión del operador.

Figura 26. Módulo de pantalla HMI basado en ESP32-32E para la visualización de datos



Fuente: Autoría propia

Subsistema de instrumentación y adquisición de datos

La toma de datos de las variables físicas del sistema se realiza mediante instrumentación acondicionada para su lectura digital. Los sensores utilizados fueron los que se describen a continuación:

- Anemómetro digital modelo UT363: Para la medición de la velocidad del flujo de entrada del aire, se acopló un anemómetro UT363. Este transductor emplea un sensor de tipo hélice que, al interactuar con el flujo aerodinámico, genera una señal proporcional a la velocidad del viento. Su integración al circuito permite monitorear de forma ininterrumpida las condiciones cinemáticas generadas en el sistema de succión.

Figura 27. Anemómetro digital UT363 utilizado para la medición del flujo de aire.



Fuente: (<https://carbonestore.cr/products/uni-t-ut363-mini-anemometro-digital-medidor-de-velocidad-del-viento-0-30-m-s-flujo-de-aire-10-50c>)

- Celda de Carga y Módulo Acondicionador HX711: La cuantificación del peso se obtiene a través de una celda de carga con capacidad nominal de 1 kg. Este

componente opera mediante galgas extensométricas conectadas en configuración de puente de Wheatstone, produciendo variaciones de tensión en el orden de los milivoltios al someterse a deformación elástica. Para interpretar esta señal analógica diferencial, se acondicionó mediante un módulo HX711, el cual incorpora un amplificador de ganancia programable y un convertidor analógico-digital (ADC). El HX711 digitaliza la lectura y la transmite al ESP32 central mediante una interfaz serial síncrona, garantizando una alta resolución en el pesaje.

Figura 28. Conjunto de celda de carga de 1 kg y módulo convertidor ADC HX711.



Fuente: (<https://mecatronica.saisac.pe/producto/celda-de-carga-1-kg-hx711/>)

Elementos de Mando y Señalización

Para garantizar la interacción manual segura y proporcionar retroalimentación visual del proceso, se instalaron componentes de conmutación y señalización industrial.

- Elementos de mando: En el sistema se incorporó un selector de 2 posiciones, para la activación del circuito de control. Como medida de seguridad, se implementó un pulsador parado de emergencia con enclavamiento mecánico, el cual permite cortar la energía de la ejecución del proceso para evitar riesgos o anomalías operativas.

Figura 29. Dispositivos de mando y de seguridad mecánica.



Fuente: (<https://megatronica.cc/producto/selector-camsco-2-posiciones-plastico-22mm-skos-ed21-no/>, <https://cloudtec.pe/mando-y-senalizacion/473-np2-pulsador-tipo-hongo.html>)

- **Indicación Visual:** Se dispuso de un arreglo de tres luces piloto de colores estandarizados (Roja, Amarilla y Verde). Estos indicadores operan como salidas digitales discretas, permitiendo al firmware comunicar de forma intuitiva el estado del prototipo: el estado de habilitación del circuito de control (Amarillo), la ejecución activa del proceso de succión (Verde) y la presencia de alertas o la interrupción por emergencia (Roja).

Figura 30. Arreglo de indicadores visuales para la monitorización de estados operativos.



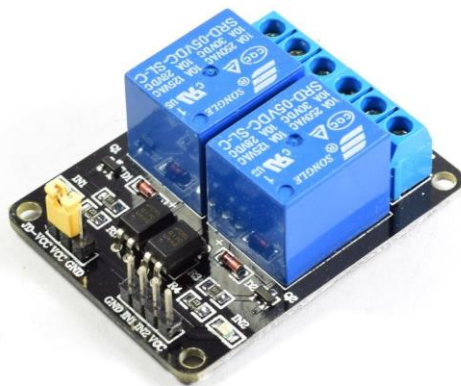
Fuente: (<https://megatronica.cc/producto/luz-piloto-led-22mm-12-24v-ac-dc-verde/>)

Etapas de Actuación y Potencia

Para la activación del trabajo físico mediante los algoritmos de control se centraliza en este subsistema.

- **Módulo de Relés:** Sirve como interfaz de acoplamiento entre la lógica de control 5V DC y el circuito de potencia. El módulo de relés proporciona aislamiento galvánico mediante optoacopladores, protegiendo al microcontrolador de las corrientes inversas inducidas por el arranque o paro de la carga electromecánica.

