

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

"Diseño y análisis de sistemas de limpieza para ciclos de CO₂ transcrito aplicados a almacenamiento de energía geológica"

Autor: Fernando de la Haba Medina

Tutor: Ricardo Chacartegui Ramírez

Dpto. de Ingeniería energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Industrial

**"Diseño y análisis de sistemas de limpieza para
ciclos de CO₂ transcrito aplicados a
almacenamiento de energía geológico"**

Autor:

Fernando de la Haba Medina

Tutor:

Ricardo Chacartegui Ramírez

Catedrático de Universidad

Dpto. de Ingeniería Energética

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022

Proyecto Fin de Carrera: "Diseño y análisis de sistemas de limpieza para ciclos de CO2 transcrito aplicados a almacenamiento de energía geológico"

Autor: Fernando de la Haba Medina
Tutor: Ricardo Chacartegui Ramírez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El secretario del Tribunal

A mi familia
A mis maestros

Agradecimientos

Al finalizar esta etapa tan significativa de mi vida académica, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han sido fundamentales en este viaje.

En primer lugar, quiero agradecer de todo corazón a mis padres, cuyo apoyo incondicional y amor constante han sido mi mayor fuente de fortaleza y motivación. Sin su respaldo, este logro no habría sido posible.

También quiero agradecer a mis amigos, quienes han estado a mi lado en los momentos más cruciales, brindándome su aliento y compañía. En especial, quiero mencionar a Javier, con quien he compartido innumerables horas de estudio. Nuestra etapa universitaria ha sido un recorrido conjunto, a pesar de estar en cursos diferentes, y me siento afortunado de haber culminado trabajando juntos. Su amistad y colaboración han sido invaluable para mí.

Además, deseo expresar mi gratitud a mi tutor, Ricardo, por darme la oportunidad de trabajar con él. Su guía y confianza me han permitido formar parte de un equipo de ingenieros capaz de llevar a cabo un proyecto desde cero. Su dedicación y apoyo han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo, y su influencia ha sido inspiradora para mi crecimiento profesional.

A todos ustedes, gracias por haber hecho de este viaje una experiencia inolvidable y por haber contribuido de manera tan significativa a la culminación de este logro

Fernando de la Haba Medina
Sevilla, 2024

Resumen

La búsqueda de métodos innovadores para la captura y utilización de CO₂, así como nuevas tecnologías de almacenamiento de energía de gran capacidad es crucial para mitigar el cambio climático y reducir la dependencia de combustibles fósiles.

Este trabajo de fin de máster se centra en el estudio y diseño de sistemas de limpieza de flujos en una novedosa tecnología de almacenamiento de energía que integra CO₂ transcrítico y almacenamiento geológico, que almacena CO₂ en el subsuelo en el proceso de carga y lo recupera en el proceso de descarga. El proyecto se desarrolla en el marco del proyecto de investigación Horizon Europe CEEGS.

En este contexto se aborda la captura de CO₂ en cavidades salinas para su posterior utilización en la generación de energía. Las corrientes de CO₂ arrastrarán partículas y compuestos que pueden dañar los sistemas de producción de potencia (compresores, turbinas, intercambiadores).

En este trabajo se han evaluado diferentes sistemas de limpieza de corrientes de CO₂, como sistemas auxiliares para un sistema de almacenamiento de energía de este tipo, diseñados y adaptados a la escala y modo de operación.

Los sistemas diseñados muestran una elevada capacidad de eliminación de partículas minimizando el impacto de las impurezas sobre el bloque de producción de potencia.

Abstract

The search for innovative methods for the capture and use of CO₂, as well as new high-capacity energy storage technologies, is crucial to mitigate climate change and reduce dependence on fossil fuels. This master's thesis focuses on the study and design of flow cleaning systems in a novel energy storage technology that integrates transcritical CO₂ and geological storage, which stores CO₂ in the subsoil in the loading process and recovers it in the unloading process. The project is developed within the framework of the Horizon Europe CEEGS research project. In this context, the capture of CO₂ in saline cavities for its subsequent use in energy generation is addressed. CO₂ streams will carry particles and compounds that can damage power production systems (compressors, turbines, exchangers). In this work, different CO₂ stream cleaning systems have been evaluated, as auxiliary systems for an energy storage system of this type, designed and adapted to the scale and mode of operation. The systems designed show a high particle removal capacity, minimizing the impact of impurities on the power production block.

Agradecimientos	ix
Resumen	x
Abstract	xii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
Notación	xx
1 Introducción	1
1.1 <i>Motivación y justificación del Proyecto</i>	1
1.2 <i>Objetivos del proyecto</i>	3
2 Fundamentos	4
2.1 <i>Necesidad de almacenamiento de energía</i>	4
2.2 <i>Estado del arte</i>	4
2.3 <i>Funcionamiento del sistema del proyecto CEEGS</i>	10
3 Modelado de geometrías	12
3.1 <i>Cámara de sedimentación</i>	13
3.2 <i>Cámara de choque</i>	17
3.3 <i>Ciclón</i>	20
4 Análisis fluidodinámico en ANSYS	25
4.1 <i>Descripción del método de elementos finitos</i>	25
4.1.1 <i>Definición del Problema</i>	25
4.1.2 <i>Creación de la Geometría</i>	25
4.1.3 <i>Mallado</i>	26
4.1.4 <i>Configuración de la Simulación</i>	26
4.1.5 <i>Solución del Modelo</i>	27
4.1.6 <i>Post-procesamiento</i>	27
4.1.7 <i>Informe de Resultados</i>	28
4.1.8 <i>Optimización y Refinamiento</i>	28
4.2 <i>Cámara de sedimentación</i>	28
4.2.1 <i>Análisis del dominio 2D</i>	28
4.2.2 <i>Análisis del dominio 3D</i>	44
4.2.3 <i>Conclusiones: Ventajas e inconvenientes</i>	50

4.3	<i>Cámara de choque</i>	52
4.3.1	Análisis del dominio 2D	52
4.3.2	Análisis del dominio 3D	60
4.3.3	Conclusiones: Ventajas e inconvenientes	66
4.4	<i>Ciclón</i>	67
4.4.1	Conclusiones: Ventajas e inconvenientes	68
4.5	<i>Conjuntos de sistemas de limpieza</i>	69
4.5.1	Cámara de sedimentación con ciclón en serie	69
4.5.2	Cámara de choque con ciclón en serie	76
5	Procesamiento de datos del análisis en Python	83
5.1	<i>Análisis de velocidades de la cámara de sedimentación</i>	83
5.2	<i>Análisis de velocidades de la cámara de choque</i>	85
6	Conclusiones	87
6.1	<i>Desarrollos futuros</i>	87
7	Bibliografía	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades de la corriente de CO ₂	12
Tabla 2: Dimensiones del ciclón diseñado	22
Tabla 3: Modelos de viscosidad	35
Tabla 4: Tabla resumen de la configuración del análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación	47
Tabla 5: Resultados de la simulación de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación.....	48
Tabla 6: Tabla resumen de la configuración utilizada para la simulación de la cámara de choque tridimensional	63
Tabla 7: Tabla resumen de la configuración utilizada en la simulación del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie	73
Tabla 8: Resultados de la simulación del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie.....	74
Tabla 9: Tabla resumen de la configuración utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie	79
Tabla 10: Resultados de la simulación del conjunto cámara de choque 7 ciclón en serie.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema con los principales equipos del sistema del proyecto CEEGS (Geological Scenarios and Their Characteristics, n.d.).....	10
Figura 2: Distribución de Weibull de las partículas simuladas	13
Figura 3: Esquema de una cámara de sedimentación [1].....	14
Figura 4: Geometría plana de la cámara de sedimentación diseñada	15
Figura 5: Geometría tridimensional de la cámara de sedimentación diseñada	16
Figura 6: Esquema de una cámara de choque [2].....	17
Figura 7: Geometría tridimensional de la cámara de choque diseñada	18
Figura 8: Geometría plana de la cámara de choque diseñada.....	19
Figura 9: Geometría tridimensional de la cámara de choque y el adaptador de entrada diseñados.....	20
Figura 10: Tabla de proporciones de diferentes tipos de ciclón	21
Figura 11: Preforma del ciclón diseñado	22
Figura 12: Forma final del ciclón diseñado	23
Figura 13: Geometría de los diferentes adaptadores diseñados.....	24
Figura 14: Boceto de la geometría plana de la cámara de sedimentación diseñada	29
Figura 15: Dominio bidimensional del análisis de elementos finitos de la cámara de sedimentación.....	29
Figura 16: Opciones del “Edge Sizing” del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación	30
Figura 17: Mallado utilizado en el análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación	31
Figura 18: Aspect Ratio de la malla de la figura (16)	32
Figura 19: Orthogonal Quality de la malla de la figura (16)	32
Figura 20: Named Selections del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación	33
Figura 21: Interfaz de ANSYS Workbench en el setup de Fluidflow (Fluent).....	34
Figura 22: Residuos del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación	39
Figura 23: Reportes de “Escaped Mass” en los diferentes depósitos y en la salida de gases de la cámara de sedimentación	39
Figura 24: Trayectoria de las partículas en la cámara de sedimentación bidimensional	40
Figura 25: Trayectorias de las partículas de gas en la cámara de sedimentación bidimensional	41
Figura 26: Gráfica de caudal masico de partículas en varias superficies frente a tamaño de elemento del mallado.....	42
Figura 27: Gráficas de error relativo cometido para las cuatro superficies de interés	43

Figura 28 Gráfica de error relativo total de los diferentes “Collection bin” frente a tamaño de elemento de malla	44
Figura 29: Mallado utilizado en el análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación	45
Figura 30: Parámetros de calidad de malla para el análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación	46
Figura 31: Reportes de “Escaped Mass” de las diferentes superficies de interés	48
Figura 32: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de sedimentación tridimensional	49
Figura 33: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en la cámara de sedimentación tridimensional.....	50
Figura 34: Geometría plana de la cámara de choque	52
Figura 35: Aristas de la cámara de choque a las que se le aplica el “Edge sizing”	53
Figura 36: Mallado utilizado para la simulación de la geometría bidimensional de la cámara de choque	54
Figura 37: “Named Selections” declaradas para la simulación de la geometría bidimensional de la cámara de choque	54
Figura 38: Parámetros de calidad de la malla utilizada para la simulación de la cámara de choque bidimensional.....	55
Figura 39: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque bidimensional	56
Figura 40: “Escaped Mass” por la salida de gases de la cámara de choque bidimensional	57
Figura 41: “Escaped Mass” por el depósito de sólidos de la cámara de choque bidimensional	57
Figura 42: Residuos de la simulación de la cámara de choque bidimensional	58
Figura 43: Contorno de velocidades del gas en la cámara de sedimentación bidimensional.....	58
Figura 44: Gráfico de caudal de polvos que escapan por las superficies de interés frente a tamaño de elemento de la malla	59
Figura 45: Gráfico de errores relativos frente a tamaño de elemento de malla.....	60
Figura 46: Mallado utilizado para la simulación de la geometría tridimensional de la cámara de choque	61
Figura 47: Parámetros de calidad de la malla para la discretización de la cámara de choque tridimensional	61
Figura 49: Reporte de caudal masico escapado por la superficie de salida de la cámara de choque.....	64
Figura 50: Reporte de caudal masico escapado por la superficie de depósito de la cámara de choque	64
Figura 51: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque tridimensional	65
Figura 52: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en la cámara de choque tridimensional.....	65
Figura 53: Dominio simulado para el conjunto de cámara de sedimentación y ciclón en serie	70
Figura 54: Ratio de aspecto para el mallado utilizado para la simulación del conjunto de la cámara de sedimentación y ciclón en serie	71
Figura 55: Ortogonalidad para el mallado utilizado para la simulación del conjunto de la cámara de sedimentación y ciclón en serie	72
Figura 56: Reportes de caudales masicos escapados por las diferentes superficies de interés del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie.....	74
Figura 57: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie	75

Figura 58: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en el conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie.....	76
Figura 59: Dominio simulado para el conjunto de cámara de choque y ciclón en serie	77
Figura 60: Ratio de aspecto de la malla utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie.....	78
Figura 61: Ortogonalidad de la malla utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie.....	78
Figura 62: Reportes de caudal masico escapado por las superficies de interés del conjunto cámara de choque y ciclón en serie	80
Figura 63: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de choque y ciclón en serie	81
Figura 64: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de choque y ciclón en serie	81
Figura 65: Gráficas de caudales masicos escapados por las superficies de interés en la cámara de sedimentación frente a velocidad de operación	84
Figura 66: Gráficas de caudales masicos escapados por las superficies de interés en la cámara de choque frente a velocidad de operación.....	85
Figura 67: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque bidimensional para el caso de velocidad de operación 6m/s	86

$Q_{descarga}$	Caudal volumétrico de descarga
$V_{descarga}$	Velocidad de la descarga
t	Tiempo de descarga
A_{es}	Área del conducto de entrada de la cámara de sedimentación
v_{es}	Velocidad en el conducto de entrada de la cámara de sedimentación
A_{ec}	Área del conducto de entrada de la cámara de choque
v_{ec}	Velocidad en el conducto de entrada de la cámara de choque
$A_{conducto}$	Área del conducto de entrada del ciclón
D_c	Diámetro del ciclón
a	Altura del conducto de entrada del ciclón
b	Anchura del conducto de entrada del ciclón
S	Longitud del conducto interno de salida
D_s	Diámetro de la tubería de salida
h	Altura de la parte cilíndrica del ciclón
z	Altura de la parte cónica del ciclón
H	Altura total del ciclón
B	Diámetro del conducto de salida de partículas

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación y justificación del Proyecto

La captura y almacenamiento de dióxido de carbono (CO₂) en cavidades salinas se presenta como una solución prometedora para mitigar el cambio climático al reducir la concentración de CO₂ en la atmósfera. Sin embargo, para garantizar la eficiencia y viabilidad a largo plazo de este proceso, es crucial abordar los desafíos relacionados con la limpieza de las corrientes de CO₂. Las corrientes de CO₂ provenientes de cavidades salinas pueden contener impurezas y sólidos que deben ser eliminados antes de su uso en aplicaciones térmicas y de generación de energía, como turbinas, compresores e intercambiadores de calor. Estas impurezas pueden provocar desgaste y deterioro de equipos, reducción de eficiencia y obstrucciones que causan fallos operativos.

Para abordar estos desafíos, se han desarrollado varios métodos de limpieza de corrientes de CO₂. Entre estos métodos, la filtración mecánica es una opción común que utiliza materiales porosos, mallas y tamices para capturar partículas sólidas. Otro método eficaz es el uso de separadores ciclónicos, que emplean la fuerza centrífuga para separar partículas sólidas del CO₂. Por otro lado, los precipitadores electrostáticos aplican una carga eléctrica a las partículas sólidas, atrayéndolas hacia placas colectoras donde se depositan y eliminan. Los lavadores de gases utilizan líquidos para lavar las impurezas de la corriente de CO₂, eliminando tanto partículas sólidas como algunos contaminantes gaseosos. Por último, los separadores inerciales y cámaras de sedimentación y choque utilizan tanto la gravedad como efectos de la inercia en partículas sólidas para desviarlas y separarlas del caudal de gases.

Mediante el uso de herramientas de simulación avanzadas, como ANSYS, se pueden modelar y analizar diferentes sistemas de limpieza para optimizar su rendimiento. Los estudios de simulación con elementos finitos permiten evaluar la eficiencia de eliminación de sólidos de cada método, analizar la pérdida de carga y el impacto en la operación de los sistemas, y determinar la viabilidad económica de implementar y operar estos sistemas a largo plazo. Este enfoque es adecuado para identificar las soluciones más eficaces y eficientes para garantizar la pureza y calidad del CO₂ capturado, minimizando al mismo tiempo el impacto en la operación de los sistemas.

Para garantizar la pureza y calidad del CO₂ capturado, es necesario implementar soluciones eficaces de limpieza en el diseño y operación de sistemas de captura de CO₂. Integrar múltiples métodos de limpieza, como la combinación de filtración mecánica, separación ciclónica y otros métodos, puede maximizar la eliminación de sólidos. Además, la implementación de sistemas de monitoreo para detectar la acumulación de sólidos y realizar mantenimiento preventivo es crucial para mantener la eficiencia operativa. La optimización continua, basada en datos de operación y resultados de simulación, permite ajustar y mejorar los sistemas de limpieza de manera constante.

Estas soluciones no solo contribuyen a optimizar el rendimiento del proceso, sino que también impulsan el avance hacia un futuro más sostenible y resiliente. La implementación de sistemas de limpieza eficaces en la captura y almacenamiento de CO2 en formaciones geológicas no solo facilita la inclusión de las energías renovables en el mercado, sino que también juega un papel crucial en la lucha contra el cambio climático, proporcionando una alternativa viable y sostenible para la reducción de emisiones de CO2 en la atmósfera.

1.2 Objetivos del proyecto

Como se ha mencionado anteriormente, los objetivos de este trabajo incluyen el prediseño y el estudio de la viabilidad de sistemas que proporcionen soluciones a los problemas asociados con la extracción de corrientes gaseosas del subsuelo, pues estas corrientes a menudo contienen impurezas en forma de partículas sólidas que pueden dañar equipos sensibles.

En este trabajo de fin de máster, se llevará a cabo un estudio exhaustivo de varias geometrías de separadores diseñadas partiendo de soluciones ya funcionales. Estas geometrías serán analizadas utilizando software de simulación como ANSYS, tanto en 2D como en 3D.

Se realizarán análisis de los datos obtenidos de las simulaciones para determinar la realismo de los resultados y establecer los límites operativos de cada diseño. Esto incluirá consideraciones sobre velocidades de flujo, tamaño de partículas y caudales. El objetivo será el de proporcionar recomendaciones claras sobre la implementación de cada diseño y sus capacidades en condiciones reales de operación.

La simulación y el análisis mediante herramientas como Fusion 360 para el modelado en 2D y 3D, ANSYS para el análisis de elementos finitos y Python para el procesamiento de datos, permiten una evaluación de los diseños propuestos, asegurando que sean optimizados en términos de rendimiento. Este enfoque proporciona una base para futuras investigaciones y desarrollos en el campo del almacenamiento de energía basados en aplicaciones geológicas.

2 FUNDAMENTOS

2.1 Necesidad de almacenamiento de energía

En el contexto actual en el que se está llevando a cabo una transición hacia un sistema energético más sostenible y con mayor capacidad de adaptarse a diferentes situaciones de demanda, el almacenamiento de energía ha emergido como un componente fundamental para abordar una serie de desafíos clave:

- **Integración de energías renovables:** Con el aumento de la potencia instalada de energías renovables, como la solar y la eólica, se enfrenta el desafío de gestionar su intermitencia. La energía solar solo está disponible durante el día y la energía eólica depende de las condiciones climáticas. El almacenamiento de energía permite mitigar esta intermitencia al almacenar el exceso de energía generada cuando las condiciones son favorables y liberarla cuando sea necesario.
- **Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero:** La transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables es fundamental para combatir el cambio climático. El almacenamiento de energía facilita la integración de estas fuentes al proporcionar flexibilidad y estabilidad al sistema energético, lo que ayuda a reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas.
- **Mejora de la fiabilidad y resiliencia del sistema eléctrico:** Los eventos climáticos extremos y las perturbaciones en la red eléctrica pueden causar apagones y problemas de suministro. El almacenamiento de energía proporciona una fuente de energía de respaldo que puede activarse rápidamente para estabilizar la red y mantener el suministro de energía en situaciones de emergencia.
- **Optimización de la gestión de la demanda energética:** Como se ha comentado en un punto anterior el almacenamiento de energía permite almacenar energía durante períodos de baja demanda y liberarla durante períodos de alta demanda, lo que ayuda a nivelar la carga en la red eléctrica. Esto puede reducir los costos de operación y mejorar la eficiencia del sistema energético en general.

2.2 Estado del arte

Como se ha comentado en el apartado anterior el almacenamiento de energía es un desafío que es fundamental afrontar para conseguir dar el paso hacia un sistema energético mucho más eficiente y capaz de adaptarse a los cambios. En este sentido se están investigando e implementando ya desde hace tiempo los siguientes sistemas de almacenamiento:

- Baterías eléctricas: dispositivos que convierten la energía química en energía eléctrica por medio, generalmente de reacciones de redox, si se consigue que estas reacciones sean reversibles la batería tendrá más de un uso (baterías recargables).

Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las baterías de iones de litio, que son ampliamente empleadas en vehículos eléctricos, sistemas de respaldo de energía en hogares y aplicaciones portátiles debido a su alta densidad energética y larga vida útil, los fabricantes suelen estimarla en unos 10 o 15 años. Por otro lado, las baterías de plomo-ácido son más económicas y adecuadas para aplicaciones estacionarias como sistemas de respaldo en telecomunicaciones y almacenamiento en red. Finalmente, las baterías níquel-cadmio, aunque menos comunes, se utilizan en aplicaciones industriales que requieren alta durabilidad y resistencia.

Un factor que tienen en común todas estas baterías es que van perdiendo capacidad de carga con el uso por lo que se van degradando y finalmente llega un punto en el que la carga tarda prácticamente lo mismo que la descarga. Además, todas ellas tienen una eficiencia que se calcula como la relación entre la energía que absorben en la carga y la que ceden en la descarga, es esta eficiencia la que ira descendiendo a medida que se desarrolle su ciclo de vida. Este rendimiento dependerá de aspectos de fabricación como los materiales con los que se construya (materiales del ánodo y del cátodo), de la temperatura a la que opere, la velocidad de carga y descarga, etc.