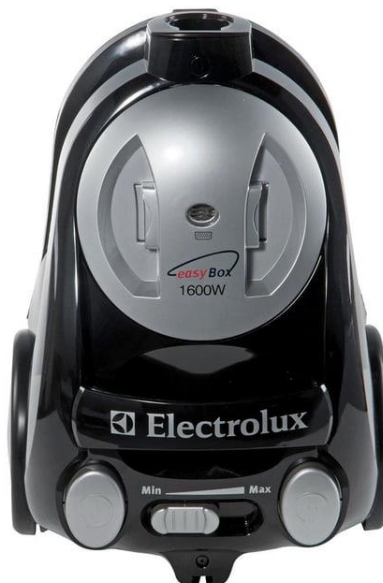
Figura 31. Módulo de relés implementado.



Fuente: (<https://megatronica.cc/producto/modulo-rele-5v-2-canales-con-opto/>)

- **Actuador Motor de Succión:** Constituye el elemento motriz y la carga de mayor consumo del sistema. Este actuador es el encargado de generar el diferencial de presión estática y la succión volumétrica necesaria para el desarrollo del fenómeno físico evaluado en el prototipo. Su encendido y apagado es gobernado estrictamente por las salidas lógicas conmutadas a través del módulo de relés.

Figura 32. Aspiradora utilizada para el separador ciclónico

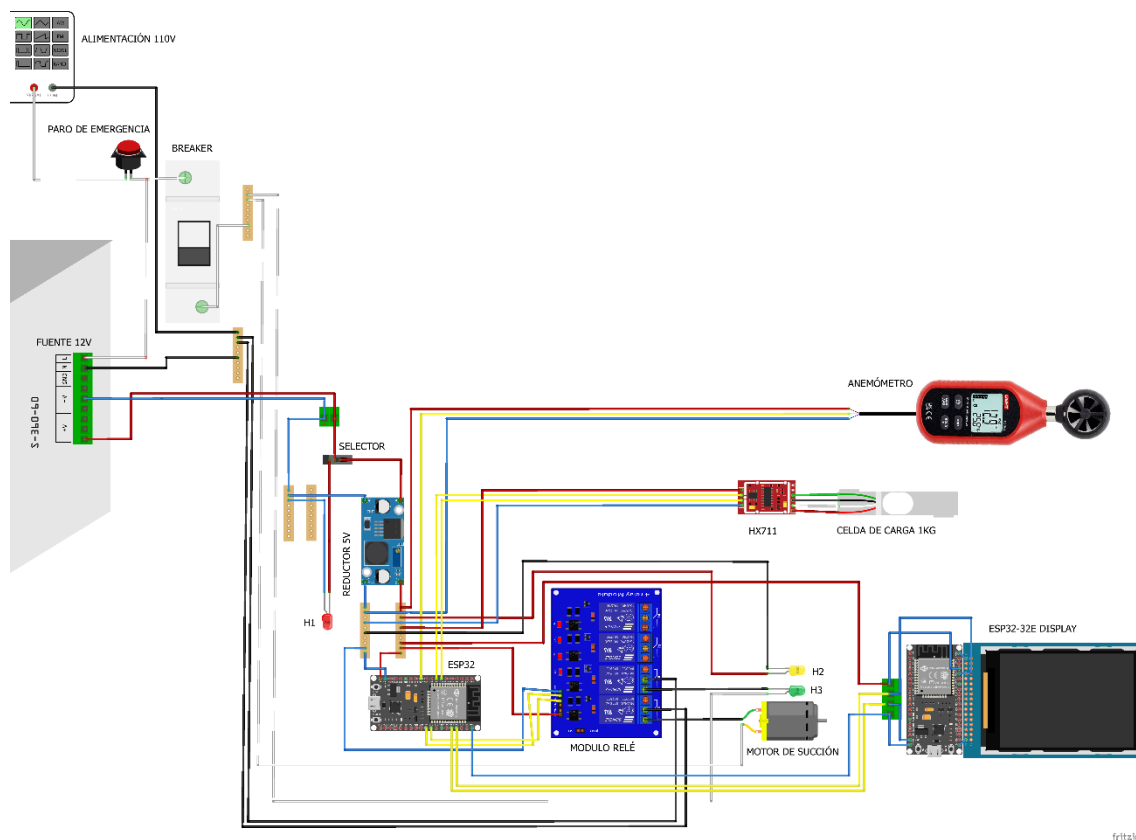


Fuente: (<https://www.walmart.com.mx/ip/aspiradora-electrolux-easy-box-negra-mod-3010yega401/00789634711374>).