Este tipo de almacenamiento no se contempla para acumular grandes cantidades de energía por varias razones:

- Densidad energética: este parámetro se refiere a la cantidad de energía que puede almacenar una batería por cada unidad de masa que tiene (Wh/kg). Las baterías eléctricas, aunque tienen una densidad energética alta, esta no es suficiente como para almacenar grandes cantidades de energía. Sería mucho más ventajoso en términos de masa y volumen almacenar energía en forma de agua a cierta altura (embalse) que almacenar la misma cantidad en baterías eléctricas.
- Ciclo de vida y degradación: como se ha comentado anteriormente las baterías eléctricas tienen una vida útil limitada y una gran parte de su ciclo de vida operan con una capacidad por debajo de su capacidad nominal debido a la degradación y pérdida de rendimiento. Además, no son aptas para el almacenamiento de energía a largo plazo ya que se autodescargan sin necesidad de ser utilizadas.
- Coste: el desembolso inicial para crear un sistema de almacenamiento de energía equiparable a un sistema térmico es muy grande, especialmente si se trata de baterías de iones de litio, que serían las más recomendables por ser también las más eficientes.
- Impacto ambiental: la producción y disposición de baterías tienen un impacto ambiental considerable. La minería de materiales necesarios, como el litio, cobalto y níquel, puede ser

perjudicial para el medio ambiente, y el reciclaje de baterías usadas aún presenta desafíos técnicos y económicos. Como ejemplo, para fabricar una batería de un vehículo eléctrico sería necesario remover más de 500 toneladas de mineral solo para conseguir la cantidad de litio necesaria.

- Almacenamiento hidroeléctrico: esta tecnología aprovecha la energía potencial del agua almacenada en embalses elevados. Las centrales de bombeo durante los períodos de baja demanda de electricidad o exceso de generación renovable bombean agua hacia un embalse superior utilizando bombas eléctricas. Cuando se necesita energía adicional, el agua se deja fluir de vuelta hacia un embalse inferior a través de turbinas hidroeléctricas, generando electricidad. Este método es relativamente eficiente y escalable, con una capacidad de almacenamiento significativa y tiempos de respuesta rápidos. El rendimiento del ciclo de bombeo dependerá fundamentalmente de la eficiencia de las bombas y turbinas y de la instalación para la subida y bajada del agua del embalse. Como desventajas de este tipo de almacenamiento resaltan las pérdidas de energía por evaporación del agua, los tiempos prolongados de construcción de una central, los particulares requisitos geográficos para la localización de centrales hidroeléctricas y el impacto ambiental.
- Almacenamiento térmico: el almacenamiento térmico implica capturar y almacenar energía en forma de calor utilizando materiales específicos como sales fundidas, agua o piedras calientes. Mas tarde esta energía térmica almacenada se utiliza para generar electricidad mediante ciclos termodinámicos, como el ciclo Rankine de las turbinas de vapor, o para aplicaciones de calefacción y refrigeración industrial y residencial. El tipo de almacenamiento térmico más ampliamente utilizado son las sales fundidas ya que es fácilmente integrable con centrales termosolares de colector cilindro parabólico, fresnel lineal y especialmente con las centrales de torre solar ya que no necesitan de un circuito secundario con un fluido caloportador (HTF) que circule por la instalación, sino que la propia torre contiene un circuito de sales fundidas que se pasan de un depósito a baja temperatura a otro con alta temperatura. Este salto térmico se consigue obviamente con la energía solar que se concentra con los diferentes métodos: heliostatos, espejos planos tipo fresnel o colectores cilindro parabólicos. El hecho de que las centrales de torre solar no necesiten este circuito secundario genera ciertas ventajas ya que se evitan las pérdidas de rendimiento debidas a la existencia de ese circuito secundario. Aun así, este tipo de almacenamiento genera muchos retos tecnológicos que aún hoy en día se están intentando resolver.

Operar con temperaturas altas y diferentes materiales en una misma zona genera muchos problemas de tensiones por restricciones en las dilataciones tanto en los depósitos de sales como en los tubos en los que se concentra la radiación solar, esto causa roturas y por tanto fugas de fluidos (sales fundidas o HTF) que son costosas de reparar y además generan un gran impacto ambiental. La operación con sales fundidas es complicada para los periodos en los que no se produce energía, pues estas sales a menos de 200°C se solidifican por lo que su temperatura durante periodos de almacenamiento debe mantenerse por encima de este umbral para poder generar energía cuando sea necesario a partir del calor acumulado en estas.

Por otro lado, también existen formas de almacenamiento termoquímico de energía, este tipo de almacenamiento se basa en la generación de ciertas reacciones químicas reversibles (endotérmicas y exotérmicas) para reservar energía en forma de los productos de estas reacciones. Una de las técnicas más investigadas en los últimos años es el Calcium Looping o ciclos de calcinación y carbonatación de carbonato cálcico y óxido de calcio respectivamente. La calcinación del carbonato cálcico es una reacción química que requiere energía y que la absorberá cuando haya excedentes de energía, por otro lado, su inversa, la carbonatación del óxido de calcio es una reacción que cede energía, aunque no se da de manera espontánea a no ser que se tengan unas ciertas condiciones de temperatura.

- Hidrógeno: el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno implica la producción de hidrógeno mediante electrólisis de agua, un proceso electroquímico a través del cual se separan los componentes básicos de esta (hidrógeno y oxígeno). Los principales problemas que presenta el almacenamiento de energía en forma de hidrógeno se describen a continuación:
 - Condiciones de almacenamiento: para almacenar hidrógeno en forma gaseosa se requiere una compresión considerable, llegando hasta los 700bar. En caso de que el almacenamiento se realice con hidrógeno en estado líquido, las temperaturas de almacenamiento deben estar por debajo de los -200°C , ambas formas requieren mucha energía y recipientes contenedores muy específicos, capaces de soportar la presión y muy aislados térmicamente.
 - Materiales para su almacenamiento: los materiales con los que se construyan los depósitos deben ser de materiales muy resistentes y estar especialmente reforzado.
 - Seguridad: el hidrógeno es un elemento altamente inflamable, la existencia de depósitos presurizados de este elemento supone un serio riesgo de explosiones y combustiones no deseadas.
 - Fugas y pérdidas: el hidrógeno es el átomo más pequeño de la tabla periódica, por tanto, se difunde con facilidad a través de los materiales y fragilizarlos, además de perder con ello masa de combustible y en consecuencia energía.
 - Coste: los procesos de compresión y licuado del hidrógeno tienen actualmente un coste elevado

El hidrógeno producido se puede almacenar y utilizar en celdas de combustible para generar electricidad cuando sea necesario, o como combustible en aplicaciones de transporte y sector industrial. Aunque como se ha mencionado anteriormente el proceso de producción de hidrógeno es actualmente costoso, ofrece una alta densidad energética y es una opción prometedora para el almacenamiento a largo plazo y la integración de energías renovables intermitentes.

Finalmente, el sistema que se trata en este trabajo forma parte de un tipo de almacenamiento de energía llamado CAES por sus siglas en inglés (Compressed Air Energy Storage). Esta tecnología que permite almacenar energía en forma de aire comprimido en grandes cavernas subterráneas o contenedores y al igual

que todas las anteriores permite almacenar energía en periodos de baja demanda y generarla en periodos con picos de demanda. El funcionamiento de este tipo de sistemas consta de las siguientes tres fases:

- **Compresión:** Durante los periodos de baja demanda eléctrica o cuando hay exceso de energía (por ejemplo, de fuentes renovables intermitentes como solar o eólica), se usa electricidad sobrante de la red para comprimir aire y almacenarlo en una caverna subterránea o en grandes tanques.
- **Almacenamiento:** El aire comprimido se mantiene a alta presión en estas cavernas o tanques hasta que sea necesario, minimizando siempre las fugas para evitar la contaminación y la pérdida de energía. En esta fase también se intercambia calor con el terreno, lo cual hace que el salto entálpico en las turbinas en la fase de generación de energía sea mayor.
- **Expansión y Generación:** Cuando se requiere electricidad, el aire comprimido a alta presión se libera y se conduce al sistema de producción de potencia, expandiéndose a través de una turbina que genera electricidad.

Los sistemas de almacenamiento de energía mediante aire comprimido (CAES) presentan varias ventajas significativas. En primer lugar, destacan por su capacidad de almacenamiento a gran escala, siendo una de las pocas tecnologías capaces de manejar grandes cantidades de energía. Esto los convierte en una opción ideal para equilibrar la intermitencia inherente de las energías renovables como la solar y la eólica. Por otro lado, al almacenar energía durante los periodos de exceso de producción y liberarla durante los momentos de alta demanda, los sistemas CAES ayudan a estabilizar la red eléctrica. Además, estos sistemas tienen una larga vida útil, permitiendo numerosos ciclos de carga y descarga sin una significativa degradación, lo que los hace muy fiables a largo plazo. Una vez instalados, los costos operativos de los sistemas CAES son relativamente bajos en comparación con otras formas de almacenamiento de energía. Por último, la eficiencia de estos sistemas puede mejorarse mediante la recuperación de calor, elevando la eficiencia total a niveles competitivos con otras tecnologías de almacenamiento.

No obstante, los sistemas CAES también tienen varias desventajas importantes. Una de las principales es su eficiencia energética limitada, que suele ser inferior a la de otras tecnologías de almacenamiento. Esta menor eficiencia puede hacer que no sean la opción más adecuada en todas las circunstancias. Además, la implementación de sistemas CAES requiere condiciones geológicas muy específicas, como la disponibilidad de cavernas subterráneas adecuadas para el almacenamiento de aire comprimido, lo que puede limitar su instalación a determinadas áreas. Los costos iniciales de construcción e infraestructura de estos sistemas pueden ser muy elevados, especialmente si se necesitan cavernas subterráneas especialmente diseñadas para este tipo de almacenamiento, lo que representa una barrera financiera significativa.

En (Carro et al., 2021) se exponen los principales equipos utilizados en un sistema de CAES y se comentan los ciclos de carga y descarga de estos.

Finalmente, dado que en varios de estos sistemas de almacenamiento la generación de energía se realiza utilizando turbinas de vapor y estas deben de trabajar con unos ciertos requerimientos de pureza en el fluido que las propulsa, se observa una necesidad de disponer sistemas que aseguren los requisitos de limpieza mencionados.

En (Wilcox et al., 2012) se muestran algunos sistemas de limpieza de corrientes de gas utilizados en instalaciones que involucran turbinas de vapor y se desarrolla el tipo de efecto que causan las partículas sobre los alabes de las turbinas en función de su tamaño, así como las principales formas de deterioro de estos; la erosión, el ensuciamiento y la corrosión.

2.3 Funcionamiento del sistema del proyecto CEEGS

En este apartado se explicará el funcionamiento del sistema de almacenamiento del proyecto CEEGS, del cual surge la necesidad de estudiar y prediseñar los diferentes sistemas de limpiezas y en el que participa el Grupo de Máquinas y Motores Térmicos de la Universidad de Sevilla y dentro del cual se desarrolla este TFM

CEEGS es un proyecto que se está llevando a cabo a nivel europeo, cuyo objetivo es investigar el almacenamiento de energía en forma de gas comprimido, CO_2 , en cavidades salinas y comprobar su viabilidad tanto técnica como económica. Esta forma de almacenamiento es conocida como CAES (Compressed Air Energy Storage) aunque en este caso lo que se utiliza no es aire comprimido sino CO_2 , con esto además de almacenamiento de energía para una mayor integración de fuentes renovables en la red eléctrica se consigue también capturar el dióxido de carbono de industrias que lo produzcan como residuo y utilizarlo para un propósito ventajoso. De esta manera se consigue limitar el impacto ambiental del CO_2 en dos frentes diferentes: al implicar fuentes de energía renovables se reduce el consumo de combustibles fósiles y la producción de dióxido de carbono y, por otro lado, también se captura CO_2 proveniente de la industria de manera que este no cause efectos perjudiciales para la atmosfera.

En la siguiente figura (1) que se presenta en el entregable 2.1 de este proyecto (Geological Scenarios and Their Characteristics, nd.) se muestra un esquema con los principales equipos del sistema.

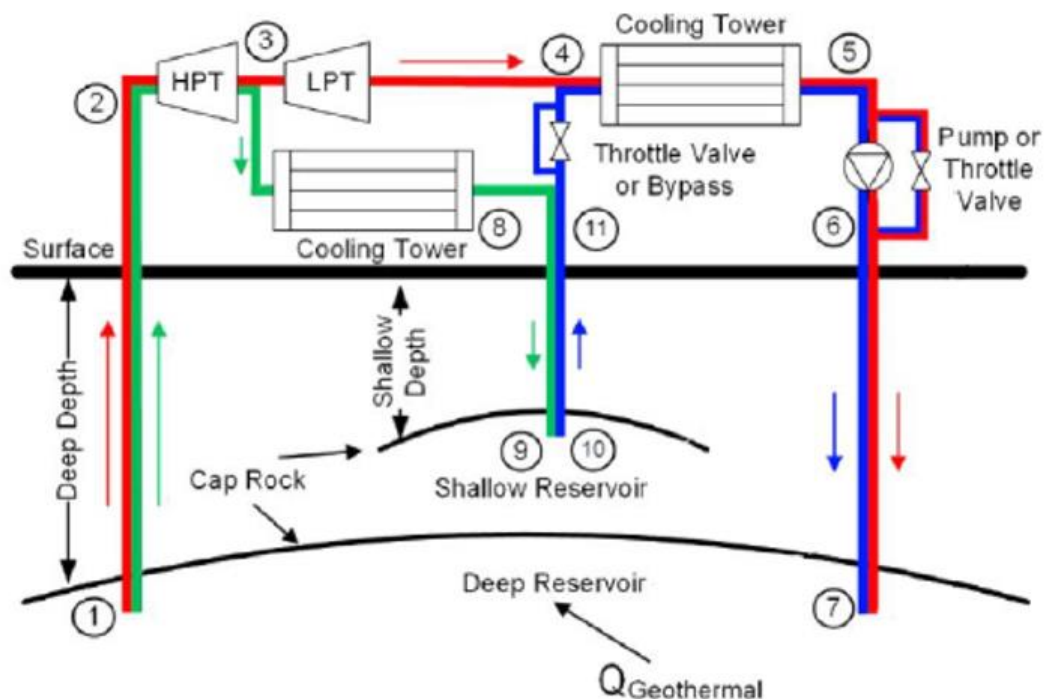


Figura 1. Esquema con los principales equipos del sistema del proyecto CEEGS (Geological Scenarios and Their Characteristics, n.d.)

En esta imagen además de mostrarse los equipos se puede observar la disposición de estos, todos ellos se encuentran en la superficie y las cavidades que se encuentran en el subsuelo solo se utilizan como depósito para mantener el gas presurizado dentro de ellas. Los equipos que se encuentran en este esquema básico son turbinas

de alta y baja presión (HPT y LPT), compresores, válvulas que en este caso sirven para realizar bypass o arrancar los compresores con menor carga y finalmente intercambiadores de calor, en este caso torres de refrigeración.

A partir de este esquema es sencillo explicar el proceso que se sigue para el almacenamiento y producción de energía con este sistema.

Partiendo de un estado inicial en el que tanto el reservorio de CO₂ poco profundo y el profundo se encuentran parcialmente llenos y por tanto presurizados, el ciclo empieza en el punto 1 de la imagen, extrayendo un caudal de gas del reservorio profundo. El punto 2 es la entrada de la turbina de alta presión en la que se aprovecha la energía de este gas presurizado y a cierta temperatura para impulsar el rotor de la turbina y generar electricidad. El caudal extraído se bifurca en el punto 3, una parte se turbiniza para producir más energía en la turbina de baja presión enviándolo al punto 4 del esquema, la parte restante de caudal se refrigera en una de las torres de refrigeración y se inyecta en el reservorio de baja presión (punto 9). A continuación, esa parte del caudal se vuelve a sacar del reservorio de baja presión cuando sea necesario y se une a la parte restante de caudal que viene de la salida de la turbina de baja presión, ambos caudales son nuevamente refrigerados para realizar posteriormente una compresión. El hecho de que se vuelvan a refrigerar tiene su sentido en que es mucho menos costoso en términos energéticos comprimir un caudal de gas a baja temperatura que uno a alta. En el punto 5, una vez refrigerado el caudal total de gas, se comprime a presiones por encima de las correspondientes al reservorio profundo. En el punto 7 se inyecta el dióxido de carbono en el reservorio profundo para que este gas absorba calor de origen geotérmico aumentando así la entalpía de este para posteriormente cuando se turbine tener un salto entálpico mayor. Una vez realizado el intercambio de calor con la propia cavidad, el gas se vuelve a extraer volviendo así al punto 1.

La parte que ocupa este trabajo de fin de máster es la limpieza de las corrientes de CO₂ provenientes del subsuelo, es decir, de los dos reservorios. La necesidad de mantener una cierta pureza en la corriente de dióxido de carbono que se mueve por todo el circuito se justifica en que algunos de los equipos utilizados en el sistema son muy sensibles a partículas sólidas. Las turbinas utilizadas para producción de potencia tienen usualmente este tipo de sistemas de limpieza de sólidos en suspensión para evitar daños en los alabes del rotor y otras partes de las propias turbinas. Es en estos sistemas en los que se basan las geometrías que se estudiarán posteriormente. Del mismo modo los compresores son sensibles a todo tipo de elementos que no se encuentren en estado gaseoso, estos están diseñados para operar con gases y aumentar su presión, si hay presencia de líquidos o sólidos en la corriente que estos estén presurizando habrá daños en los elementos móviles de estos equipos.

Finalmente, la colocación de estos sistemas de limpieza se realizaría en los puntos 2 y 11 del esquema, antes de entrar a las turbinas y a la válvula de bypass respectivamente.

3 MODELADO DE GEOMETRÍAS

En este apartado se mostrarán los pasos seguidos para realizar el diseño y modelado de todos los separadores que se tratarán en este proyecto.

3.1 Hipótesis de diseño

Las hipótesis que se han tenido en cuenta para el diseño de los diferentes separadores son las siguientes:

- Robustez y adaptabilidad: dado que el proyecto se encuentra en una etapa inicial en la que no se conocen muchos datos definitivos de variables del proceso, ni dimensiones de los equipos y conducciones se necesitan geometrías escalables y que se adapten a los diferentes escenarios posibles.
- Fiabilidad: es necesario que las soluciones que se propongan sean fiables en cuanto a rendimiento de separación de sólidos ya que los equipos que se encuentran aguas debajo de los sistemas de limpieza son caros y pueden ser fácilmente dañados por la suciedad que se quede en la corriente de gas.
- Incertidumbre en la naturaleza y tamaño de las partículas: en esta fase de proyecto no se conocen datos sobre el origen de los sólidos suspendidos en la corriente de gas ni tampoco de la cantidad o el tamaño de estos sólidos, por eso se plantean diseños con varias etapas de separación. Una primera etapa de limpieza de partículas gruesas y medias y una etapa secundaria de separación de partículas más finas.

En la siguiente tabla (1) se muestra toda la información que se conoce sobre la corriente de gas, incluyendo todas sus propiedades físicas conocidas en el caso más restrictivo para el funcionamiento de los separadores.

Dato de la corriente de CO ₂	Volumen de descarga (m ³)	Tiempo de descarga (h)	Temperatura (°C)	Presión (bar)
Valor	28790	5.46	125	240

Tabla 1: Propiedades de la corriente de CO₂

En cuanto a los sólidos en suspensión que se tendrán en cuenta para todos los estudios, como ya se comentó anteriormente no se tiene certeza de los tamaños de partícula que es posible encontrar en un reservorio de este tipo (cavidad salina) por tanto para modelar esta incertidumbre se utilizará una distribución de Weibull que contendrá la información de los diferentes diámetros de partícula que se podrán encontrar en este tipo de depósito. Típicamente este tipo de distribuciones viene definido por tres parámetros, el máximo valor, el mínimo valor y el valor medio. En la siguiente figura (2) se presenta una distribución de Weibull similar a la utilizada.

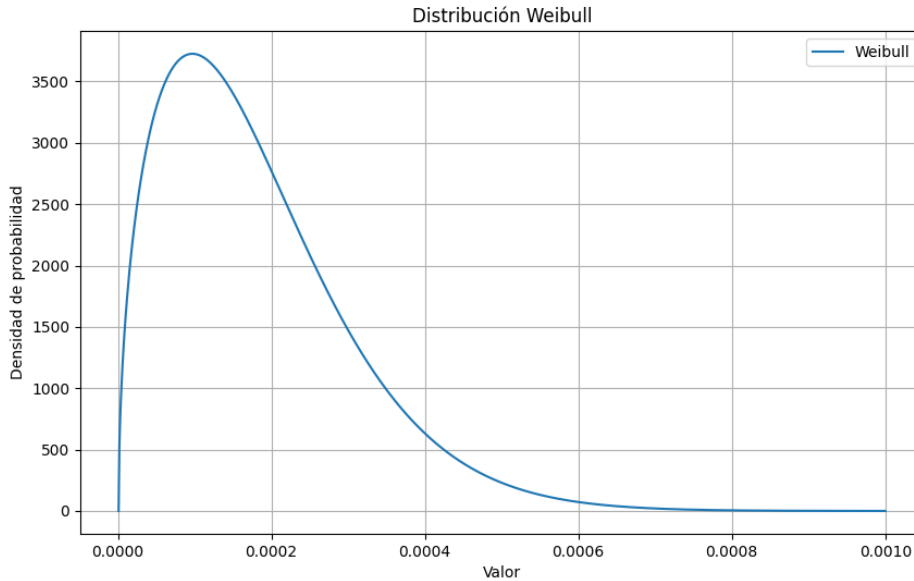


Figura 2: Distribución de Weibull de las partículas simuladas

En la figura superior se muestra la distribución de densidad de probabilidad utilizada para modelar la dispersión de los tamaños de partícula.

3.2 Cámara de sedimentación

Una cámara de sedimentación es un dispositivo utilizado para separar partículas sólidas de un flujo de gas o líquido mediante el principio de la gravedad. Funciona creando un espacio donde el flujo de gas o líquido se ralentiza, lo que permite que las partículas sólidas más pesadas se sedimenten y se depositen en el fondo de la cámara.

1. Entrada del flujo: El flujo de gas o líquido contaminado con partículas sólidas ingresa a la cámara de sedimentación a través de una entrada diseñada para distribuir uniformemente el flujo en toda la sección transversal de la cámara.
2. Ralentización del flujo: Dentro de la cámara, el flujo se expande y se ralentiza, lo que reduce la velocidad de las partículas y permite que la gravedad ejerza su efecto sobre ellas. Esto se traduce físicamente en que el efecto gravitatorio predomina a bajas velocidades sobre el aerodinámico, aunque solo en partículas con una masa considerable.
3. Sedimentación de partículas: Las partículas sólidas más pesadas tienden a sedimentarse y caer hacia el fondo de la cámara debido a la fuerza de la gravedad. La velocidad de sedimentación depende del tamaño, forma y densidad de las partículas, así como de la velocidad y la viscosidad del fluido.
4. Salida del flujo limpio: El gas o líquido limpio, es decir, libre de las partículas sólidas sedimentadas gruesas, sale de la cámara a través de una salida que se suele ubicar en las zonas superiores del dispositivo, mientras que las partículas sedimentadas se acumulan en el fondo de la cámara.

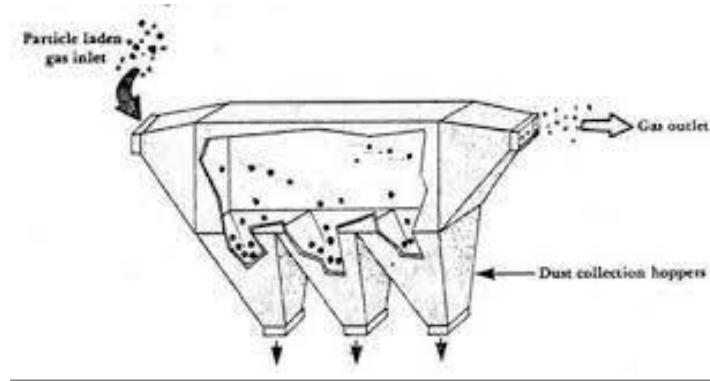


Figura 3: Esquema de una cámara de sedimentación [1]

En la figura (3) se muestra un esquema de una cámara de sedimentación en la que se pueden observar todas las zonas antes descritas. Este esquema sirve como base para generar posteriormente una geometría compatible con el funcionamiento de este tipo de separador. En el esquema se observa como entra el gas con partículas gruesas y finas en suspensión por la sección de entrada y a medida que recorre la longitud de la cámara de sedimentación las partículas más gruesas se van depositando en los diferentes conductos verticales de recolección de sólidos, finalmente la corriente de gas sale por la sección de salida libre de partículas de tamaño grande.

Las dimensiones de una cámara de sedimentación pueden variar considerablemente dependiendo de la aplicación específica y los requisitos de separación. Sin embargo, por lo general, una cámara de sedimentación tendrá una sección transversal lo suficientemente grande para permitir la ralentización del flujo y una altura que permita la sedimentación efectiva de las partículas. Las cámaras de sedimentación pueden ser de diferentes formas, como cilíndricas o cónicas, y suelen estar construidas con materiales resistentes a la corrosión y a la erosión de las partículas.

En esta etapa de prediseño se necesitan ciertos datos para poder realizar unos cálculos preliminares que puedan dar información suficiente como para realizar estudios fluidodinámicos mediante simulaciones computacionales que ayuden a determinar la viabilidad de este tipo de sistemas para el caso en cuestión. Los únicos datos de los que se disponen en este caso son el volumen de descarga proveniente de la cavidad salina para una producción máxima de una potencia de 100MW, así como el tiempo en que se debe realizar esa descarga de gas. Con estos dos datos se determina el caudal volumétrico de descarga como sigue:

$$Q_{descarga} = \frac{V_{descarga}}{t} = 1.464m^3/s$$

Determinado este caudal y teniendo una cierta geometría como referencia se procede a diseñar la geometría de la cámara de sedimentación en 2D, con una cierta lógica y coherencia en la escala que tienen las diferentes dimensiones de este equipo. La geometría en dos dimensiones propuesta se muestra en la siguiente figura.

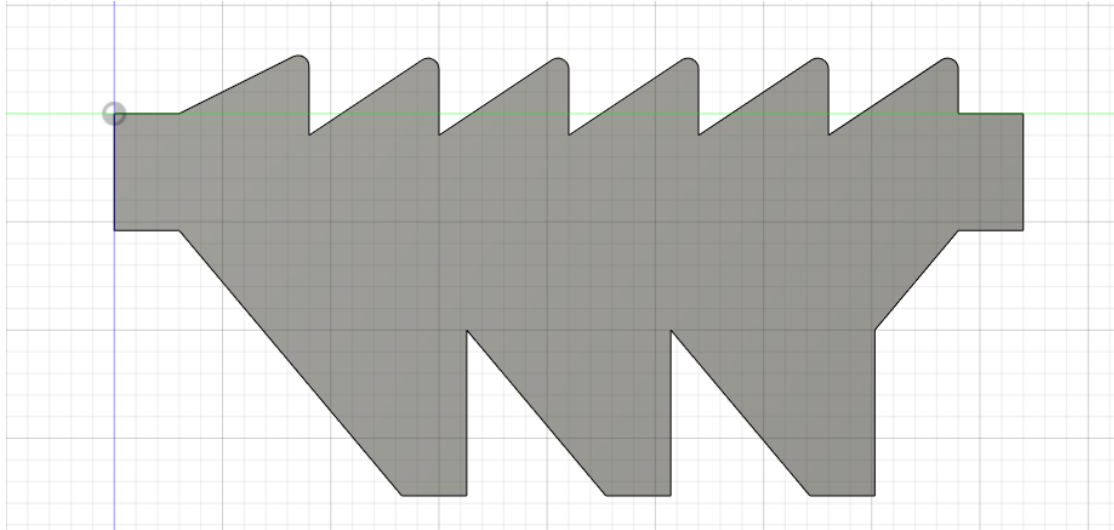


Figura 4: Geometría plana de la cámara de sedimentación diseñada

Como se muestra en la figura (3), la forma de esta cámara de sedimentación se compone de líneas rectas que conforman las diferentes zonas de esta. La primera zona, rectangular de altura 0.54m, que se encuentra a la izquierda en la imagen constituye la entrada a la cámara de sedimentación, una zona en la que en principio se tendrá un perfil de velocidad uniforme a lo largo de la altura, aunque obviamente las partículas fluidas cercanas a las paredes se irán frenando como consecuencia del rozamiento con estas. Justo después de la sección de entrada se encuentran en la parte superior una serie de deflectores que frenan el flujo en su recorrido por la cámara de sedimentación de forma que las partículas en suspensión también disminuyan su velocidad y caigan por tanto por gravedad a los tres contenedores de la parte inferior. Finalmente tiene una última zona de salida similar a la de entrada en la que el flujo vuelve a ser más o menos uniforme en toda la sección.

Realizado ya un modelo en 2D se realiza una extrusión de esta geometría en la dirección perpendicular al plano de boceto obteniendo así un modelo 3D que se corresponde con el volumen de control la cámara de sedimentación. La longitud extruida, de 0.6m en este caso, se ha determinado teniendo en cuenta que las velocidades en la zona de entrada de la cámara deben ser bajas de forma que las partículas se frenen aún más cuando entren en esta y empiece a predominar más la fuerza gravitatoria.

En la siguiente imagen se presenta la forma en 3D del volumen de control.

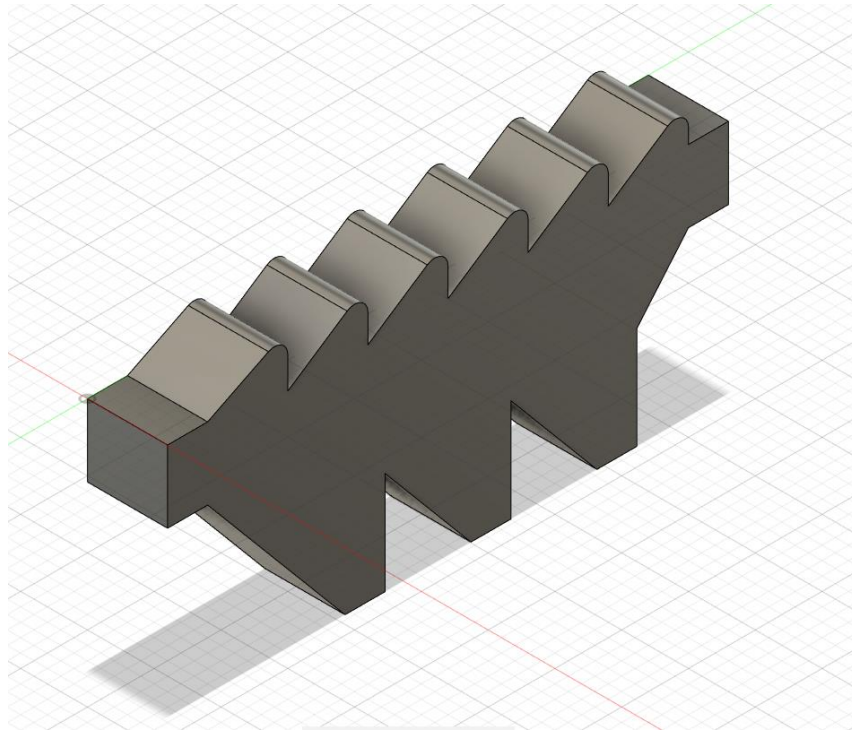


Figura 5: Geometría tridimensional de la cámara de sedimentación diseñada

Una vez diseñado el volumen de control de la cámara de sedimentación y teniendo datos del área de la sección de paso en la entrada, se puede calcular la velocidad del gas a la entrada.

$$Q_{descarga} = A_{es} \cdot v_{es}$$

Siendo A_e el área de la sección de entrada y v_e la velocidad en la sección de entrada, despejando esta última variable, siendo las otras dos conocidas se calcula $v_e = 4.518m/s$. Esta velocidad será útil para poder imponer la condición de contorno en la sección de entrada en el análisis de elementos finitos.

Una vez modeladas ambas geometrías se realiza un análisis de elementos finitos para determinar el comportamiento del sistema de limpieza diseñado frente a unas ciertas condiciones de contorno. Antes de realizarlo se discutirá cuál de las geometrías tendría más sentido simular primero y cuáles serán los objetivos de esta simulación.

El objetivo para este proyecto es estudiar posibles diseños de diferentes sistemas y la viabilidad de cada uno de ellos, para lo cual debe evaluarse su efectividad en la separación, sus rangos de operación y los tamaños de partícula para los cuales el rendimiento es aceptable.

Teniendo esto en cuenta, si se quieren obtener resultados rápidos y flujos más simples, así como afinar el modelo de forma que este converja más rápidamente y con menor coste computacional, se pueden realizar simplificaciones que más tarde sean extrapolables de forma que no sea necesario realizar una simulación en tres dimensiones o bien realizar ambas simulaciones y usar el modelo en 2D como punto de partida para el análisis 3D que tiene mayor complejidad. También deben tenerse en cuenta los recursos disponibles para las

simulaciones ya que para determinados modelos de análisis se requiere un hardware con gran potencia de cálculo y un software con una licencia completa que permita realizar simulaciones con cualquier número de elementos. En este caso se empezará con la simulación 2D para estudiar la convergencia del modelo en función de diferentes parámetros: modelos turbulentos, distribuciones de partícula, velocidades de flujo, etc.

3.3 Cámara de choque

Una cámara de choque o impacto es una cámara que presenta una superficie interior con características similares a una placa, cuya función principal es frenar las partículas que inciden sobre ella. Una vez que las partículas han sido frenadas, precipitan por gravedad a un depósito que se encuentra en la parte inferior del separador. Este mecanismo permite la separación eficaz de las partículas.

Sin embargo, pueden surgir algunos problemas, especialmente debido a la distribución desconocida de las partículas que ingresan en la cámara. Si las partículas tienen un cierto tamaño y llevan mucha inercia, pueden impactar en la superficie intermedia y desgastarla significativamente.

A continuación, se muestra un esquema sobre el cual se ha basado el diseño de dicha cámara de impacto.

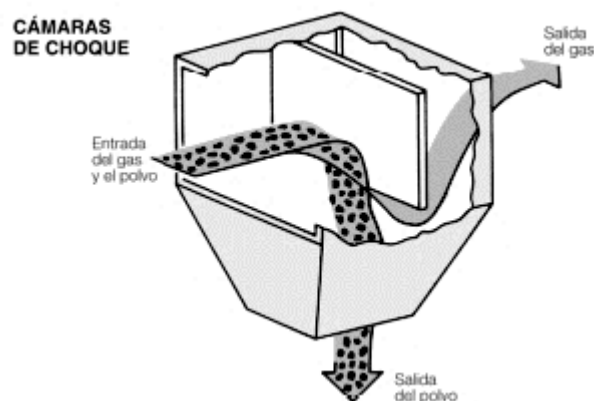


Figura 6: Esquema de una cámara de choque [2]

En la imagen anterior se puede observar un esquema que explica de manera visual el funcionamiento de una cámara de choque o impacto. Como se muestra, el gas con partículas sólidas entra en la cámara de choque a través de una entrada diseñada para distribuir el flujo uniformemente hacia la placa deflectora en el interior. Al entrar en la cámara, las partículas impactan contra la superficie de la placa deflectora, lo que provoca una reducción significativa de su velocidad. Este impacto hace que las partículas desaceleren y cambien su trayectoria, que pasa a ser gobernada por los efectos de la gravedad, separándose así las partículas del flujo de gas.

Las partículas sólidas, al ser frenadas, son redirigidas hacia el fondo de la cámara bajo la influencia de la gravedad. La efectividad de este proceso depende del tamaño y densidad de las partículas, así como de la velocidad inicial del flujo de gas. Por otro lado, el gas, ya limpio y libre de las partículas sólidas que han sido frenadas y redirigidas, sale de la cámara por una salida ubicada en la parte superior. Las partículas sedimentadas se acumulan en el fondo de la cámara, donde pueden ser recolectadas o eliminadas posteriormente.

Para el diseño de la geometría se ha utilizado el programa Fusion 360, el cual permite realizar el diseño de forma paramétrica. De esta manera, en caso de que sea necesario algún cambio, se pueden llevar a cabo sin tener que volver a realizar otro diseño desde cero. Esta metodología se ha llevado a cabo principalmente porque en las fases de prediseño es muy común tener que realizar modificaciones una vez que los sistemas han sido desarrollados y se han probado algunas de sus características.

También es importante destacar que, aunque se dispone de algunos datos que permitirán obtener medidas de áreas u otras dimensiones, estos datos podrían variar en función de la potencia que se quiera generar en la planta sobre la que se está diseñando este sistema.

Los únicos datos disponibles, como en el caso del apartado anterior, son el volumen de descarga proveniente de la cavidad salina para una producción máxima de 100 MW de potencia, y el tiempo necesario para realizar dicha descarga de gas. Por tanto, se tiene el mismo valor del caudal de descarga y con esto se tiene unos primeros valores que se pueden utilizar para llevar a cabo el diseño.

$$Q_{\text{descarga}} = \frac{V_{\text{descarga}}}{t} = 1.464 \text{ m}^3/\text{s}$$

Este diseño se realiza con lógica y coherencia en la escala de las diferentes dimensiones del equipo y por ello, se propone la geometría en tres dimensiones que se muestra en la siguiente figura:

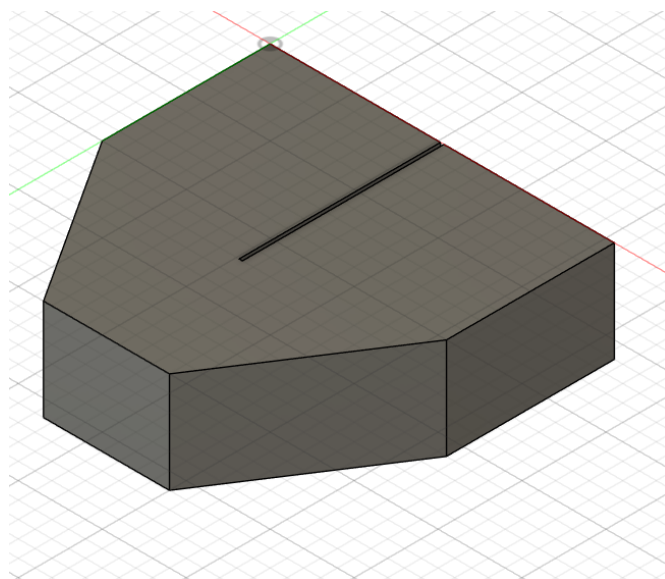


Figura 7: Geometría tridimensional de la cámara de choque diseñada

Esta geometría se compone de varios elementos, similares a los mostrados en la referencia. Incluye una entrada (superficie no visible en la imagen) y una salida, en la cual se ha diseñado una tobera que acelera el fluido para que pueda llegar a otros sistemas que se encuentren aguas debajo de este separador (superficie visible en la imagen). En la parte inferior, existe una superficie denominada "collection bin", donde se recolectan las partículas. Finalmente, se incluye una chapa intermedia, que sirve para desviar y frenar las partículas.

Esta geometría tiene las dimensiones que se muestran en la siguiente figura (8), donde también se pueden observar las restricciones de paralelismo y perpendicularidad que fijan el diseño.

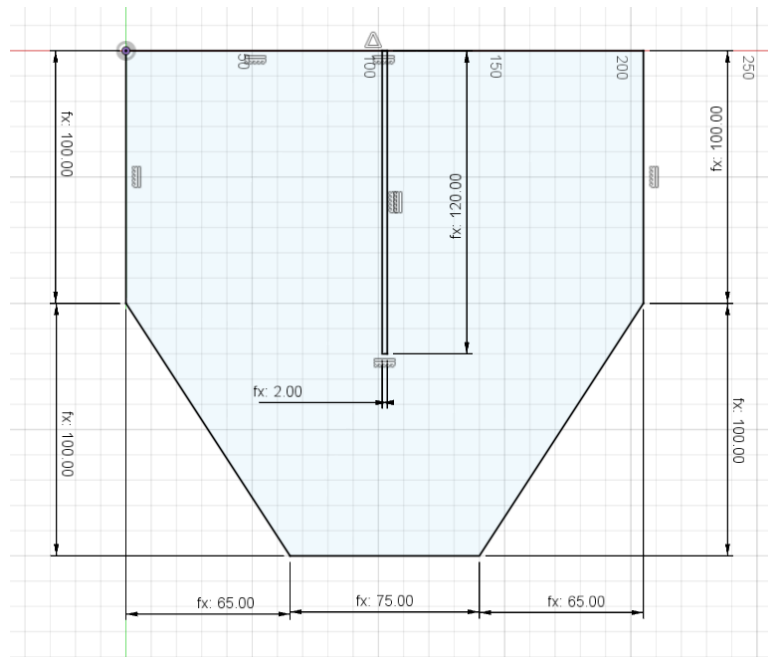


Figura 8: Geometría plana de la cámara de choque diseñada

La imagen muestra un boceto en 2D de la geometría de la cámara de choque diseñada. La geometría tiene un ancho total de 200cm en la parte superior y una altura total de 250 cm. La parte inferior se divide en tres secciones con anchos de 65cm, 75cm y 65cm respectivamente. La altura de la sección superior es de 100cm. Además, se observan restricciones de paralelismo y perpendicularidad que aseguran la correcta alineación y orientación de las distintas partes de la geometría. Finalmente, la extrusión realizada para dar espesor a este separador ha sido de 60cm, con ello se genera el volumen de control que se tomara como dominio para el análisis de elementos finitos en 3D.

Las dos geometrías mostradas hasta ahora solamente comprenden la cámara de choque, pero para poder conectar esta al circuito sus entradas y salidas de gas son demasiado grandes, es por eso por lo que se han diseñado dos adaptadores para poder acomodar las secciones a tamaños más comunes para conducciones de gas. En el caso de la entrada de gas la geometría de adaptador diseñada es la que se muestra en la siguiente figura, ya acoplada a la cámara de choque.