Esquema de Interconexión Eléctrica y Electrónica

La integración funcional del hardware se materializa mediante un circuito de interconexión diseñado para separar físicamente las corrientes de potencia de las señales lógicas de control. La distribución de estos componentes se proyecta para su ensamblaje ordenado en un tablero eléctrico centralizado, garantizando la seguridad del operario y la integridad de los equipos. En la **Figura 33** se detalla el diagrama esquemático de conexiones del prototipo.

Figura 33. Diagrama esquemático de conexiones eléctricas y electrónicas del sistema.



Fuente: Autoría propia.

La energización inicia mediante un tomacorriente de 110V AC. Como medida de seguridad primaria y absoluta, la línea de fase ingresa directamente a un pulsador de paro de emergencia con enclavamiento mecánico. Este componente actúa como un seccionador general, garantizando que su accionamiento interrumpa el flujo eléctrico hacia la totalidad del sistema. A la salida del paro de emergencia, la corriente alterna se bifurca en dos líneas operativas independientes.

La primera derivación energiza una fuente de alimentación conmutada, la cual rectifica y reduce la tensión a 12V DC. Para alimentar la electrónica de control, se extrae una línea desde dicha fuente hacia un módulo reductor de voltaje tipo Buck, el cual estabiliza la tensión a 5V DC. El paso de esta energía lógica es gobernado por un selector manual que, al cerrarse, enciende la luz piloto H1 y alimenta la unidad central ESP32.

La segunda derivación se dirige hacia un interruptor termomagnético (breaker), el cual brinda protección específica contra sobrecargas y cortocircuitos a la etapa de potencia. A la salida de este dispositivo, la línea de 110V AC se conecta a los contactos de potencia del módulo de relés.

Con el circuito de control energizado, el microcontrolador principal (ESP32) adquiere las señales digitales de la celda de carga a través del módulo HX711 y contabiliza los pulsos del anemómetro. Con la información ya procesada, el ESP32 actualiza las luces piloto (H2 y H3) y envía una señal de 3.3V al módulo de relés. Este componente cierra su contacto mecánico para permitir el paso de 110V AC y encender el motor de succión de manera aislada. En paralelo, el procesador maestro mantiene la comunicación bidireccional con el display ESP32-32E, lo que garantiza el refresco continuo de la interfaz gráfica.

Cálculo del Consumo Energético

Se determinó el consumo energético del prototipo operando a plena carga. Dado que el sistema maneja dos tipos de corriente, el balance de potencias se divide analíticamente en la etapa de control digital (DC) y la etapa de potencia motriz (AC). La potencia eléctrica se calcula mediante la ley de Watt:

$$P = V * I$$

Consumo de la Etapa de Control Digital (5V DC / 12V DC):

Considerando los requerimientos nominales de los semiconductores integrados, se establece el siguiente balance:

- Microcontroladores (ESP32 maestro y display): La pantalla HMI presenta un consumo nominal de 510mA, mientras que el ESP32 principal, operando a máximo rendimiento con transmisión de datos activa, demanda

aproximadamente 240mA. Esto representa un consumo combinado de 750mA a 5V, resultando en una potencia requerida de 3.75W.

- **Módulo de Relés y Sensores:** Se cuantifica un consumo de 20 mA por canal de relé activo, un consumo estándar de 20 mA para cada una de las tres luces piloto LED, un requerimiento de aproximadamente 20 mA para la lógica del anemómetro UNI-T UT363 y 2 mA para el convertidor ADC HX711. Esta etapa representa una demanda máxima simultánea de 125 mA a 5V, aportando 0.63 W a la carga lógica.

La potencia total requerida del circuito de control es la sumatoria de estas cargas, equivalente a 4.38 W. Dado que la fuente instalada posee una capacidad nominal de 132 W (12V a 3.7 A), se garantiza un sobredimensionamiento que elimina cualquier riesgo de caída de tensión en el procesamiento digital.