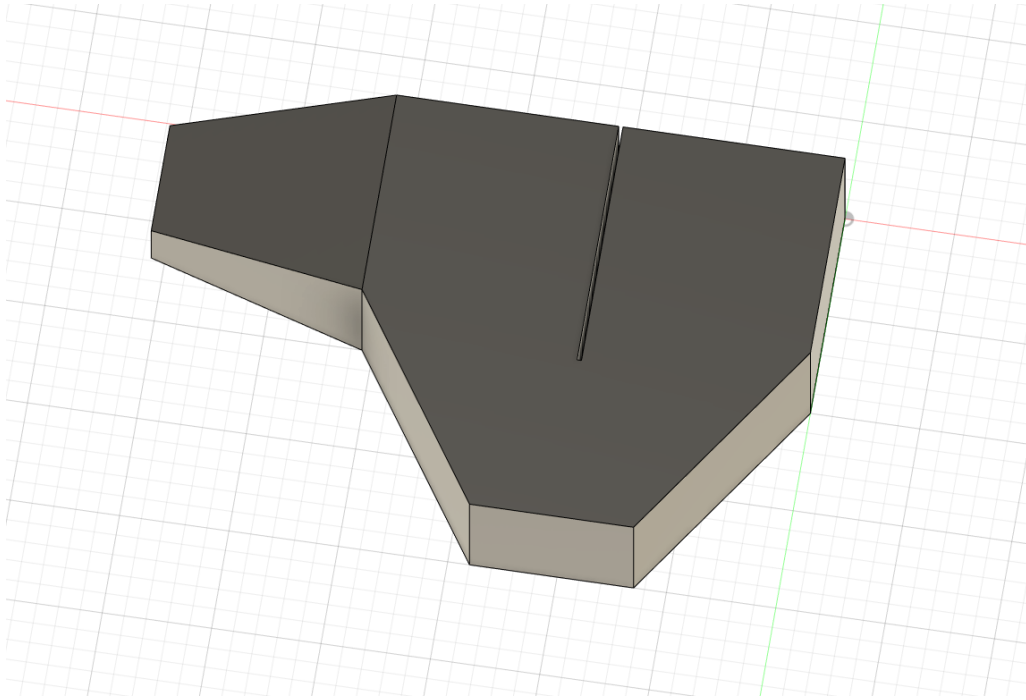


Figura 9: Geometría tridimensional de la cámara de choque y el adaptador de entrada diseñados

En la figura (9) se puede ver la forma del adaptador, que tiene una superficie de entrada de 54cm de alto y 27cm de ancho. El adaptador diseñado para la salida de gases se mostrará en el siguiente apartado en el que se trata la segunda etapa de separación.

Habiendo determinado ya el área de la sección de entrada a la cámara de choque se puede realizar el cálculo de la velocidad en esta sección.

$$Q_{descarga} = A_{es} \cdot v_{es} = 1.464m^3/s$$

Despejando de esta ecuación se obtiene que $v_e = 10.04m/s$, esta información será útil a la hora de imponer las condiciones de contorno para los análisis de elementos finitos de esta geometría.

Teniendo en cuenta la necesidad de obtener resultados rápidos, como se comentó en el apartado anterior, se pueden realizar simplificaciones que posteriormente sean extrapolables. Esto permite evitar la necesidad de realizar una simulación en tres dimensiones desde el inicio. Alternativamente, se pueden llevar a cabo ambas simulaciones, utilizando el modelo en 2D como punto de partida para el análisis 3D, el cual tiene mayor complejidad.

3.4 Ciclón

En este último subapartado de modelado se va a tratar la geometría correspondiente a la segunda etapa de separación, es decir, el ciclón, un sistema versátil que permite la separación de partículas de muy diversos tamaños.

Los ciclones son sistemas de limpieza de sólidos en corrientes de gases muy utilizados en el sector industrial para aplicaciones en minería, metalurgia, cementeras y también en plantas de producción de potencia. El hecho de que sean sistemas muy comunes hace que también sean equipos muy estudiados e incluso ya estandarizados.

Para el diseño de la segunda etapa de separación de este proyecto se ha diseñado un ciclón siguiendo el cálculo que se hace en (Alberto & Londoño, 2006).

Inicialmente se impone una velocidad que este en el intervalo de 15.2 y 27.4m/s, en este caso se ha impuesto un valor intermedio de 20m/s a partir de este dato de velocidad y el caudal volumétrico que se obtuvo para la descarga de 100MW se puede calcular el área del conducto de entrada del ciclón, que en este caso será de sección rectangular.

$$Q_{descarga} = A_e \cdot v_e = 1.464m^3/s$$

$$v_e = 20m/s; A_e = 0.0732m^2$$

Con la tabla que se proporciona en (Alberto & Londoño, 2006) para las proporciones de ciclones Stairmand de alta eficiencia y que se muestra en la figura (10) se puede calcular el diámetro del ciclón.

Dimensión	Nomenclatura	Tipo de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1.0	1.0	1.0
Altura de entrada	a/Dc	0.5	0.44	0.5
Ancho de entrada	b/Dc	0.2	0.21	0.2
Altura de salida	S/Dc	0.5	0.5	0.625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0.5	0.4	0.5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1.5	1.4	1.5
Altura parte cónica	z/Dc	2.5	2.5	2.5
Altura total del ciclón	H/Dc	4.0	3.9	4.0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0.375	0.4	0.375
Factor de configuración	G	551.22	698.65	585.71
Número cabezas de velocidad	NH	6.4	9.24	6.4
Número de vórtices	N	5.5	6.0	5.5

Figura 10: Tabla de proporciones de diferentes tipos de ciclón

Teniendo en cuenta que el área del conducto de entrada se puede calcular como:

$$A_{conducto} = a \cdot b = 0.5 \cdot D_c \cdot 0.2 \cdot D_c = 0.1 \cdot D_c^2 = 0.0732m^2$$

$$D_c = 0.855m$$

Obtenido este diámetro con la misma tabla mostrada en la figura (10) se pueden determinar las demás dimensiones del ciclón. En la tabla (2) que se muestra a continuación se detallan las dimensiones del ciclón diseñado para esta proyecto.

Dimensión	Nomenclatura	Relación (Dimensión/ D_c)	Valor (mm)
Diámetro del ciclón	D_c	1.0	855
Altura de entrada	a	0.5	427.5
Ancho de entrada	b	0.2	171
Altura de salida	S	0.5	427.5
Diámetro de salida	D_s	0.5	427.5
Altura parte cilíndrica	h	1.5	1282.5
Altura parte cónica	z	2.5	2137.5
Altura total del ciclón	H	4	3420
Diámetro salida de partículas	B	0.375	320.625

Tabla 2: Dimensiones del ciclón diseñado

Definidas todas las dimensiones del ciclón se empieza el proceso de modelado del volumen de control del ciclón, en este caso, es algo más complejo que en los separadores anteriores puesto que la geometría es bastante más complicada.

Lo primero que se ha modelado son ambos troncos cilíndrica y cónico a partir de bocetos circulares en planos paralelos desfasados las diferentes alturas que se han mostrado en la tabla anterior. Estos bocetos se extruyen verticalmente y la zona cónica se realiza mediante el comando solevación de Fusion 360. En la figura (11) se muestra la forma parcial del ciclón, a falta de generar ciertos detalles como la entrada y salida de sólidos y gas.

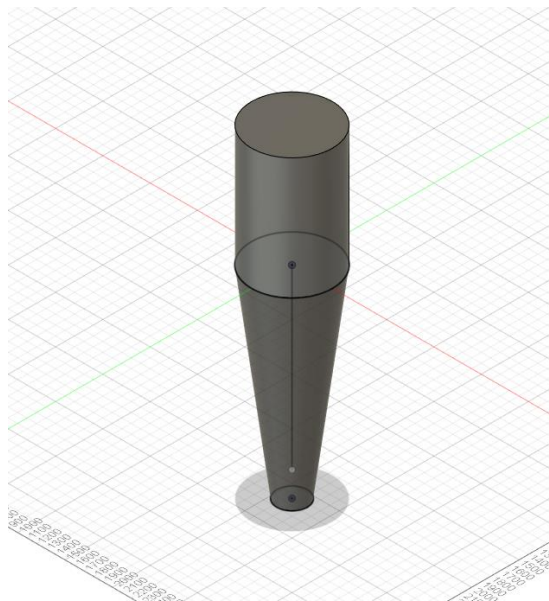


Figura 11: Preforma del ciclón diseñado

El siguiente paso es realizar un boceto con la forma rectangular y las dimensiones del conducto de entrada en el plano vertical medio para luego extruirlo y modelar así la entrada tangente de gases y sólidos.

Posteriormente se realizan dos bocetos en la cara superior del cilindro para recortar el espesor correspondiente a la pared que separa la entrada de la salida de gases y que hace que el fluido tenga que hacer cierto recorrido vertical por el ciclón para más tarde salir de él. Finalmente se extruye hacia arriba el boceto de menor diámetro que se hizo en la cara superior de la parte cilíndrica para modelar el conducto de salida de gases. En la siguiente figura se muestra la forma final junto con un corte realizado por el plano medio vertical, en el que se observa el detalle de la pared del conducto de salida de gases.

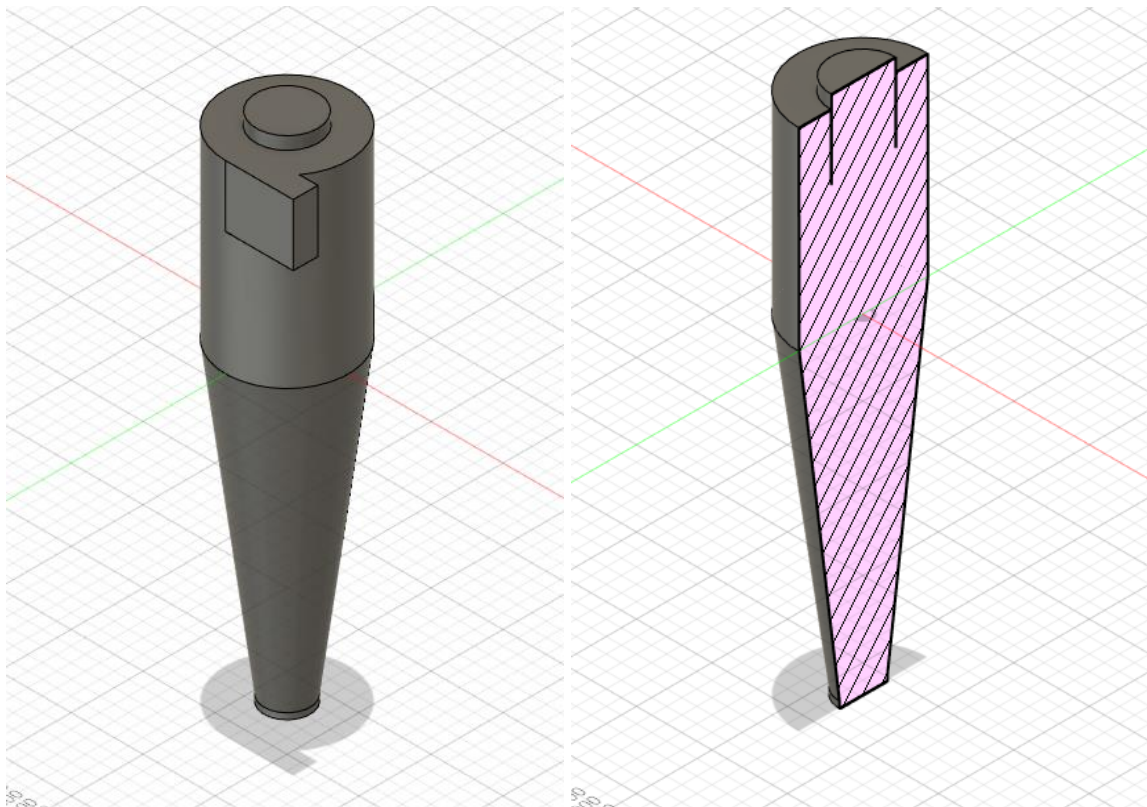


Figura 12: Forma final del ciclón diseñado

Para finalizar este apartado, como se comentó anteriormente, dado que se quieren realizar análisis de elementos finitos que combinen en serie las diferentes geometrías diseñadas y teniendo en consideración que sus secciones de salida y entrada no son de iguales dimensiones ha sido necesario realizar varios adaptadores de sección. Todos ellos se han realizado mediante bocetos en planos paralelos desfasados y solevación. En la siguiente figura (13) se muestran todos los adaptadores modelados.

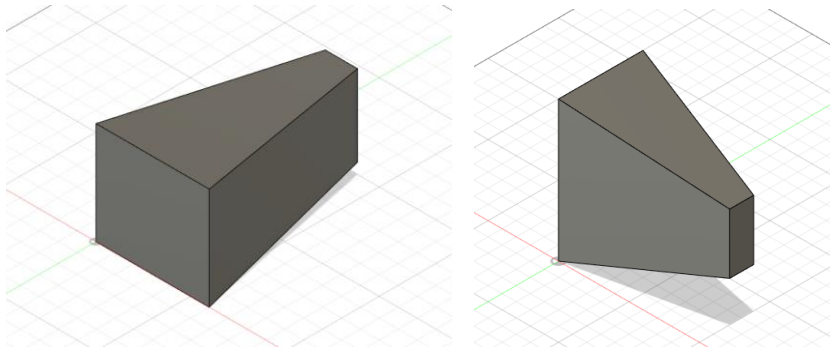


Figura 13: Geometría de los diferentes adaptadores diseñados

4 ANÁLISIS FLUIDODINÁMICO EN ANSYS

4.1 Descripción del método de elementos finitos

En este apartado se describirá el proceso que se suele seguir para todo análisis o simulación de elementos finitos que se haga, en este caso se particularizará para el modelo 2D de la cámara de sedimentación. A continuación, se enumeran y comentan los pasos seguidos para un análisis de este tipo:

4.1.1 Definición del Problema

El primer paso en un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD) es realizar una definición clara del problema. Esto implica identificar los objetivos específicos del análisis, en este caso, como se ha comentado anteriormente es determinar el comportamiento de diferentes sistemas frente a distintos caudales, tamaños de partícula y velocidades de flujo. Por tanto, es crucial definir las variables clave que se evaluarán, y las propiedades físicas del fluido involucrado, tales como densidad, viscosidad y conductividad térmica en caso de que se quiera tener en cuenta la energía térmica del fluido, además de la energía mecánica y la disipación por efectos viscosos y fricción con las paredes.

Además, es necesario especificar las propiedades de los materiales sólidos si estos interactúan con el fluido en el sistema, lo cual no es el caso puesto que en estos sistemas solo se modelará el volumen de control, dado que en principio no se requiere determinar esfuerzos sobre las paredes ni distribuciones de temperatura en las mismas, datos que por otra parte serían útiles en casos en los que se fuera a realizar posteriormente un análisis mecánico o termomecánico. Esta etapa sienta las bases para todo el análisis siguiente y asegura que todos los parámetros relevantes estén considerados desde el principio, eliminando así posibilidades de error en pasos posteriores.

4.1.2 Creación de la Geometría

Una vez definido el problema, se procede a la creación del modelo geométrico de la región de interés. Utilizando software CAD (Computer-Aided Design), se diseña la geometría que representa el dominio físico del problema, en el que se resolverán los campos de velocidades y presiones del fluido, principalmente, y en caso de activar la ecuación térmica o como en este caso la de fase discreta se resolverán también campos de temperatura y trayectorias de las partículas.

Es importante mantener un equilibrio entre la precisión del modelo y la simplicidad, ya que una geometría demasiado compleja puede aumentar significativamente el tiempo de cómputo sin aportar beneficios adicionales significativos en términos de precisión, aunque en esto también influye el mallado que se realice sobre la pieza, piezas más complejas requieren mallados más finos. A menudo, se realizan simplificaciones en

la geometría para hacer el problema manejable y eficiente desde el punto de vista computacional, aunque finalmente una vez convergidos modelos simplificados, se detallan más las geometrías y se compliquen los flujos calculados.

4.1.3 Mallado

Con la geometría definida, el siguiente paso es generar la malla. El proceso de mallado implica discretizar el dominio en una serie de celdas o elementos discretos, que dependiendo de las dimensiones que tenga la geometría serán polígonos o poliedros, que el software CFD utilizará para resolver las ecuaciones del flujo (Navier-Stokes y continuidad, típicamente). Normalmente los softwares de mallado son automáticos, es decir, según la geometría mallan más fino o más grueso en las diferentes zonas, pero permiten ciertas opciones para mallar el dominio de diferentes formas, así como elegir el tipo de poliedro o polígono con el que se va a discretizar y el orden del elemento que une los nodos (lineal, cuadrático o cubico, normalmente).

Es fundamental refinar la malla en áreas donde se esperan grandes gradientes de variables, como cerca de las paredes o en regiones con poco radio de curvatura, para asegurar una resolución adecuada de los fenómenos físicos. Para realizar este refinamiento normalmente se aplican opciones como el Edge Sizing o el Face Sizing para refinar la malla en lugares concretos, como aristas o superficies. También para casos en los que interese guardar cierto paralelismo entre elementos se suele aplicar una técnica de mallado llamada “Inflation” que genera elementos paralelos entre sí en ciertas capas alrededor de una determinada geometría, también se aplica tanto para aristas como para superficies.

Finalmente, para comprobar que esta discretización se ha realizado correctamente, los softwares de mallado suelen tener opciones para el cálculo de parámetros que determinan la calidad de la malla. Para simulaciones CFD, los parámetros que se suelen comprobar más frecuentemente son la ortogonalidad de la malla, el software evalúa la perpendicularidad entre elementos y determina donde, dentro del dominio, la discretización es más pobre, se considera que una malla con ortogonalidad por encima de 0.4 es aceptable. También se suele evaluar la relación de aspecto entre los elementos de un volumen finito, es decir, el cociente de las longitudes de los elementos (aristas) que delimitan el volumen finito.

Para este último parámetro se aceptan mallas usualmente con ratio de aspecto menores que 10. En el caso de ANSYS, el software en el que se realizaran todas las simulaciones de elementos finitos de este proyecto también en el módulo de mallado se nombra y clasifican las zonas que actuaran como entrada de fluido (inlet) y salida de fluido (outlet), así como paredes u otras zonas destacables que tengan condiciones de contorno particulares.

4.1.4 Configuración de la Simulación

La configuración de la simulación incluye la definición de las condiciones de contorno, que deben parecerse lo más posible a las condiciones reales de operación del dominio en estudio y las condiciones iniciales,

con las que se inicializan las variables que vamos a calcular de manera iterativa. Las condiciones de contorno especifican cómo interactúa el flujo con las fronteras del dominio, como las entradas y salidas de fluido, o las paredes del sistema. Es crucial definir estas condiciones con precisión para reflejar correctamente el escenario físico. Además, se seleccionan los modelos físicos, ecuaciones que se van a resolver, como los modelos de turbulencia, transferencia de calor, o interacción fluido-partículas sólidas, que se aplicarán en la simulación.

Esta etapa también implica la configuración del solucionador, incluyendo la elección del tipo de solucionador, los criterios de convergencia y los esquemas numéricos para la discretización temporal. Además, en caso de que se necesiten soluciones concretas para regiones del dominio, como por ejemplo en este caso ocurre con la masa de partículas que se escapa por una determinada superficie, se declararan los correspondientes reportes, en ANSYS esto se declara en el apartado “Report Definitions”. Estos reportes también son útiles para asegurar una mejor convergencia del modelo si es que realmente las variables que se reportan son importantes para la simulación. Es necesario también precisar el número de iteraciones máximas que debe calcular el solucionador, así como el tipo de inicialización que se realizará de las variables (hibrida o standard).

4.1.5 Solución del Modelo

Con la configuración completa, se procede a la ejecución de la simulación. Durante este proceso, el software de simulación, en este caso ANSYS resuelve las ecuaciones de flujo en cada celda de la malla, iterando hasta cumplir todos los criterios de convergencia definidos. Es fundamental monitorear la convergencia y la estabilidad del proceso de solución, ajustando parámetros, como los factores de relajación si es necesario para asegurar resultados precisos y estables. Este paso puede ser computacionalmente costoso, especialmente para modelos complejos o simulaciones en 3D con sistemas de ecuaciones con dimensiones altas (elevado número de ecuaciones e incógnitas), y puede requerir un considerable tiempo de cálculo. Es por eso por lo que se recomienda primero resolver modelos simples para si es posible extrapolar los resultados a modelos más complejos. Un ejemplo de ello sería la realización de un modelo axisimétrico para un dominio de revolución.

4.1.6 Post-procesamiento

Después de completar la simulación, se realiza el post-procesamiento de los resultados. Esta etapa implica el uso de herramientas de visualización para interpretar los datos obtenidos. Se pueden generar contornos de velocidad, presión, y temperatura, así como líneas de flujo (Pathlines), trayectorias de partículas de fase discreta (Particle Tracks) y otras visualizaciones que ayudan a comprender el comportamiento del fluido en el sistema. También se pueden generar gráficas con dos ejes que representen la evolución de determinadas variables simuladas en función de las iteraciones para simulaciones estacionarias y en función del tiempo en caso de simulaciones transitorias. Es importante analizar los datos y generar gráficos y visualizaciones que respalden la interpretación de los resultados. Además, se comparan los resultados con datos experimentales o analíticos para validar la precisión del modelo y se realiza un análisis de sensibilidad para verificar la robustez de los resultados frente a variaciones en las condiciones iniciales, de contorno, e incluso en los parámetros de

mallas. Para realizar este tipo de análisis se suelen declarar ciertas variables como parámetros y posteriormente se resuelven todas las simulaciones sucesivamente (análisis paramétrico).

4.1.7 Informe de Resultados

El penúltimo paso es la documentación de los hallazgos en un informe detallado. Este informe debe describir claramente el problema, la discretización, el enfoque de modelado, las condiciones de contorno, los resultados y las conclusiones obtenidos tras análisis. Incluir gráficos, tablas y descripciones que respalden los hallazgos es una buena práctica para comunicar los resultados de manera efectiva y visual. Este informe sirve como un registro completo del análisis y proporciona las bases para cualquier toma de decisiones posterior.

4.1.8 Optimización y Refinamiento

Finalmente, basado en los resultados obtenidos, se puede proceder con la optimización y refinamiento del modelo. Esto puede implicar ajustes en la geometría, evolución a modelos más complejos en tres dimensiones, las condiciones de contorno, o los parámetros del modelo para mejorar la precisión y la eficiencia del diseño. Además, se pueden realizar estudios más detallados de fenómenos como por ejemplo la turbulencia en ciertas regiones de interés en el dominio, acotando este dominio o mejorando la resolución en esta zona a costa de empeorarla en otras, trabajando con los mismos recursos. Realizar simulaciones adicionales puede ser necesario para explorar diferentes escenarios o para optimizar el diseño final. Esta iteración continua asegura que el análisis CFD no solo proporcione una solución inicial, sino que también contribuya a la mejora y optimización del sistema estudiado.

4.2 Cámara de sedimentación

4.2.1 Análisis del dominio 2D

Descrito ya el procedimiento seguido para la simulación de modelos de elementos finitos, se realiza una simulación análoga para el dominio 2D de la cámara de sedimentación.

4.2.1.1 Creación de la geometría

El primer paso a seguir, tras abrir ANSYS Workbench es elegir el tipo de análisis que se va a resolver, así como el solucionador que se quiere que el software utilice para la resolución del modelo. En este caso se utilizará Fluidflow con el solver Fluent. Seguidamente es necesario cargar la geometría como un archivo STEP, IGES o cualquier otro aceptado por el software o generarla a partir del propio módulo de modelado de ANSYS. En este caso se importará un archivo STEP proveniente del modelado realizado en Fusion 360.

Para generar esta geometría, los pasos que se han seguido en Fusion 360 han sido los siguientes:

1. Generación del boceto que conforma el contorno del dominio fluido

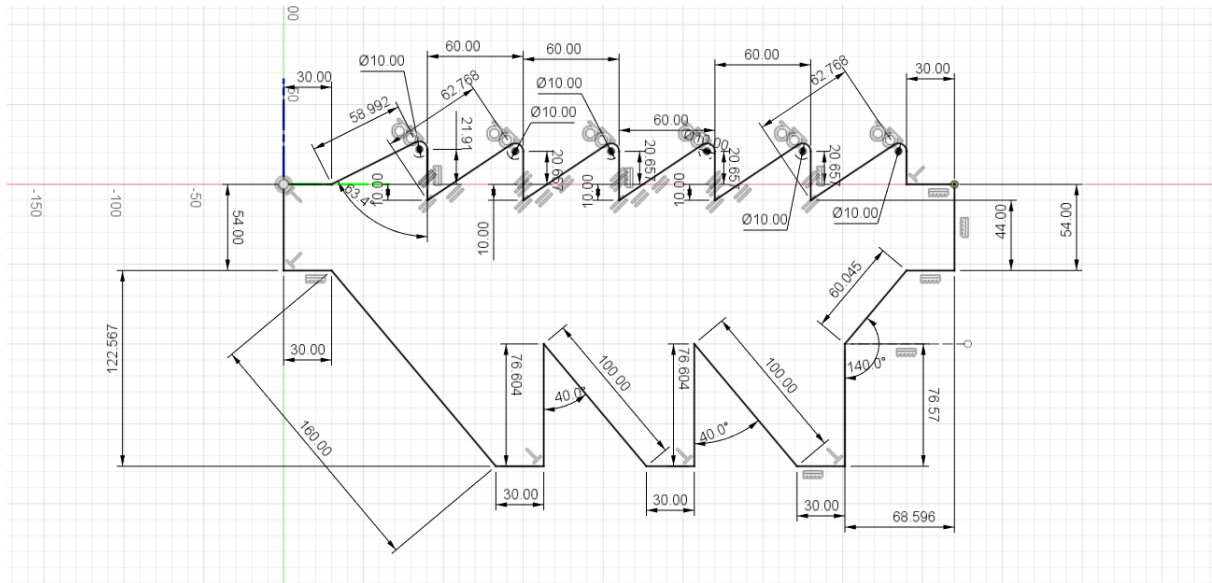


Figura 14: Boceto de la geometría plana de la cámara de sedimentación diseñada

En la imagen superior se muestra en línea más gruesa el contorno y en línea fina las cotas (en centímetros) que definen el boceto, así como las restricciones que se han impuesto a las diferentes líneas restringir el boceto de manera que no haya ninguna dimensión libre.

2. Generación de la superficie interior que delimita el contorno

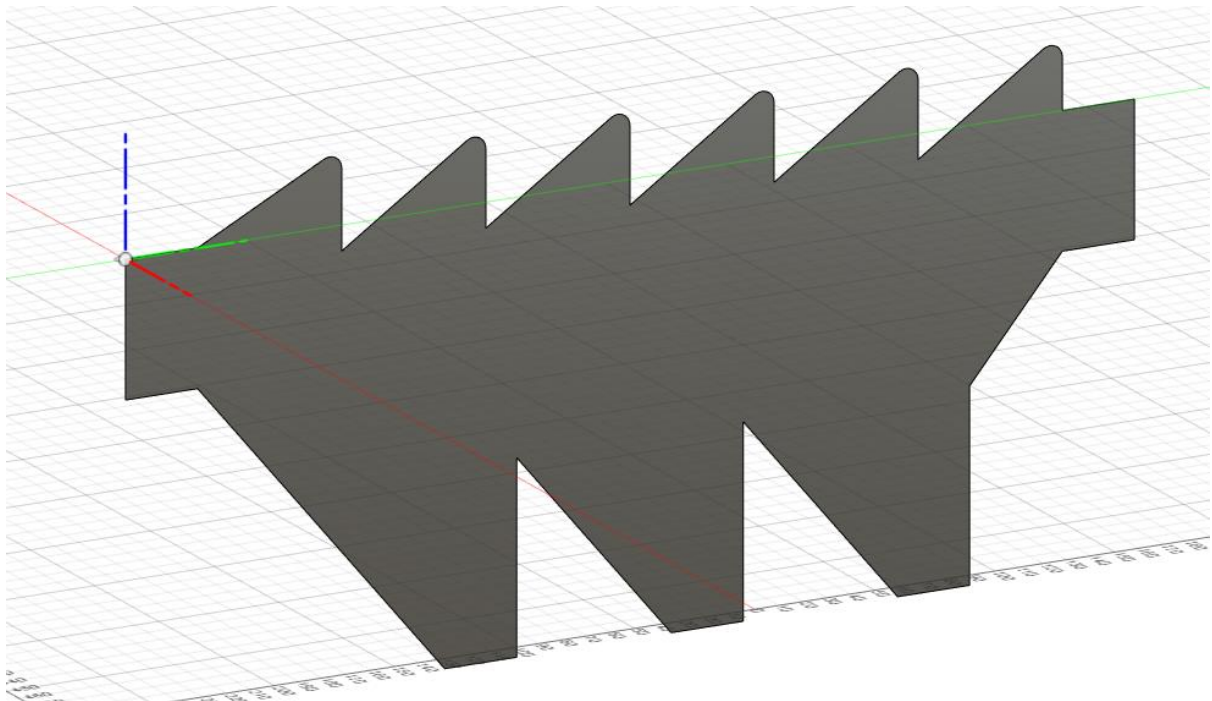


Figura 15: Dominio bidimensional del análisis de elementos finitos de la cámara de sedimentación

En la figura (15) se muestra la superficie que conforma el dominio que se cargara en ANSYS para ser simulado. Para generar esta entidad solo es necesario seleccionar con la herramienta “Superficie de contorno” el boceto cerrado del que se quiere generar la superficie.

4.2.1.2 Mallado

Una vez cargada la geometría en el programa debe abrirse el módulo de mallado para ejecutar los pasos descritos anteriormente. Teniendo en cuenta que los tiempos de computación no deben ser muy grandes dado el numero de simulaciones que será necesario realizar se utilizan modelos con números relativamente bajos de elementos y nodos y que sean en general asumibles por la licencia académica de ANSYS. A continuación, se muestran varias imágenes que muestran las opciones de mallado que se han tomado para discretizar en este caso el dominio 2D que se ha cargado previamente.

En este caso dado que es un modelo en dos dimensiones bastante simple, aunque con dimensiones considerables se ha optado por refinar todo el contorno del dominio de forma que se pueda captar de manera adecuada el comportamiento del fluido y las partículas cerca de las paredes. Esto se ha realizado en el módulo de mallado de ANSYS introduciendo un “Edge Sizing” o refinamiento de malla en aristas e imponiendo en ellas un tamaño de elemento de 20mm, lo cual, comparado con las dimensiones del dominio, unos 4m de longitud puede ser considerado un tamaño de elemento bajo. Esto viene especialmente bien en zonas como los deflectores superiores que tienen aristas curvadas en las que el flujo deberá redirigirse y por tanto podría generar cierta turbulencia. Esta turbulencia podría ser interesante y debería estar bien modelada ya que las partículas más finas seguirán una trayectoria más parecida a la del gas que a la de las partículas de tamaño mayor, que por su parte precipitaran a las zonas de recolección de solidos por gravedad.

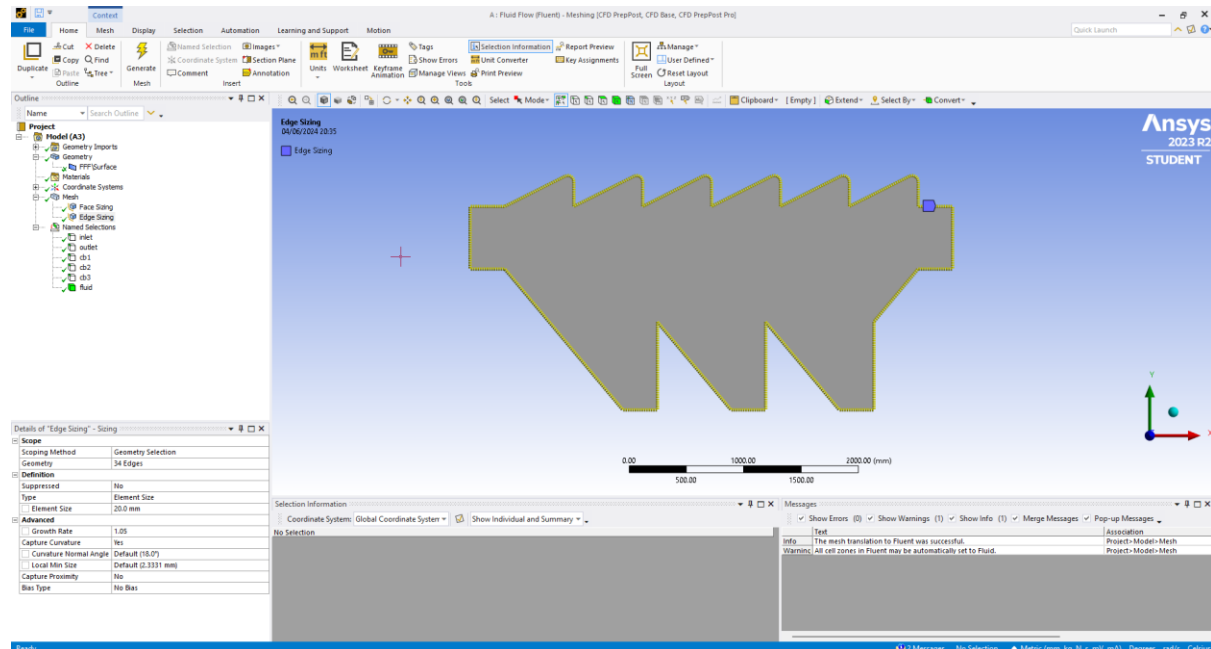


Figura 16: Opciones del “Edge Sizing” del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación

En la anterior imagen se observan los bordes seleccionados para este refinamiento (en color amarillo) y en la esquina inferior derecha de la figura las opciones seleccionadas. Una de estas opciones es la longitud del elemento, que ya se ha mencionado previamente y otra de las opciones que se ha seleccionado es el llamado “Growth Rate” o tasa de crecimiento. Este parámetro define la tasa de crecimiento entre elementos sucesivos

en dirección perpendicular a las aristas seleccionadas, esto quiere decir que el siguiente elemento más próximo a la pared crecerá un 5% con respecto al anterior en dirección al interior de la superficie. Por defecto este valor suele encontrarse en 1.2 lo que genera una transición más agresiva de la zona refinada a la no refinada, que tiene un tamaño de elemento mayor.

Además se ha añadido un “Face sizing” en toda la superficie y se ha seleccionado un tamaño de elemento de 30mm, es decir, un centímetro mayor que en las paredes. Teniendo en cuenta estas dos opciones de mallado se consigue una discretización bastante buena del dominio, como se comprobará a continuación, con unas transiciones muy suaves de las zonas más refinadas a las menos refinadas. Una malla similar se podría haber conseguido especificando en el apartado “Mesh” un tamaño de elemento de 30mm, sin necesidad de declarar así un “Face sizing”. En la siguiente imagen se presenta la malla obtenida.

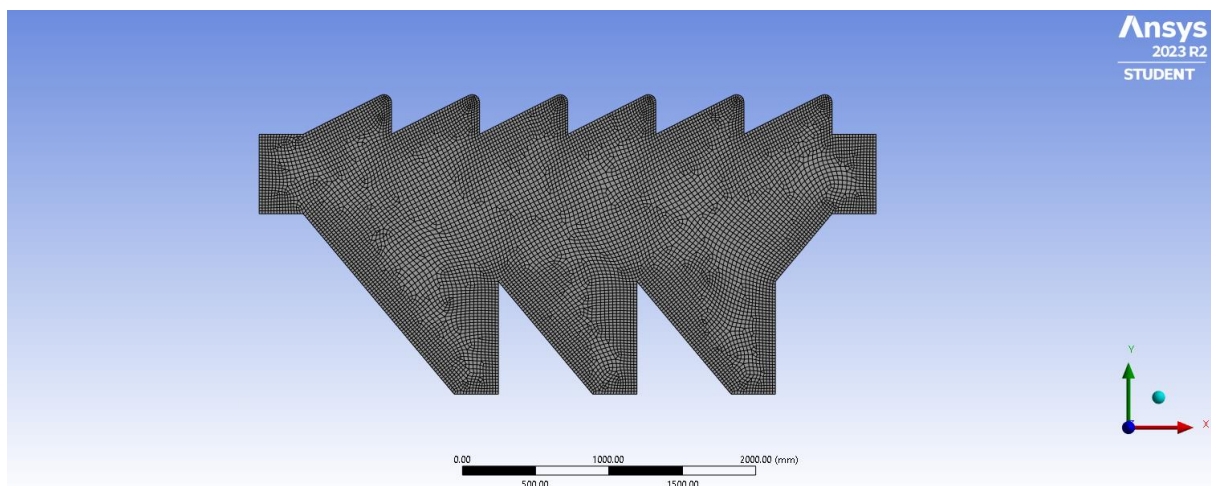


Figura 17: Mallado utilizado en el análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación

En ella se observa que predominan los elementos cuadrados, típicos de volúmenes finitos asociados a fluidos, aunque como es normal el software malla las superficies más complicadas utilizando triángulos, que son más típicos de volúmenes finitos asociados a análisis mecánicos.

Para evaluar la calidad de esta malla se analizan los indicadores que se muestran a continuación:

- Aspect Ratio: a continuación, se muestra una imagen en la que se presenta un mapa de colores sobre el dominio que indica el valor de este índice en los diferentes volúmenes finitos de la malla generada.

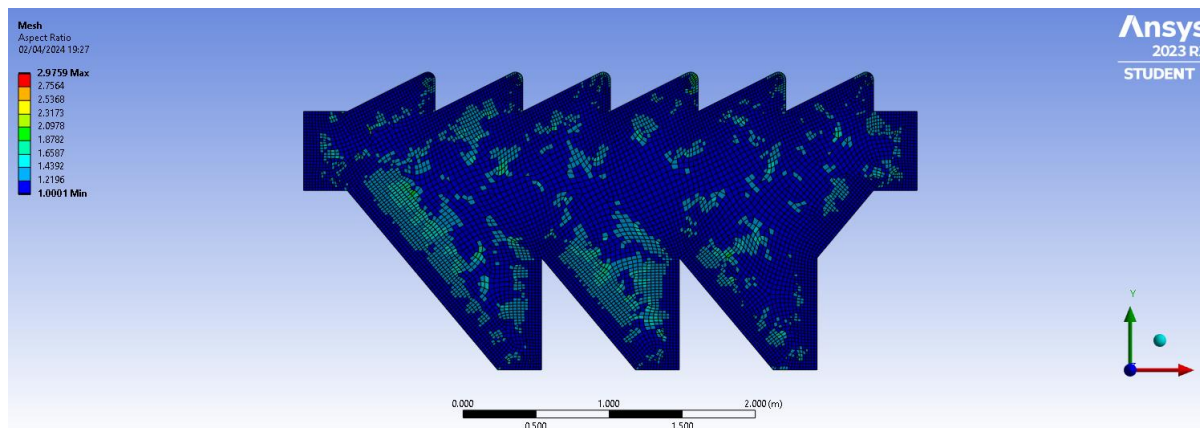


Figura 18: Aspect Ratio de la malla de la figura (16)

En esta imagen se observa que la malla tiene en su mayoría una ratio de aspecto cercana a la unidad, con un comportamiento algo peor en las zonas más complicadas de la geometría, como curvas y zonas de transición entre elementos mayores y elementos de menor tamaño. El intervalo en el cual se considera que una discretización es aceptable es entre 1 y 10 de ratio de aspecto. En este caso, dado que se ha obtenido un máximo de 2.9759 en este índice se deduce que la calidad de la malla es más que aceptable.

- Orthogonal Quality: se presenta a continuación otro mapa de colores que muestra el valor de la calidad ortogonal de la malla en cada una de las zonas del dominio fluido.

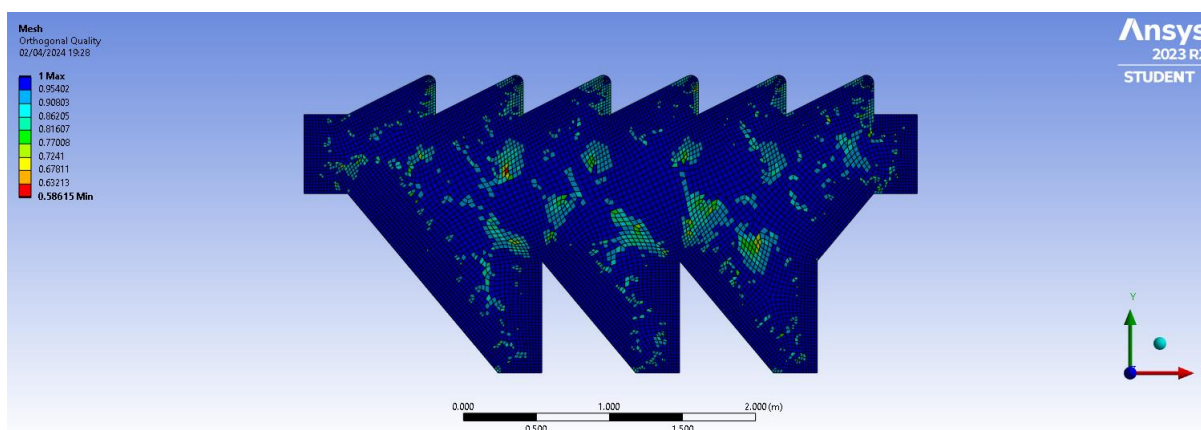


Figura 19: Orthogonal Quality de la malla de la figura (16)

Igualmente se observa en esta imagen que en su mayoría los elementos son perpendiculares unos a otros, esto se debe principalmente a que el mallado en gran parte se ha realizado con celdas cuadradas como ya se ha mencionado previamente. Existen zonas en las que el software ha tenido que mallar con triángulos o trapecios en las que la malla se encuentra un poco peor en lo que a este índice se refiere. Aun así, dado que el mínimo se encuentra muy localizado y en un rango mayor que el mínimo aceptable (0.4) se acepta la malla generada. Habiendo analizado estos índices se concluye que la malla tiene una calidad buena, se pasa determinar las “Named selections”, este paso es crucial para que en pasos posteriores al configurar la simulación el software detecte automáticamente cuales son las entradas y salidas de fluido.

En este caso se seleccionarán los bordes A y B mostrados en la siguiente figura como Inlet y Outlet, entradas y salidas de gases.