Consumo de la Etapa de Potencia (AC):

El motor de succión es el elemento de mayor demanda energética del prototipo, operando directamente con la tensión de red protegida por el breaker. Considerando que el actuador posee una potencia activa nominal de 1600 W (1.6 kW) operando a 110 V AC, su corriente de consumo estimada se define despejando la variable de la ley de Watt:

$$I = \frac{P}{V}$$

$$I = \frac{1600}{110} = 14.54 \text{ A}$$

Este requerimiento de corriente nominal de 14.54 A valida la selección térmica del breaker instalado, puesto que posee una capacidad nominal superior para tolerar el pico de

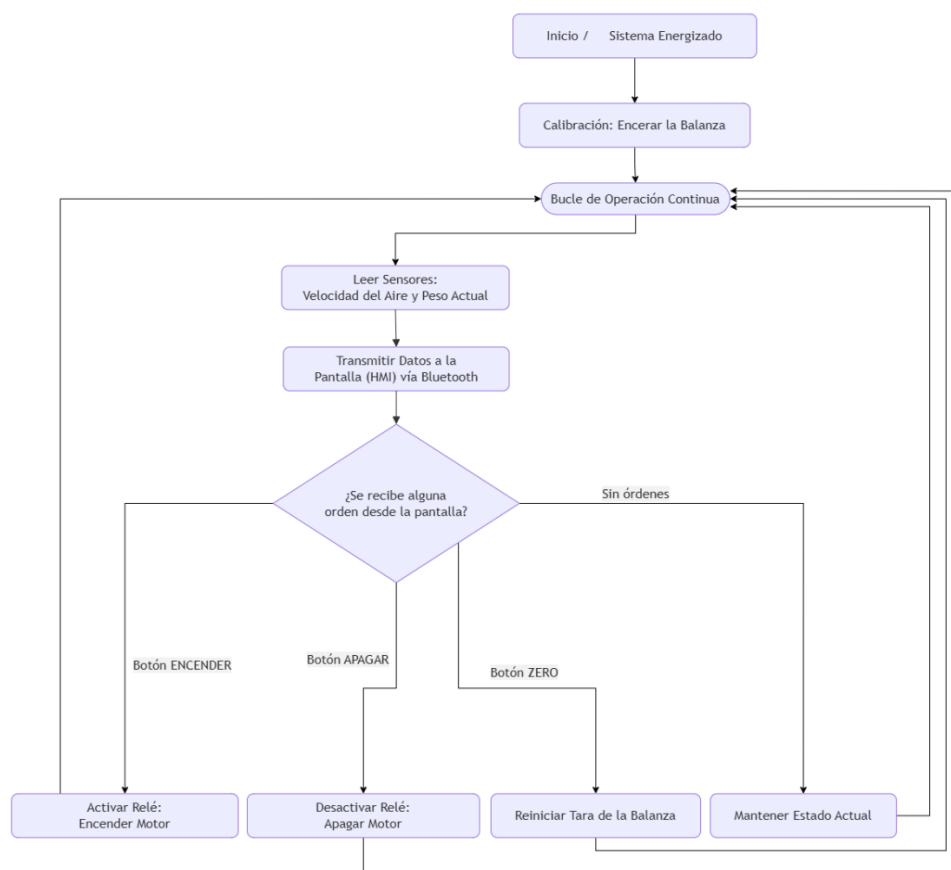
arranque de la carga inductiva. Asimismo, verifica que los platinos internos del relé de conmutación son los adecuados para gestionar esta magnitud de corriente sin sufrir daños electromecánicos o arcos eléctricos durante la operación prolongada.

Arquitectura de Software y Lógica de Control

El desarrollo de la programación para el microcontrolador ESP32 se estructuró bajo una lógica de bucle continuo. El objetivo del código es garantizar la lectura ininterrumpida de los sensores mientras se mantiene a la espera de las instrucciones del operador a través de la interfaz gráfica.

Para ilustrar el flujo de ejecución del sistema, en la **Figura 34** se presenta el diagrama de flujo general del algoritmo principal.

Figura 34. Diagrama de flujo del algoritmo central de instrumentación y control.



Fuente: Autoría propia.

Al energizar el sistema, el microcontrolador ejecuta una configuración de arranque por única vez. En esta etapa se declaran los pines de conexión, se establece el enlace de comunicación inalámbrica por Bluetooth hacia la pantalla y se inicializa el convertidor digital de la celda de carga. Como paso indispensable para asegurar la precisión del pesaje, el sistema ejecuta automáticamente una rutina de calibración a cero (tara), descontando el peso de los elementos mecánicos que soportan el recipiente de recolección.

Terminada la fase de inicialización, el control pasa a un ciclo continuo de evaluación. En este lazo, el procesador consulta sin interrupciones al anemómetro para traducir los pulsos en velocidad de aire, y registra las variaciones en milivoltios de la celda de carga para estimar la masa capturada. Para contrarrestar las posibles interferencias provocadas por la vibración del motor, el código incorpora un filtro matemático basado en promedios, garantizando así la precisión de los datos. Seguidamente, el microcontrolador compila las variables medidas para transmitir las a la interfaz HMI. En ese mismo instante, se verifica la entrada de comandos desde el panel táctil:

- Al detectar la orden de encendido, se emite un pulso lógico que cierra el relé y suministra los 110 V al motor.
- Al registrar la instrucción de apagado, se anula la señal del relé y cesa el flujo de aire.
- Si recibe el comando de tara, encera nuevamente la balanza.

Esta secuencia se repite indefinidamente, delegando a la pantalla interactiva tareas secundarias como el cálculo del porcentaje de eficiencia del separador ciclónico mediante la relación de los pesos iniciales y finales.

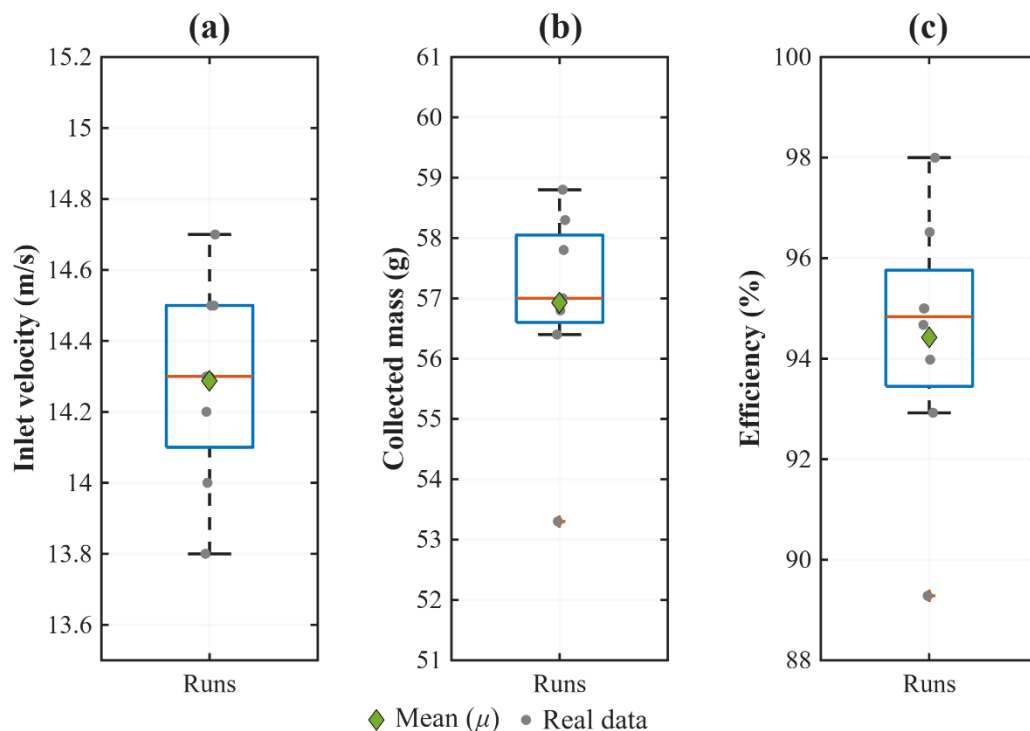
C. Pruebas de funcionamiento del prototipo

Se realizaron ocho pruebas de eficiencia de recolección en donde se realizó el mismo procedimiento para todos los casos. El cual consiste en inyectar al separador un determinado peso conocido de partículas, en este caso 60g para cada prueba, posterior a esto se enciende el motor de aspiración durante medio minuto y seguidamente se pesa las partículas recolectas en la parte inferior del ciclón, con las cuales se determinará la relación que existe entre la entrada de partículas y la salida multiplicado por 100 para obtener esta relación en porcentaje y finalmente obtener un valor de eficiencia de recolección, que es lo que nos interesa en este trabajo. Todos estos datos fueron registrados y se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 9. Resultados experimentales de las pruebas, velocidad, masa de entrada, masa recolectada y eficiencia