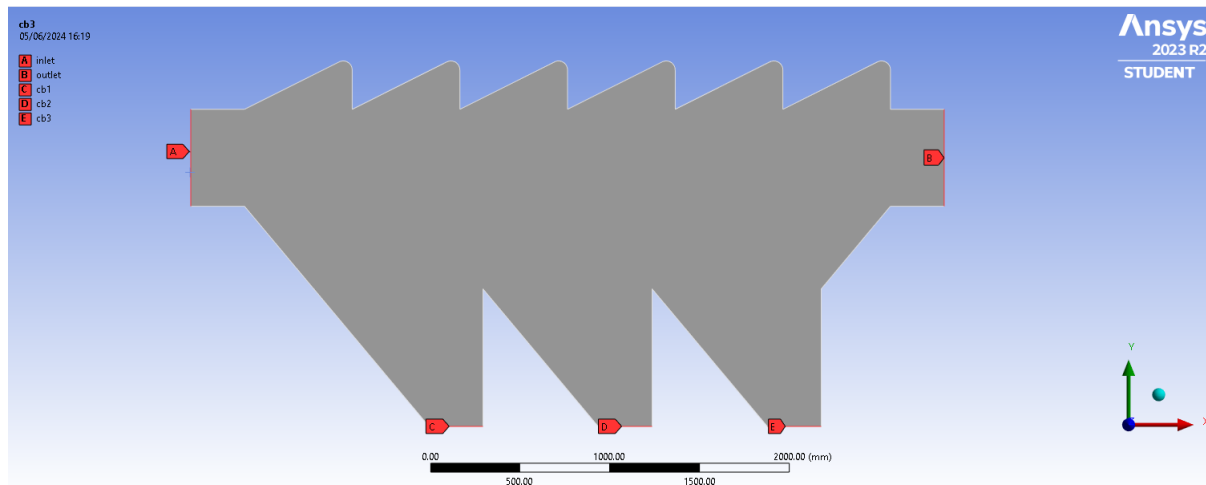


Figura 20: Named Selections del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación

Además, las zonas etiquetadas como C,D y F en la imagen son las llamadas “collection bin” que actuarán como depósitos de partículas precipitadas.

4.2.1.3 Configuración de la simulación

Como se comentó en párrafos anteriores en este paso, una vez discretizado el volumen de control, se especificarán las condiciones iniciales y de contorno, además de elegir las ecuaciones que se van a resolver en función de las soluciones que se esperen de la simulación. Por otro lado, también se determinarán condiciones de convergencia en el cálculo y otros parámetros como número de iteraciones máximas.

Para realizar la configuración de la simulación se abre el módulo de setup de ANSYS Fluent cuya interfaz es diferente a la del módulo de mallado, aunque la disposición de los menús es muy parecida. En la siguiente figura (21) se muestra el módulo de setup ya abierto con el mallado ya cargado y las superficies de entrada y salida de fluido marcadas en colores azul y rojo respectivamente.

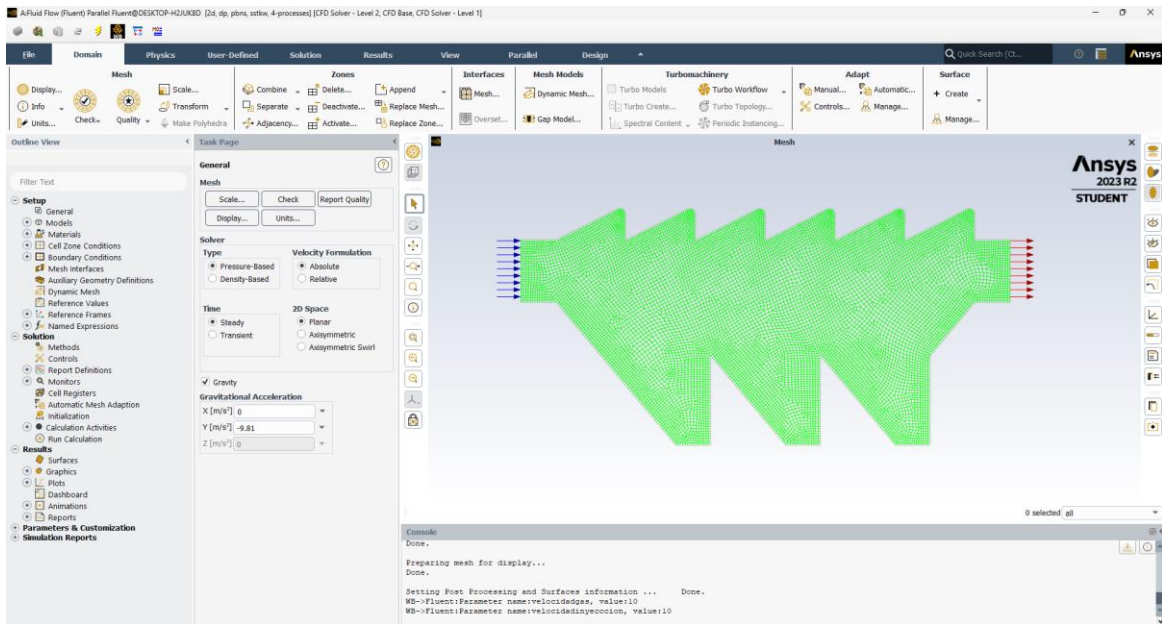


Figura 21: Interfaz de ANSYS Workbench en el setup de Fluidflow (Fluent)

En el menú vertical de la derecha se encuentran las diferentes opciones de configuración ordenadas secuencialmente, en la parte superior del menú se encuentran las diferentes opciones de configuración del modelo. El primer menú que sale por defecto al cargar este módulo es el general, en él se pueden activar y desactivar características generales del modelo como el tipo de solver, la declaración de la aceleración gravitatoria o la configuración para un análisis en dos dimensiones en la que se especifica si el modelo parte de un modelo en tres dimensiones, cual es la simplificación que se ha hecho (axisimetría, sección plana, etc.). Será especialmente importante para este modelo, dado que el funcionamiento de este separador se basa en el predominio de la fuerza gravitatoria sobre las aerodinámicas en las partículas más gruesas, declarar el vector de la aceleración gravitatoria en dirección del eje Y negativo. Para este análisis será de interés concretar un modelo viscoso y activar la opción de fase discreta para poder declarar una inyección en una de las líneas que componen los límites del dominio en dos dimensiones. A continuación, se presenta una tabla que describe a grandes rasgos el uso de los diferentes modelos viscosos de los que dispone ANSYS Fluent.

Modelo de viscosidad	Numero de ecuaciones	Uso del modelo
Spallart-Almaras	1 ec.	Flujos turbulentos de alta velocidad sobre superficies aerodinámicas
Standard $k - \varepsilon$	2 ec. + 2 inc. (k - energía cinética turbulenta, ε - disipación de energía)	Flujos con recirculación, separación de flujo, no capta bien efectos de capa limite ni gradientes de presión
RNG $k - \varepsilon$	2 ec. + 2 inc. (k - energía cinética turbulenta, ε - disipación de energía)	Versión mejorada del $k - \varepsilon$, corrige las deficiencias en cuanto a capa limite y gradientes de presión
Realizable $k - \varepsilon$	2 ec. + 2 inc. (k - energía cinética turbulenta, ε - disipación de energía)	Mejora el cálculo de la disipación, mejora calculo para régimen transitorio
Standard $k - \omega$	2 ec. + 2 inc. (k - energía cinética turbulenta, ω - tasa de disipación de energía específica)	Mejora la captura de la capa limite, apropiado para flujos compresibles, no muy adecuado para bajas velocidades de flujo
SST $k - \omega$	2 ec. + 2 inc. (k - energía cinética turbulenta, ω - tasa de disipación de energía específica)	Corrige y mejora comportamiento para bajas velocidades, apropiado para simulación de flujos en sistemas industriales
$k - kl - \omega$	3 ec. (k - energía cinética turbulenta, kl - energía cinética laminar, ω - tasa de disipación de energía específica)	Mayor precisión en zonas de transición laminar-turbulento
Transition SST	-	Mayor precisión en zonas de transición laminar-turbulento
$v^2 - f$	-	Similar a $k - \varepsilon$, no aplicable a multifase
RSM		Modelo de turbulencia más avanzado de todos, flujos muy complejos (mayor coste computacional)

Tabla 3: Modelos de viscosidad

Para este modelo se ha decidido utilizar el modelo SST $k - \omega$ dado que las velocidades que se van a simular son bajas, el flujo es compresible y además se el dominio utilizado se podría considerar de un sistema industrial. Por otro lado, también este modelo es capaz de captar correctamente los fenómenos de capa límite lo cual es favorable de cara a conocer el comportamiento del gas y las partículas en zonas cercanas a las paredes.

Será igualmente importante para este análisis activar el modelo de fase discreta para poder declarar una inyección de partículas a la entrada del separador. Los datos que es necesario especificar al software de cálculo para tener correctamente caracterizada la inyección son los siguientes:

- Tipo de inyección: este parámetro se refiere a si la inyección será a través de una superficie (en este caso será una línea ya que es un modelo plano), si se inyectará una partícula o un grupo de partículas, etc.
- Tipo y material de la partícula de fase discreta: en esta opción se elige el tratamiento que se espera que el software le asigne a la partícula, es decir, que sea tratada como una partícula sin masa o como un sólido inerte con masa. El material se elegirá de la librería que tenga precargada ANSYS.
- Distribución de tamaño de partícula: este parámetro especifica si son partículas con tamaños constantes o por el contrario si su diámetro se distribuye en función de alguna distribución estadística (Normal, Weibull, Weibull logarítmica o definida por el usuario).
- Velocidad de inyección de las partículas
- Caudal másico de partículas
- Forma de las partículas: este parámetro se refiere a la forma de una partícula representativa de la inyección (esférica, no esférica, otros modelos)

En este proyecto, puesto que se está realizando un prediseño de estos sistemas de limpieza muchos de estos parámetros son desconocidos a priori, por tanto, lo que se ha hecho es realizar hipótesis lógicas. Para el tipo de inyección, se ha especificado la superficie de “inlet” como punto de partida de las partículas, además la inyección se realizará con una velocidad normal a esta superficie de igual valor que la velocidad del gas a la entrada, calculada anteriormente. En cuanto al material de las partículas, depende del terreno en el que se construya la planta, en este caso siguiendo la lógica se ha seleccionado, de los materiales disponibles en la librería de ANSYS, el carbonato cálcico CaCO_3 un material que sería posible encontrar en zonas con formaciones de roca caliza.

Por otro lado, teniendo en cuenta esta última hipótesis se resalta que los resultados obtenidos de estos estudios, dada la pequeña diferencia de densidad que existe con otros materiales como el óxido de silicio (arena) podrían ser perfectamente extrapolables.

Es importante tener en cuenta también que las partículas que vayan en suspensión en la corriente de CO_2 no tendrán un diámetro constante, por tanto, para simular este detalle se ha decidido probar tanto este modelo como todos los que se analicen en este proyecto siguiendo una distribución de Weibull con un diámetro mínimo de 1 micrómetro, un diámetro medio de 500 micrómetros y un diámetro máximo de 1 milímetro.

Se asumirá también, dado que no se tienen datos, que las partículas se mueven a la misma velocidad del gas tal y como se ha comentado previamente. El software tratará a efectos aerodinámicos (fuerzas aerodinámicas: drag y lift) a las partículas como sólidos esféricos con masa.

Por último, el caudal masico de partículas será de 0.1kg/s , este valor parece razonable, teniendo en cuenta que la presión de la descarga se realiza a unos 60bar y que para esta presión y temperatura ambiente la densidad del CO_2 es de aproximadamente 190kg/m^3 lo cual supone una relación entre el caudal masico de gas y de partículas de un 0.036% . Se concluye con esto que el caudal supuesto es razonable, aunque las condiciones de diseño son posiblemente más restrictivas que las condiciones en operación real.

Tras activar las ecuaciones que se van a resolver, se abre una pestaña en la que se cargan los materiales que se van a utilizar para el volumen de control y los límites de este. En este caso dado que solamente se ha modelado el dominio fluido se escogerá únicamente el fluido como CO_2 .

Las condiciones de contorno en un problema de dinámica de fluidos computacional (CFD) son especificaciones que definen cómo el fluido interactúa con los límites del dominio de simulación, en este caso las líneas del boceto de la figura (14) de la cámara de sedimentación en el dominio 2D que se va a simular. Estas condiciones son esenciales para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el flujo de fluidos, ya que proporcionan la información necesaria para modelar adecuadamente el comportamiento del fluido en las interfaces del dominio de interés.

En este modelo, para todas las líneas que no forman parte de la salida o entrada de flujo o las zonas etiquetadas en la figura (20) como “Collection Bin” se ha impuesto una condición de “No Slip”, lo cual hace que las partículas de fluido cercanas a la pared en cuestión tengan velocidad relativa nula con respecto a esta pared. Con respecto al comportamiento de estas paredes en lo que se refiere a las partículas sólidas, estas deben rebotar en ellas, lo que supone imponer en la pestaña DPM la condición de “Reflect”.

Para las tres collection bins se ha declarado la condición de “Trap”, para que las partículas que caigan en esta zona sean atrapadas y de este modo ya no se tengan en cuenta para el cálculo iteraciones posteriores.

Para la línea de entrada de fluido “Inlet” se ha impuesto la condición de “Velocity Inlet”, es decir se impone un perfil de velocidades constante para toda esa sección, la magnitud de este perfil es de 4.518m/s y fue calculada en el apartado de modelado de las diferentes geometrías. Además, para terminar de concretar su comportamiento respecto a la fase discreta en esta superficie se ha declarado que las partículas deben escapar de ella, cruzándola así, en el sentido de flujo.

Cabe resaltar que, aunque las condiciones de operación no son exactamente las que se han impuesto en la simulación, pues la condición de entrada debería ser un “Pressure Inlet” a 60bar de presión manométrica, esta condición de contorno no valdría para realizar el análisis de velocidades que se realizara para determinar las velocidades máximas operativas. Mas tarde se impondrá esta condición de contorno para determinar la pérdida de carga de este y de los demás separadores diseñados y se observara si un cambio en la presión del gas a la entrada tiene efecto en el rendimiento de separación.

Finalmente, para la línea de salida de fluido “outlet” se ha impuesto la condición de contorno “Pressure-Outlet”, lo cual quiere decir que toda esa sección estará a presión manométrica nula, o lo que es lo mismo, a

presión atmosférica. El comportamiento de esta superficie respecto a las partículas de fase discreta es exactamente el mismo que el de la entrada de fluido, “Escape”.

Es importante entender cuáles son las condiciones de contorno del flujo del problema real, y como deben imponerse para la simulación que se esté realizando, especialmente en las entradas y salidas de fluido, pues son estas las que más importancia tienen al determinar la solución final de un problema de este tipo.

Las condiciones en los casos que se van a analizar se han impuesto entendiendo que el flujo vendrá determinado por un caudal o velocidad a la entrada del dominio junto con el área de dicho conducto de entrada y una presión en la superficie de salida. De esta manera, se entiende que si se tienen las variables velocidad y presión para ambas regiones (entrada y salida), solo se podrán imponer dos de ellas, pues al imponer más el sistema estaría sobredeterminado. Esto físicamente se traduce por ejemplo en lo siguiente; dada una presión a la entrada de una geometría conocida y también la presión a la salida, el flujo del gas o líquido que circule estará determinado por esta pérdida de carga.

Tras terminar de configurar en la pestaña de “Setup” se pasa a la parte de “Solution” en la cual se van a definir los reportes que determinarán los caudales masicos de partículas salen por las superficies correspondientes a collection bins y salida de flujo de gas. En la sección de “Report Definitions” se declaran los tres reportes de masa escapada por cada uno de los collection bins y uno adicional para la salida de fluido (“Outlet”). Finalmente se utilizarán estos reportes para definir condiciones de convergencia adicional para esta simulación.

Las condiciones de convergencia para un análisis de elementos finitos son criterios que determinan cuando una simulación ha alcanzado una solución estable y suficientemente precisa. La convergencia de una solución se refiere al momento en el que las variables del flujo, en el caso de un análisis CFD, dejan de cambiar significativamente entre iteraciones sucesivas. La convergencia de una simulación no garantiza que el análisis sea correcto físicamente, solamente constata que las soluciones son matemáticamente estables y que por mucho que se siga iterando la solución no cambiará. Es trabajo del usuario determinar si las soluciones que se han calculado tienen o no sentido físico.

Por defecto ANSYS trae activados sus propios criterios de convergencia, que dependen de las ecuaciones que se estén resolviendo, y que por defecto están establecidos en $1 \cdot 10^{-3}$ para todas las variables. Si se tiene activado un modelo viscoso tipo $k - \omega$, el software calculará la variación de estas dos variables para iteraciones sucesivas (residuos), junto con las de las componentes de la velocidad (x e y en este caso) y la de la continuidad y no parará de calcular hasta que estas variaciones estén por debajo de $1 \cdot 10^{-3}$. Adicionalmente, como se ha mencionado antes, se han declarado condiciones de convergencia para los reportes de masa de partículas escapada por las collection bins y por la salida de gases para asegurar que el comportamiento de las partículas es estable y no cambiará si se sigue iterando el modelo.

Una vez determinados los criterios de convergencia, se declararán las variables de control para el instante inicial (inicialización) y se especificará el número máximo de iteraciones que el solver ejecutará. Obviamente

para que el análisis se dé por bueno no debe llegarse al máximo de iteraciones, sino que deben cumplirse antes los criterios de convergencia y entonces el cálculo habrá terminado.

4.2.1.4 Post-procesamiento

Resuelta ya la simulación, se visualizan los datos que el programa saca por pantalla, por defecto sacará primero la gráfica de residuos, en la que se debe comprobar que efectivamente todas las variables tienen un residuo que se encuentra por debajo de la tolerancia definida por defecto en el programa ($1 \cdot 10^{-3}$). En la figura (22) se presenta la gráfica de residuos de esta simulación.

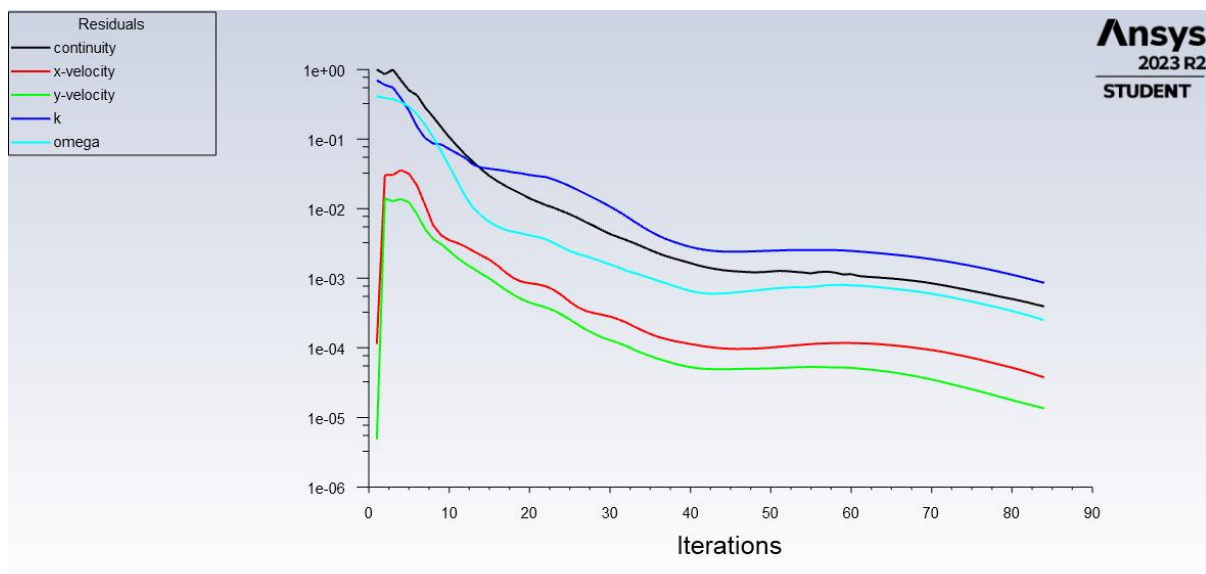


Figura 22: Residuos del análisis de elementos finitos de la geometría bidimensional de la cámara de sedimentación

Comentados en el modelo 2D de la cámara de sedimentación En esta figura se puede ver que todas las variables en las últimas iteraciones calculadas tienen unos residuos por debajo de la tolerancia y por tanto habiéndose satisfecho también las condiciones de convergencia de los demás reportes el software ha parado en

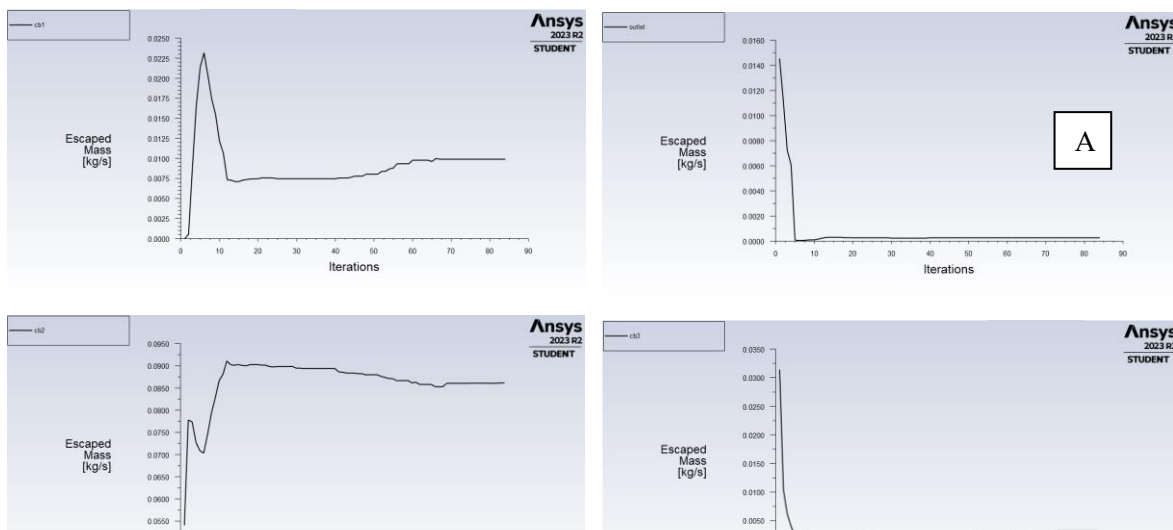


Figura 23: Reportes de "Escaped Mass" en los diferentes depósitos y en la salida de gases de la cámara de sedimentación

menos iteraciones de las máximas que se habían declarado. A continuación, en la figura (23) se presentan los reportes para las diferentes collection bins y para la salida de fluido.