Prueba	Velocidad entrada (m/s)	Masa de entrada (g)	Masa colectada (g)	Eficiencia (%)
1	14.50	59.70	53.30	89.29
2	14.30	61.50	57.80	93.98
3	14.70	60.00	57.00	95.00
4	14.00	60.00	56.80	94.67
5	13.80	60.40	58.30	96.52
6	14.20	60.70	56.40	92.92
7	14.50	60.00	58.80	98.00
8	14.30	60.00	57.00	95.00
Promedio	14.20		56.93	94.42
Desviación estándar.	0.29		1.67	2.59

Figura 35. Representación mediante gráfico de cajas de la distribución de a) velocidad de entrada, b) la masa recolectada y c) la eficiencia del prototipo



Fuente: Autoría propia

El análisis estadístico de la eficiencia de separación, presentado mediante el diagrama de caja de la **Figura 35**, muestra que el prototipo alcanzó una eficiencia de 94.42%, con una desviación estándar de 2.59 %, evidenciando un desempeño elevado y consistente durante las pruebas experimentales. La distribución de los datos presenta un rango intercuartílico reducido, indicando que la mayor parte de las mediciones se concentra alrededor del valor central y, que, por tanto, existe una buena repetibilidad del proceso. Aunque se identifica un valor atípico cercano al 89%, este representa un evento aislado sin modificar significativamente la tendencia global de los resultados. Los datos experimentales confirman la estabilidad operativa del separador, el cual mantuvo eficiencias mayores al 94 % en la mayoría de las pruebas. Este desempeño valida directamente el diseño del equipo físico y sirve como un respaldo empírico seguro para comprobar la exactitud del modelo computacional.

D. Comparación de resultados de simulaciones CFD con el prototipo físico

Para validar el modelo numérico, se contrastó la eficiencia de separación simulada en CFD directamente con los resultados experimentales obtenidos a través del prototipo físico. Esta comparación permite evaluar el grado de concordancia entre ambos enfoques bajo condiciones de operación establecidas y considerando la geometría optimizada mediante el proceso realizado anteriormente. Los resultados obtenidos, junto con el error porcentual correspondiente, se presentan en la **Tabla 10**.

Se observa un error porcentual del 1.51% entre la eficiencia obtenida experimentalmente y la predicha por la simulación CFD. Dado que esta diferencia es inferior al 5% se considera que existe una alta concordancia entre resultados numéricos y experimentales, lo que evidencia la capacidad del modelo para representar adecuadamente el comportamiento del sistema real. Por otra parte, los hallazgos corroboran la efectividad de los modelos sustitutos basados en la metodología RSM, dado que replicaron con exactitud el vínculo entre los parámetros de diseño y las variables de respuesta. De este modo, el enfoque de optimización aplicado hizo posible determinar arreglos geométricos que potencian el rendimiento del separador, arrojando datos coherentes tanto en las simulaciones virtuales como en los ensayos experimentales.

Tabla 10. Validación de las simulaciones con el prototipo físico

Parámetro	Simulación CFD	Prototipo físico
Velocidad de entrada (m/s)	14	14.2
Densidad de la partícula (kg/m ³)	822	822
Tamaño de la partícula (m)	9.5e-06	9.47e-06
Eficiencia (%)	93.00	94.42

Porcentaje de error de eficiencia	1.51%
--	--------------

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

1. Conclusiones

El aporte fundamental de esta investigación radica en la consolidación de un marco metodológico validado que acopla la simulación aerodinámica con algoritmos evolutivos de optimización multiobjetivo. Este flujo de trabajo resolvió el conflicto técnico inherente entre la maximización de la eficiencia y el aumento de la pérdida de consumo energético. En consecuencia, se proporciona para trabajos futuros una herramienta predictiva robusta y económicamente viable que facilita la optimización de separadores ciclónicos y su futuro escalamiento industrial, asegurando un diseño de alta eficiencia comprobada bajo regímenes de flujo turbulento.