En adelante, todas las figuras etiquetadas con la letra A se referirán a salidas de gases, las no etiquetadas se referirán a salidas o depósitos de sólidos.

Tomando en cuenta estas cuatro figuras se puede observar que la mayor proporción del caudal masico, un 86%, sale por el segundo depósito de sólidos, mientras que el primero y el tercero obtienen una relación del 9.9% y 3.2% respectivamente. Por su parte el outlet se lleva el 0.25% de partículas, es decir solamente el 0.25% del caudal masico de partículas que pasan por la sección de entrada llegan a salir, lo cual supone una eficiencia de separación del 99.75% para la distribución de partículas simulada y la velocidad de inyección impuesta. Lo que ocurre con el resto de las partículas para que el sumatorio de todos los caudales que escapan por alguna superficie no salga 0.1kg/s es que se quedan dentro de la cámara de sedimentación.

Se presenta en la siguiente figura (24) , un gráfico que muestra las trayectorias de las partículas según su diámetro.

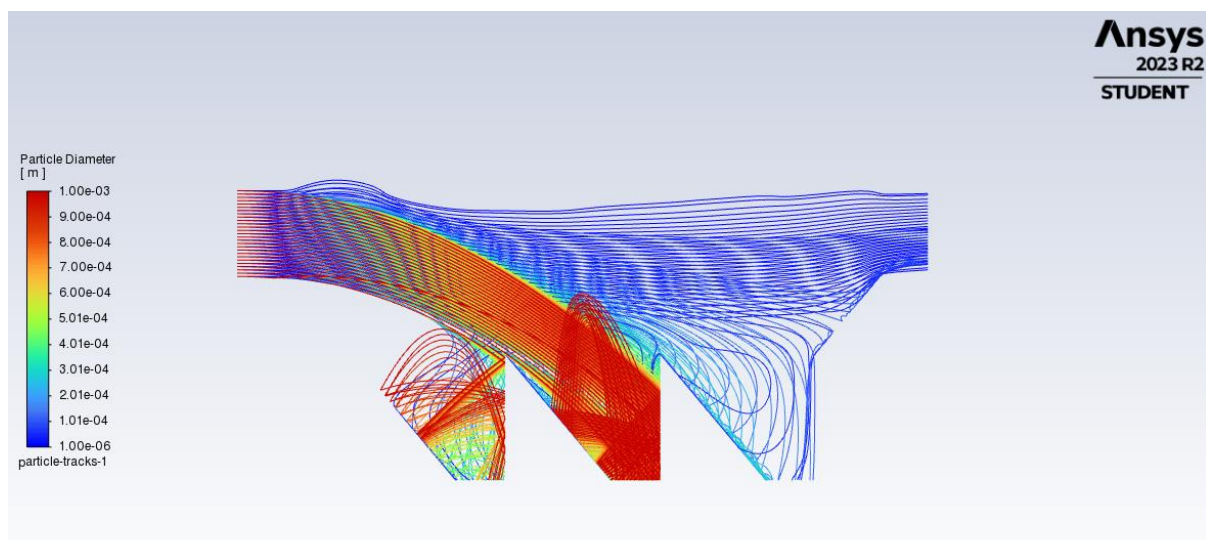


Figura 24: Trayectoria de las partículas en la cámara de sedimentación bidimensional

En esta imagen se muestra gráficamente lo que ya se había visto matemáticamente con las gráficas anteriores, se observa que debido a la inercia las partículas caen en mayor cantidad en el segundo deposito (collection bin), tras rebotar varias veces en las paredes del dominio. Igualmente, las partículas que van más bajas en la sección de entrada caen en el primer deposito. Se observa que las partículas que caen mayoritariamente en estos dos depósitos son las de mayor tamaño (de $30\mu\text{m}$ a 1mm) y por tanto las de mayor masa, a las que como se explicó anteriormente les afecta más el efecto gravitatorio que el aerodinámico en cuanto la velocidad de flujo disminuye. Para esta velocidad, se podría concluir que el menor tamaño que la cámara de sedimentación diseñada es capaz de separar es de 100 micrómetros, es decir, todas las partículas que tengan un diámetro por

debajo de este serian arrastradas por el flujo de gas hacia la salida del separador, pasando hacia, los sistemas que se encontrarán aguas abajo.

Es interesante observar, además del comportamiento de las partículas, el comportamiento que tiene el gas dentro del volumen de control. Se muestra en la figura(24) un mapa de colores en el que se ven las líneas de corriente que siguen las partículas de fluido coloreadas según su velocidad.

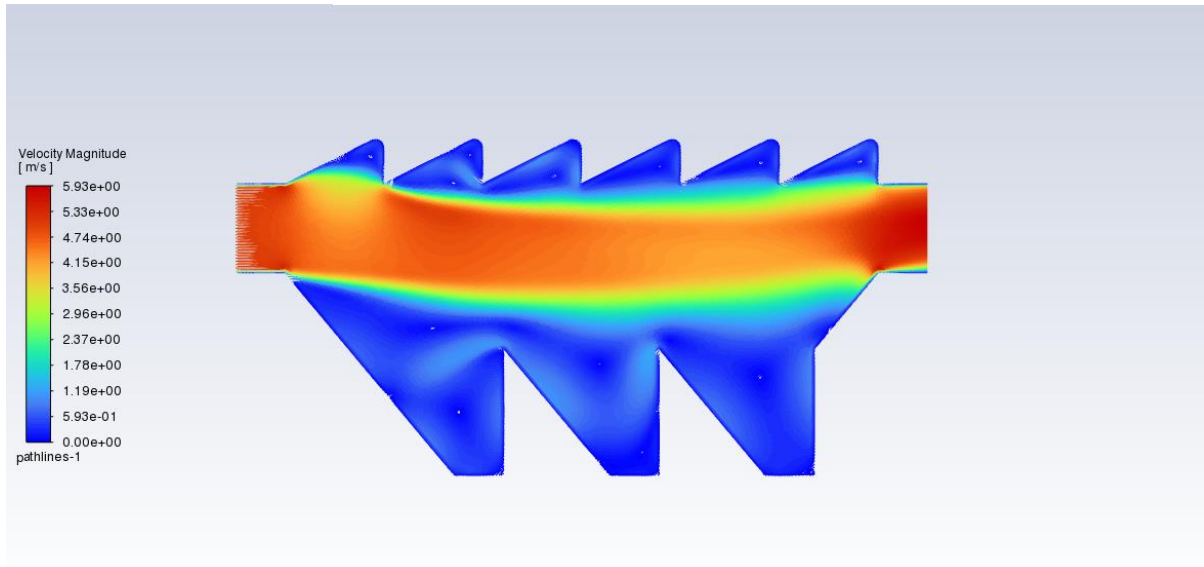


Figura 25: Trayectorias de las partículas de gas en la cámara de sedimentación bidimensional

En este mapa de colores se observan las líneas de corriente con mayor velocidad en colores más cercanos al rojo y las líneas de corriente con flujo más lento en colores azules. Lo primero que se puede observar es que el gas tiende a rellenar todo el volumen de control una vez que entra en la cámara de sedimentación, aunque se aprecian también ciertos puntos blancos, por los que se supone que ninguna línea de corriente pasa, esto ocurre debido a que se producen turbulencias en esa zona. La zona alrededor de la que se producen estos remolinos, es una zona en general con mayor presión estática y menor presión dinámica, es por ello por lo que estos puntos blancos siempre se encuentran en zonas de baja velocidad.

Se observa también como en los conductos de entrada y salida de flujo hay un gradiente muy acusado, es decir, la velocidad de las partículas varía mucho en dirección perpendicular a la pared en muy poco espacio. Este fenómeno ocurre debido a la condición de contorno que se ha impuesto en estas paredes, en la que como se comentó anteriormente la velocidad relativa de la partícula fluida más cercana a la pared tiene velocidad relativa cero con respecto a la propia pared. Por otro lado, dado que el gas solo tiene una salida, una vez que entra en algún recoveco, como un depósito de sólidos o uno de los deflectores de la parte superior, debe reconducirse para incorporarse a una línea de corriente que se dirija hacia la sección de salida. Es por esto por lo que se aprecian zonas más claras dentro de las zonas azules, que tienen menor velocidad de flujo, el gas va bordeando todos los obstáculos repasando el contorno de la pared de la cámara hasta que encuentra la salida. También se observa un gradiente menos acusado dentro de la zona intermedia de la cámara de sedimentación.

Finalmente observando los valores máximos de velocidades, se aprecia que hay picos de velocidad por encima de 5m/s en zonas próximas a la salida donde todas las líneas de corriente se unen.

Mas adelante, en apartados posteriores, se mostrarán numéricamente los resultados obtenidos para diferentes velocidades y se comentara cual es el rango de operación óptimo para este tipo de separador.

4.2.1.5 Análisis de sensibilidad

En este subapartado se va a realizar un análisis de sensibilidad de la malla para determinar si los parámetros de la malla tienen influencia alguna en los resultados de la simulación. Este tipo de análisis es una buena práctica cuando se resuelven simulaciones de elementos finitos, para verificar que la discretización es correcta.

Para llevar a cabo este análisis se parte de una configuración del análisis como la que se explicó en apartados anteriores y se varía el tamaño de elemento para verificar que las soluciones tienden a una cierta estabilidad.

En la siguiente figura (26) se muestran para diferente tamaño de elemento de malla los resultados de masa que escapa por cada una de las superficies de interés.

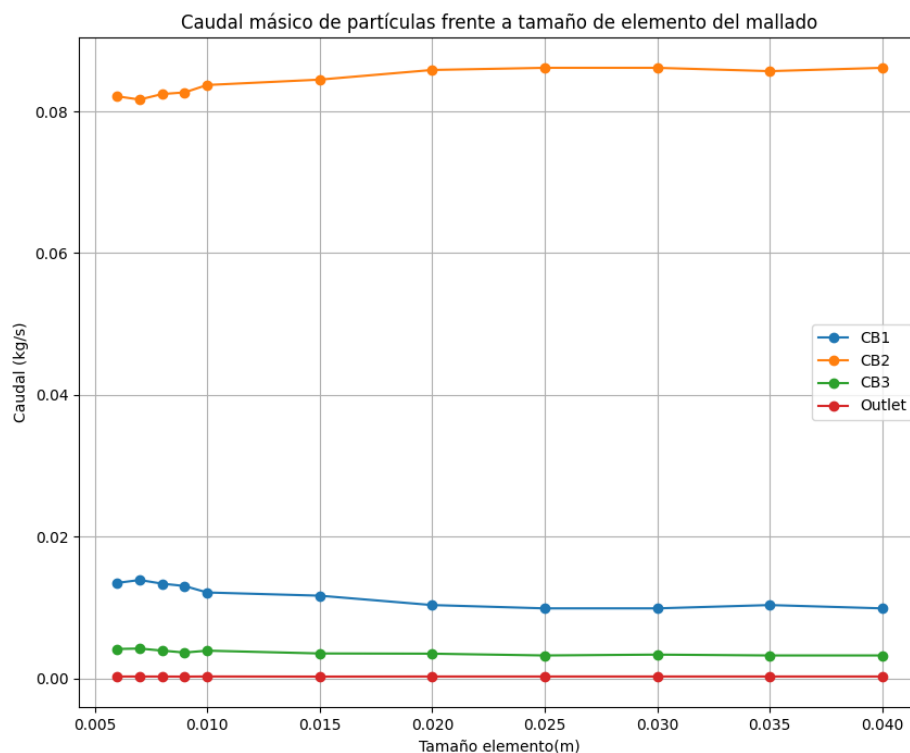


Figura 26: Gráfica de caudal masico de partículas en varias superficies frente a tamaño de elemento del mallado

Se observa que para todas las superficies los valores de masa que pasan a través de ellas son más o menos constantes, lo cual da una cierta idea de que las tendencias de los resultados no deberían cambiar mucho al variar el tamaño de elemento de malla. Aun así, sería conveniente establecer una fórmula para el error relativo y determinar cuál sería el error relativo que se comete para cada tamaño de elemento. En este caso se ha tomado como resultado más correcto el correspondiente al mallado más fino, dado que no existe ningún valor

experimental que se pueda tomar como real. En base a este valor se ha determinado el error relativo para cada punto como define la siguiente expresión:

$$e_{relativo} = \frac{x_{t.e.} - x_{0.06}}{x_{0.06}}$$

En la figura (27) se muestra una gráfica para cada superficie en la que se muestra el error relativo de la solución de caudal de partículas escapadas en función del tamaño de elemento.

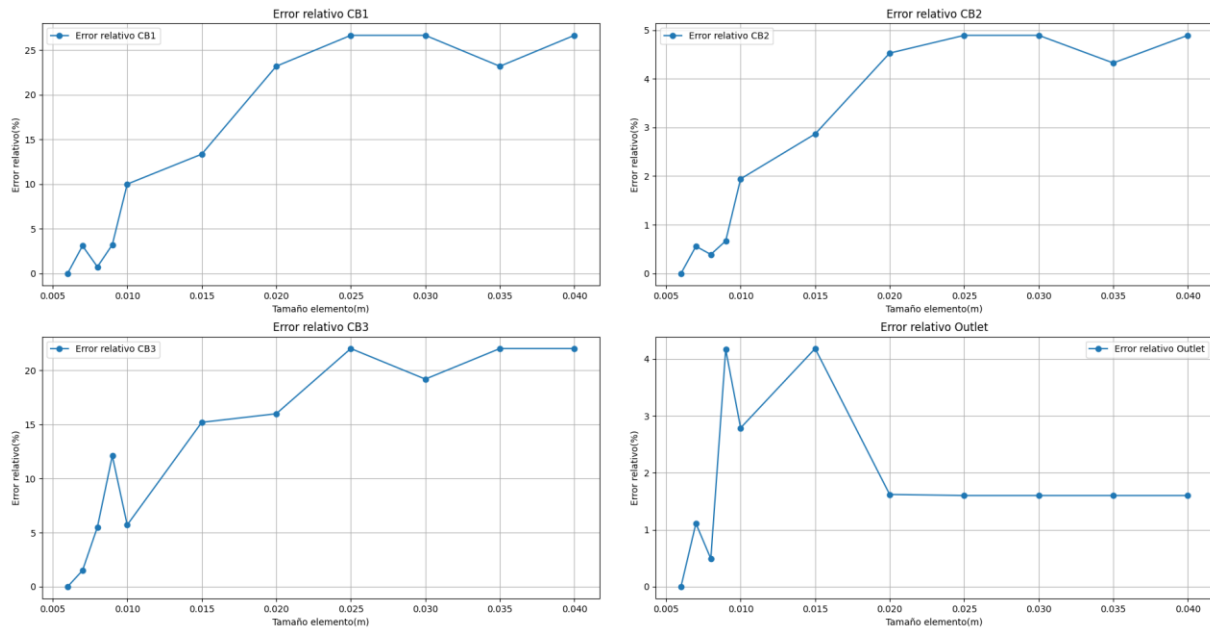


Figura 27: Gráficas de error relativo cometido para las cuatro superficies de interés

En estas cuatro gráficas de la figura (26) se puede observar cómo los errores relativos para tamaños de malla de menos de un centímetro están por debajo del 5%, que para una fase de prediseño como en la que se trata en este proyecto es totalmente admisible. Además, lo más importante sería no cometer un error grande en la superficie de outlet ya que entonces el hecho de tener un error con cierta magnitud podría afectar sobre el funcionamiento del sistema, esto es, si se utilizara este sistema como el único para limpiar la corriente habría que asegurarse al diseñar que los errores que se cometen son muy bajos para cerciorarse de que los equipos que se encuentren aguas debajo del separador no resultaran dañados. Lo realmente importante para este análisis es tener en cuenta que los tres collection bins funcionan como una sola entidad y de este modo si se consideran los errores relativos de todo el conjunto de collection bins se obtendrá lo que se muestra en la figura (28).

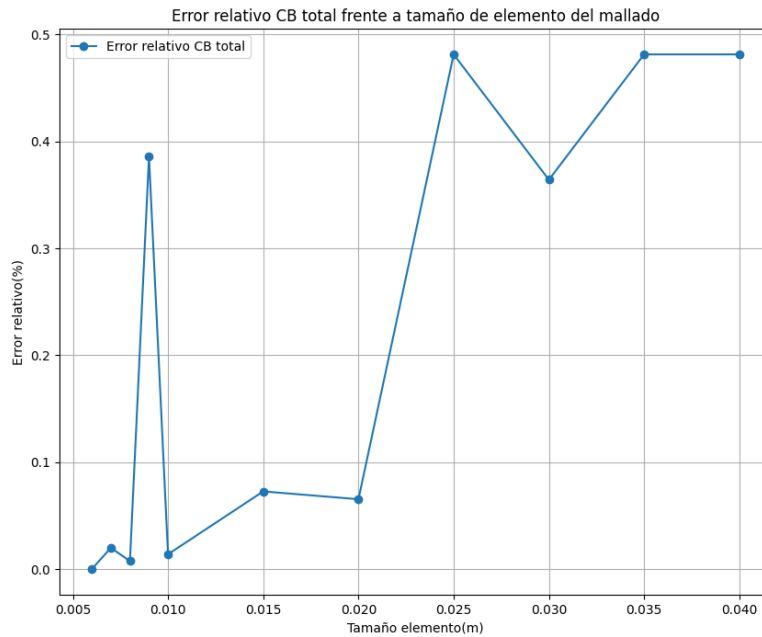


Figura 28 Gráfica de error relativo total de los diferentes “Collection bin” frente a tamaño de elemento de malla

Observando detenidamente la escala, se aprecia que todos los errores teniendo en cuenta el sumatorio de todos los collection bins están por debajo del 0.5% para todos los tamaños de elemento analizados. En resumen, teniendo en cuenta el tamaño de elemento utilizado en los análisis (30mm) se estaría cometiendo un error menor del 0.4% en el valor del caudal de sólidos en los collection bins y menor del 2% en la salida de gas. Se considera que estos errores son más que admisibles, mucho más, teniendo en cuenta que esto supone cierto ahorro de tiempo y recursos de computación al no tener calcular con mayor número de nodos y elementos.

4.2.2 Análisis del dominio 3D

En este apartado se describirá el análisis de elementos finitos que se ha realizado para el modelo en tres dimensiones de la cámara de sedimentación.

El estudio de esta geometría en tres dimensiones con un análisis de elementos finitos se ha realizado con el objetivo de examinar si los resultados del análisis de la geometría en dos dimensiones son extrapolables al caso real. Los pasos seguidos para realizar este análisis son análogos a los seguidos en el apartado anterior, a continuación, se describirán brevemente dichos pasos particularizados para esta geometría.

En este caso como tanto la geometría como el problema se definieron al inicio de los apartados 3 y 4 respectivamente se comenzará directamente por el mallado.

4.2.2.1 Mallado

La malla de este modelo de elementos finitos con dominio en tres dimensiones debería tener tamaños de elemento mayores, teniendo en cuenta que hay que mallar una dimensión más que en el subapartado anterior. En este caso el proceso de mallado será por tanto más lento que en el modelo de dominio en dos dimensiones,

si se determinan tamaños de elemento demasiado pequeños, el software tardará un tiempo considerable en realizar la malla, aunque el tiempo más significativo será el de cálculo, ya que al tener más nodos y elementos el solver tendrá que resolver para todos ellos.

Para este caso se ha tomado un tamaño de elemento por defecto de 50mm y no se han impuesto opciones de mallado como anteriormente puesto que lo que se quiere es determinar si el modelo 2D es extrapolable al modelo tridimensional. En la figura (29) se presenta la malla utilizada para la resolución de este modelo.

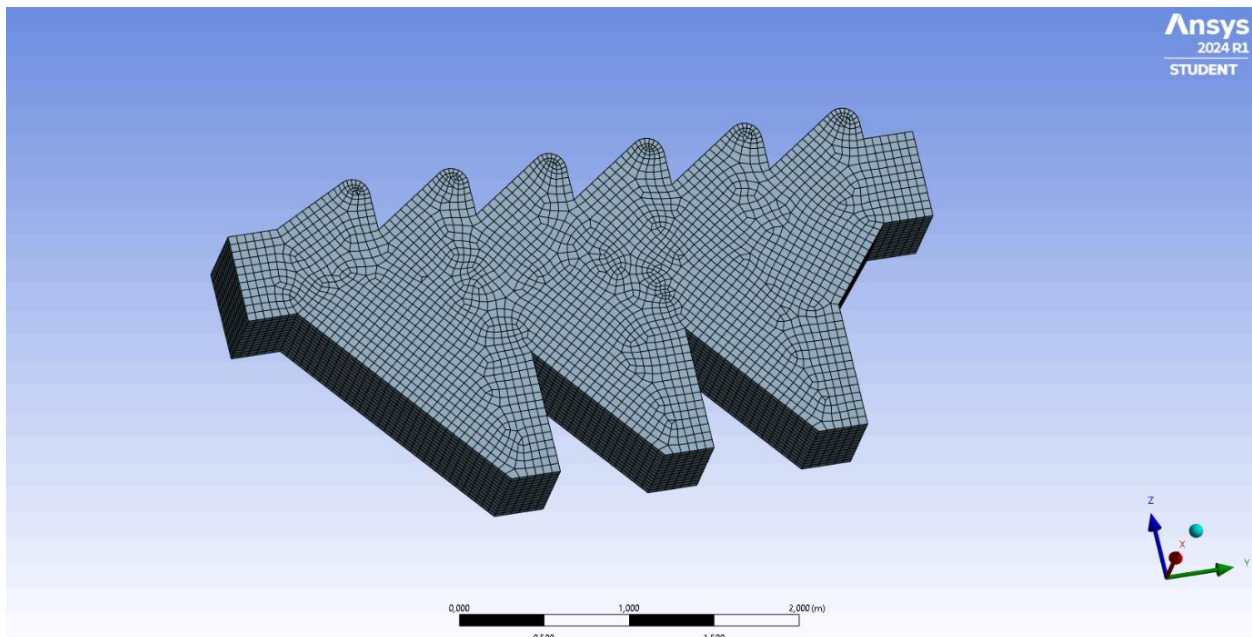


Figura 29: Mallado utilizado en el análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación

Se observa, de la misma manera que en las mallas vistas en apartados anteriores que en las zonas con formas más complejas hay mayor número de elementos, para capturar mejor la geometría. También se ve claramente que hay una cierta preferencia por las celdas cúbicas más que por celdas tetraédricas, esto, como se comentó anteriormente es bastante común de los análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Igual que en el caso anterior también se han comprobado los parámetro de la malla para determinar si la discretización que se ha realizado es adecuada o no. En la figura (30) se presentan los parámetros de malla “Aspect Ratio” y “Orthogonal Quality” .