La implementación sistemática de la dinámica de fluidos computacional CFD mediante el modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable demostró ser una metodología efectiva para capturar los gradientes de presión y la estructura de doble vórtice del ciclón Stairmand. Adicionalmente, la conversión del dominio a una malla poliédrica y la sustitución de evaluaciones numéricas iterativas por modelos predictivos RSM dentro del algoritmo NSGA-II, permitieron una reducción en el costo computacional. Esta adopción digital representa una ventaja operativa significativa, pues minimiza la dependencia del diseño empírico y reduce los tiempos y costos asociados a la manufactura iterativa de prototipos.

La Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) evidenció una alta fidelidad predictiva, logrando representar el comportamiento del sistema con coeficientes de determinación (R^2) del 97.63% para la eficiencia y 99.96 % para la caída de presión. Al validar la configuración geométrica optima mediante el prototipo físico, se obtuvo una eficiencia experimental de 94.42 %, lo que representa un error porcentual de apenas 1.51% respecto al

valor predicho por la simulación CFD. Esta estrecha concordancia, al ser estadística inferior al margen del 5%, confirma que las ecuaciones desarrolladas mapean con exactitud el comportamiento físico del fluido y validan la mejora real en el equipo.

En base a la progresión físico topológica del frente Pareto, se hace evidente que el incremento paulatino en la longitud del buscador de vórtices L_v y en el diámetro de descarga D_u extiende el tiempo de residencia de las partículas y estabiliza el núcleo del vórtice. De esta manera, la configuración paramétrica de $L_v = 117$ mm y $D_u = 65$ mm se seleccionó como el diseño óptimo definitivo para ser construido como prototipo físico para su posterior validación experimental, puesto que ofrece la mejor sinergia entre un alto rendimiento fluidodinámico, un bajo requerimiento energético y una manufactura mecánicamente estable.

2. Recomendaciones

Es fundamental separar físicamente la estructura de pesaje de las vibraciones generadas por el motor de succión, ya que la celda de carga es un sensor sumamente sensible. Aunque el filtro de promedios por software cumple su función de estabilizar los valores, mitigar el ruido mecánico directamente desde el diseño estructural siempre será la estrategia más efectiva para garantizar lecturas limpias.

Para asegurar que la recopilación de datos sea confiable a lo largo del tiempo, se aconseja establecer una rutina estricta de calibración para el anemómetro y la balanza. Este procedimiento es indispensable si el prototipo será reubicado frecuentemente o si operará durante jornadas experimentales prolongadas, evitando de esta forma la acumulación de errores de medición.

Se sugiere explorar configuraciones de malla aún más rigurosas cerca de las paredes del separador para futuras simulaciones. Manteniendo los valores de Y^+ en los rangos recomendados, resulta de gran interés probar distintos modelos de turbulencia para verificar si se logra una mejora sustancial en los tiempos de convergencia y un incremento en la precisión de los resultados.

Es indispensable garantizar la completa hermeticidad del ensamblaje en futuras réplicas o modificaciones del equipo, prestando especial atención al sellado de las uniones y la compuerta de descarga. Cualquier pequeña fuga de aire en la estructura física alterará la caída de presión real, lo que terminaría alejando los resultados prácticos de las predicciones arrojadas por el modelo numérico.

3. Propuesta de trabajos futuros

Investigar el comportamiento del equipo utilizando partículas con diferentes morfologías, densidades y distribuciones granulométricas. Esto permitirá evaluar la versatilidad del separador frente a distintas mezclas y escenarios industriales.

Evaluar el comportamiento del prototipo sometiéndolo a un espectro mucho más amplio de velocidades de entrada de aire. El mapeo detallado de estas condiciones ayudará a comprender con exactitud el impacto del fluido sobre el límite máximo de la caída de presión y la eficiencia de recolección.

Aprovechando la capacidad de procesamiento del microcontrolador, se propone desarrollar un esquema de control de lazo cerrado para dotar al equipo de autonomía total. Esta mejora permitiría regular la potencia del motor en tiempo real con base en las lecturas de los sensores, automatizando por completo la inyección y el pesaje del material particulado.

Tomando en cuenta que la interfaz HMI cuenta con hardware de conectividad inalámbrica, una actualización natural es la incorporación de protocolos de comunicación ligeros como MQTT. El envío de información directamente a la nube facilitaría el registro de históricos, la generación de gráficas en vivo y la supervisión del equipo desde cualquier ubicación remota.

Referencias

- [1] Y. Zhang, S. Deng, J. Ni, L. Zhao, X. Yang, and M. Li, "A literature research on feasible application of mixed working fluid in flexible distributed energy system," *Energy*, vol. 137, pp. 377–390, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.03.141.
- [2] B. G. Miller, "Particulate Formation and Control Technologies," in *Clean Coal Engineering Technology*, Elsevier, 2017, pp. 419–465. doi: 10.1016/B978-0-12-811365-3.00008-9.
- [3] D. Thiemsakul, R. Piemjaiswang, T. Sema, Y. Feng, P. Piumsomboon, and B. Chalermssinsuwan, "Effect of hydrocyclone design in microplastics-water separation by using computational fluid dynamics simulations," *Results in Engineering*, vol. 22, p. 102034, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102034.
- [4] R. C. Flagan and H. H. Seinfeld, *Fundamentals of Air Pollution Engineering*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc, 1988.
- [5] M. Durango-Cogollo, J. Garcia-Bravo, B. Newell, and A. Gonzalez-Mancera, "CFD Modeling of Hydrocyclones—A Study of Efficiency of Hydrodynamic Reservoirs," *Fluids*, vol. 5, no. 3, p. 118, Jul. 2020, doi: 10.3390/fluids5030118.
- [6] G. A. Gerolymos and I. Vallet, "Entropy Fluctuations and Correlations in Compressible Turbulent Plane Channel Flow," *Entropy*, vol. 26, no. 6, p. 530, Jun. 2024, doi: 10.3390/e26060530.
- [7] G. Alfonsi, "Reynolds-Averaged Navier–Stokes Equations for Turbulence Modeling," *Appl. Mech. Rev.*, vol. 62, no. 4, Jul. 2009, doi: 10.1115/1.3124648.
- [8] T. H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, "A New k-epsilon Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows," *Comput. Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238, 1995.
- [9] K. Elsayed and C. Lacor, "The effect of cyclone inlet dimensions on the flow pattern and performance," *Appl. Math. Model.*, vol. 35, no. 4, pp. 1952–1968, 2011.

- [10] M. D. Slack, R. O. Prasad, A. Bakker, and F. Boysan, "Advances in Cyclone Modelling Using Unstructured Grids," *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 78, no. 8, pp. 1098–1104, 2000.
- [11] A. Hoekstra, "Gas Flow Field and Collection Efficiency of Cyclone Separators ," 2000.
- [12] K. Elsayed and C. Lacor, "The Effect of the Dust Outlet Geometry on the Performance and Hydrodynamics of Gas Cyclones," *Comput. Fluids*, vol. 68, pp. 134–147, 2012.
- [13] Carlos Alberto Echeverri Londoño, "Revista ingenierías,"
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1692-33242006000200011#tb2, 2002.
- [14] L. S. Brar, R. P. Sharma, and K. Elsayed, "The effect of the cyclone length on the performance of Stairmand high-efficiency cyclone," *Powder Technol.*, vol. 286, pp. 668–677, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.powtec.2015.09.003.
- [15] P. Rosin and Rammler E., "The law governing the fineness of powdered coal.," *Journal of the Institute of Fuel*, vol. 7, pp. 29–36, 1933.
- [16] B. Zhao, "Development of a new method for evaluating cyclone efficiency," *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 44, no. 4, pp. 447–451, Apr. 2005, doi: 10.1016/j.cep.2004.06.007.
- [17] J. J. Derksen, "Separation performance predictions of a Stairmand high-efficiency cyclone.," *AIChE Journal*, pp. 1359–1371, 2003.
- [18] "ANSYS Fluent Theory Guide," 2025.
- [19] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Pearson Education, 2007.
- [20] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9th ed. John Wiley & Sons, 2017.

- [21] R. H. Myers, D. C. Montgomery, and C. M. Anderson-Cook, *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, 4th ed. John Wiley & Sons, 2016.
- [22] K. Elsayed, "Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using Co-Kriging," *Powder Technol.*, vol. 269, pp. 409–424, 2015.
- [23] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, 2002, doi: 10.1109/4235.996017.
- [24] J. Blank and K. Deb, "pymoo: Multi-Objective Optimization in Python," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 89497–89509, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2990567.
- [25] K. Deb and R. B. Agrawal, "Simulated Binary Crossover for Continuous Search Space," *Complex Systems*, vol. 9, no. 2, pp. 115–148, 1995.

Apéndices