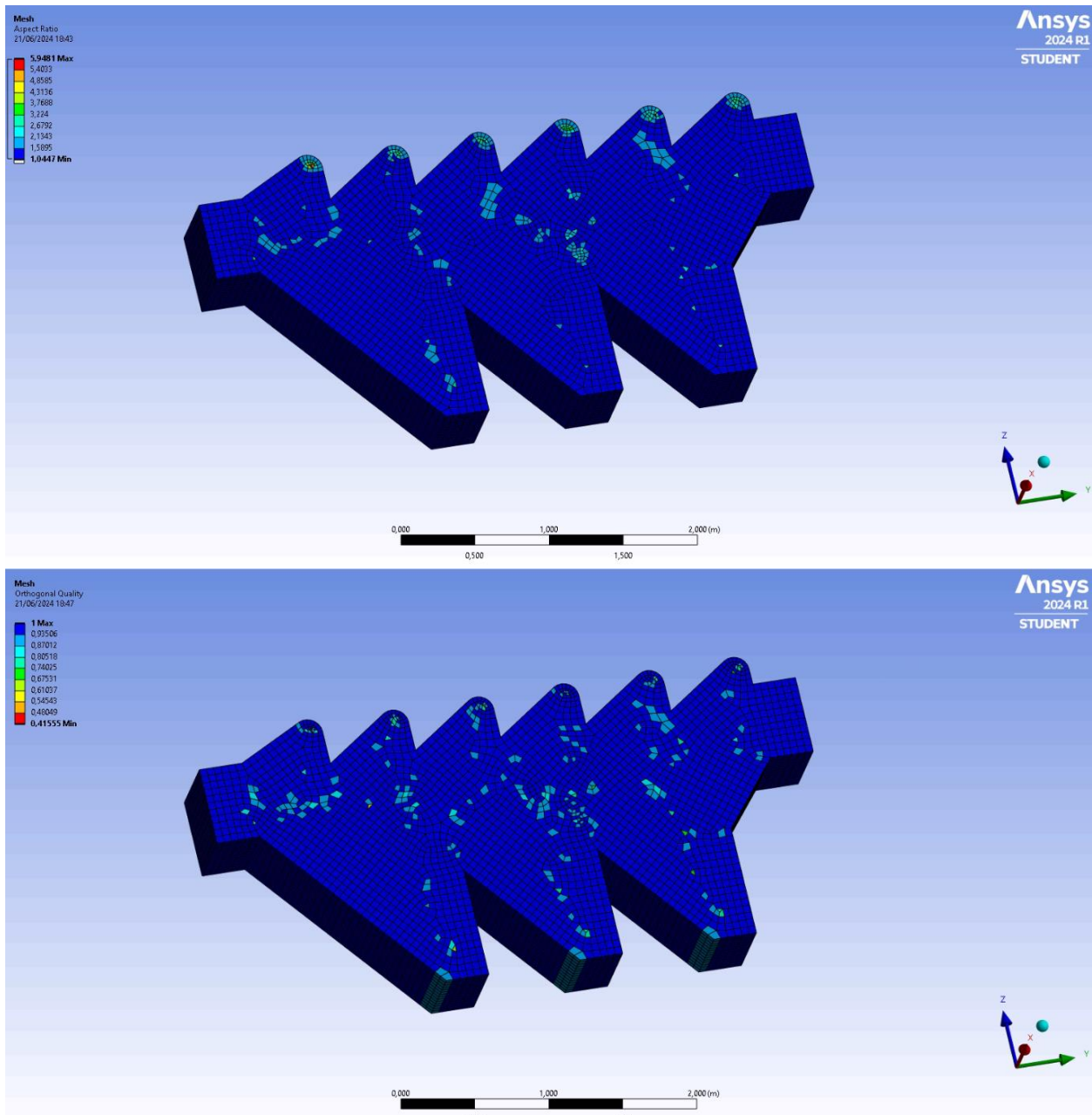


Figura 30: Parámetros de calidad de malla para el análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación

Se observa que ambos parámetros se encuentran dentro de los intervalos que se consideran aceptables para una buena discretización y que se comentaron en el subapartado 4.2.1.2. Por otro lado, si se deseara obtener resultados muy precisos sería necesario refinar la malla utilizando opciones de mallado como diferentes “Sizing” para mallar con más elementos en las zonas más complicadas de la geometría.

En este paso, igual que se hizo anteriormente es necesario declarar las mismas “Named Selections” (Inlet, outlet y collection bins) que en el caso con dominio en 2D, la única diferencia es que ahora en vez de ser líneas serán superficies.

4.2.2.2 Configuración de la simulación

Para este modelo la configuración esta también similar a la del modelo con la geometría bidimensional, en la siguiente tabla (4) se resume la configuración de esta simulación.

Menú	Configuración	Valores / Selección	Comentarios
General	Gravedad	9.81m/s ²	En dirección del eje Z, en sentido negativo
Modelos	Viscosidad	SST $k - \omega$	-
	Modelo de fase discreta	Igual configuración que en el modelo bidimensional	
Materiales	Fluido	Dióxido de carbono	-
Condiciones de dominio	-	-	Seleccionar el volumen de control y asignarle como material el dióxido de carbono
Condiciones de contorno	Inlet	Velocidad en la sección de entrada = 4.5m/s DPM (comportamiento): escape	Estas condiciones de contorno permiten el análisis de un rango de velocidades Caudal volumétrico de gas: 1.464m ³ /s
	Outlet	Presión manométrica en la sección de salida = 0bar DPM (comportamiento): escape	
	Collection bin 1	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin 2	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin 3	DPM (comportamiento): trap	
Reportes	-	-	Crear los mismos reportes que en el caso anterior para las superficies Outlet y Collection bins
Inicialización y Numero de iteraciones	Inicialización Standard	Inlet	-
	Número máximo de iteraciones	600	
Criterios de convergencia	-	Comentados en el modelo 2D de la cámara de sedimentación	Añadir los reportes creados a los criterios de convergencia con la tolerancia por defecto (1e-3)

Tabla 4: Tabla resumen de la configuración del análisis de elementos finitos de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación

4.2.2.3 Post-procesamiento

En este subapartado se mostrarán los resultados de la simulación que se ha configurado para este modelo en tres dimensiones y con estos resultados se sacaran conclusiones sobre el funcionamiento de este separador y sobre la validez del análisis del dominio bidimensional.

Como se ha comentado anteriormente una simulación se considera resuelta cuando se han cumplido todos los criterios de convergencia impuestos. En este caso se han tenido que cumplir todos los que venían establecidos por defecto (continuidad, las tres componentes de la velocidad, energía cinética turbulenta y tasa de disipación específica) y además las otras cuatro que se han impuesto, que hacen que los reportes de masa que sale por cada una de las superficies de interés lleguen a una solución estable. En la figura (31) se presentan los valores de masa escapada por estas superficies para las diferentes iteraciones.

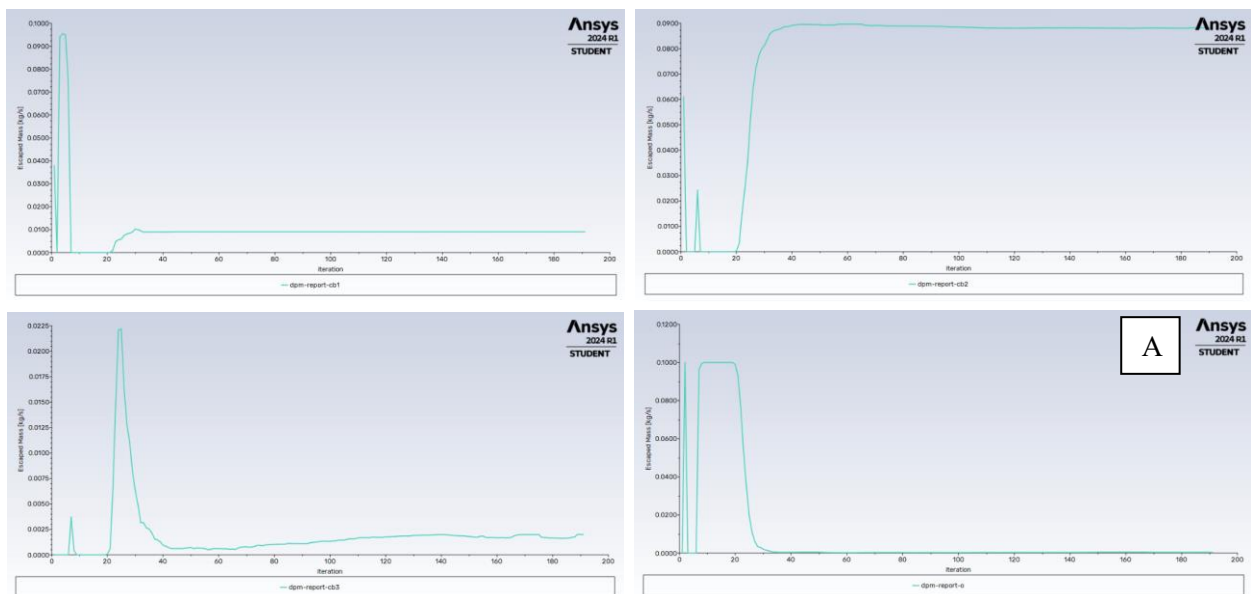


Figura 31: Reportes de “Escaped Mass” de las diferentes superficies de interés

En esta figura se aprecia que todas las gráficas correspondientes a los cuatro reportes han alcanzado finalmente un valor estable y además que la solución ha convergido en menos iteraciones que las máximas establecidas en la configuración, lo cual significa que se han cumplido todos los criterios de convergencia. Analizando los resultados obtenidos para los cuatro diferentes reportes de caudales masicos se podrá establecer una eficiencia de separación de partículas de este sistema. En la tabla (5) se muestra un resumen de los caudales masicos que salen por cada superficie y se calcula la eficiencia de separación para esta geometría.

Superficie	Caudal masico (kg/s)	Relación de caudal ($q_{\text{escaped}}/q_{\text{part}}$)
Collection bin 1	0.009086	9.086%
Collection bin 2	0.08830	88.30%
Collection bin 3	0.001552	1.552%
Total separado	0.098938	Eficiencia de separación
		98.938%
Outlet	$4.58 \cdot 10^{-4}$	0.458%

Tabla 5: Resultados de la simulación de la geometría tridimensional de la cámara de sedimentación

Teniendo en cuenta esta table se puede deducir que los resultados en lo que a la fase discreta se refiere son muy similares a los obtenidos en el apartado anterior para la geometría plana. Igualmente se observa que no todo el caudal de polvos que entra consigue salir, sino que hay una mínima parte que se queda contenida en el volumen de control, en este caso de 0.1kg/s que entran en la cámara de sedimentación, consigue salir el 99.396% de las partículas, aunque no todas ellas se depositan en los diferentes collection bins.

Con el objetivo de aclarar como es el comportamiento de las partículas dentro del separador se presenta a continuación la figura (32) en la que se muestran las trayectorias de algunas de las partículas simuladas.

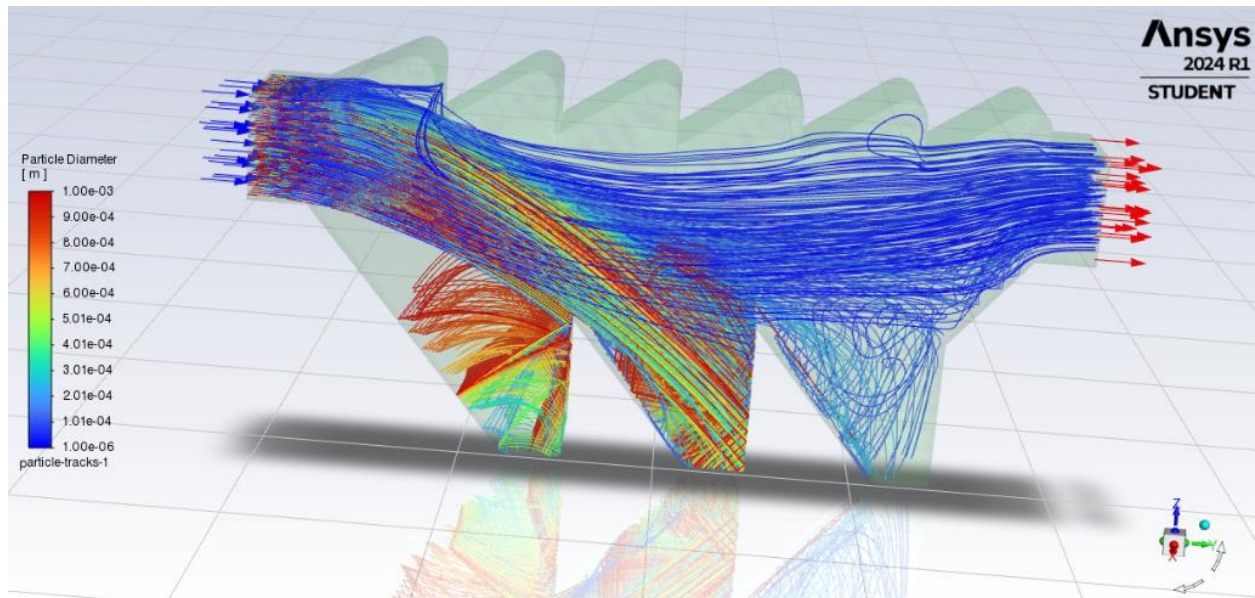


Figura 32: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de sedimentación tridimensional

Se observa que las partículas de mayor tamaño (de $30\mu\text{m}$ a 1mm), como pasaba anteriormente, precipitan sobre todo en los dos primeros depósitos y muy pocas de ellas en el último. Por su parte, las partículas más finas se ven arrastradas por la corriente y llevadas hacia la salida del separador, lo que indica que será necesario establecer una segunda etapa de separación de partículas finas.

Finalmente, en la figura (33) se observa el comportamiento del gas dentro de la cámara de sedimentación.

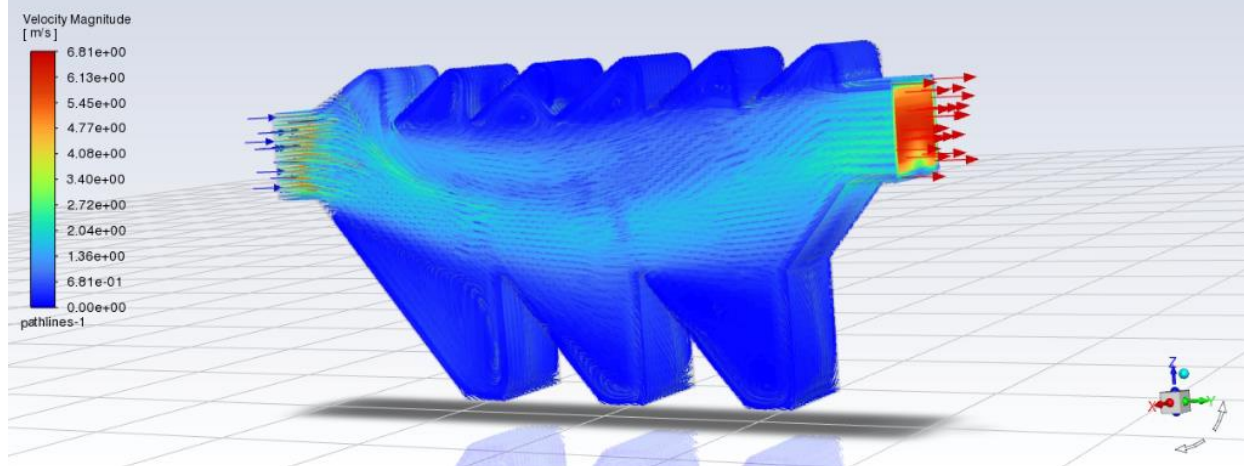


Figura 33: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en la cámara de sedimentación tridimensional

La figura (33) muestra una representación de las partículas fluidas simuladas, coloreadas en función de sus velocidades. En ella se observan los mismos gradientes en las zonas de entrada y salida en dirección perpendicular al flujo que se mostraban en la figura (24) del estudio en dos dimensiones de esta geometría, como ya se comentó, esto se debe al rozamiento con las paredes especificado en la condición “No Slip” de estas superficies. Por otro lado, se ven también las mismas reconducciones del gas en las zonas de los depósitos de sólidos y en los deflectores de la parte superior. Además, la trayectoria de la mayoría de las partículas fluidas tiende a ser la más corta (coloreada en celeste). Por último, los valores en la escala de velocidad son también muy similares al caso anterior, alcanzándose en este caso velocidades algo más de un metro por segundo más altas en la zona de salida.

Teniendo en cuenta el campo de velocidades y presiones calculado y computando la media de presiones para la superficie de entrada y de salida se puede obtener un valor de la pérdida de carga de este sistema. En este caso el valor de la caída de presión para la velocidad de entrada resuelta asciende a 15.91Pa, lo cual para las presiones de operación que se manejan en este proyecto es insignificante.

Con estos resultados, se concluye que los dos estudios son muy similares en cuanto a sus resultados y que por tanto los resultados del análisis bidimensional pueden ser extrapolables al caso real, lo que posibilita el uso del modelo 2D, que es computacionalmente menos costoso, para la resolución y análisis de otras condiciones de operación sin mucha pérdida de precisión en los resultados.

4.2.3 Conclusiones: Ventajas e inconvenientes

En este subapartado se comentarán brevemente las ventajas e inconvenientes de este tipo de separador, de manera que en el caso de que sea necesario escoger alguno de ellos, en el marco de este proyecto, se tengan claros los puntos fuertes y débiles de cada uno de estos separadores.

Las ventajas de la cámara de sedimentación son las siguientes:

- Alta eficiencia y capacidad de separación de partículas grandes: Las cámaras de sedimentación están diseñadas para separar eficientemente partículas grandes y densas del flujo de aire o gas mediante la gravedad, lo que resulta en una alta eficiencia para partículas que se asientan rápidamente. Esto es útil en aplicaciones industriales donde la presencia de partículas grandes es común. En este caso, la cámara de sedimentación es capaz de separar hasta el 98.938% de las partículas introducidas para este estudio.
- Poca pérdida de carga: Las cámaras de sedimentación generan una baja resistencia al flujo de aire o gas, lo que se traduce en una mínima pérdida de presión a través del sistema. Esto implica un menor consumo de energía para mover el aire o gas, resultando en una mayor eficiencia energética y menores costes de operación.
- Sistema compacto (menor coste): Al ser relativamente simples y compactas en comparación con otros sistemas de separación de partículas, las cámaras de sedimentación requieren menos espacio y son más económicas de instalar. La compactidad del sistema reduce los costes de instalación y el espacio requerido, haciéndolo una opción económica para muchas aplicaciones industriales.
- Baja energía para su funcionamiento: Dado que la separación de partículas se basa principalmente en la gravedad, las cámaras de sedimentación no requieren equipos mecánicos complejos o costosos para operar, esto se traduce en un bajo consumo de energía. Además la pérdida de carga calculada refleja que el coste energético de hacer pasar el flujo a través de la cámara de sedimentación es ínfimo.

Algunas de las desventajas de una cámara de sedimentación se enumeran a continuación

- Debe trabajar a bajas velocidades: Para que las partículas se asienten correctamente por gravedad, el flujo de aire o gas debe mantenerse a una velocidad relativamente baja y las partículas no deben tener demasiada inercia. Esto puede limitar la capacidad de procesamiento del sistema, haciéndolo menos adecuado para aplicaciones donde se requiere un alto flujo de aire o gas.
- A velocidades mayores su funcionamiento empeora: Si el flujo de aire o gas es demasiado rápido, las partículas no tendrán suficiente tiempo para asentarse y serán arrastradas a través del sistema sin ser separadas. Esto reduce la eficiencia de separación de la cámara de sedimentación, haciendo que sea menos efectiva en condiciones de alta velocidad de flujo.
- Debe ser mantenida periódicamente: Con el tiempo, las partículas sedimentadas pueden acumularse en el fondo de la cámara, lo que puede obstruir el sistema y reducir su eficiencia. Se requiere un mantenimiento regular para eliminar estas acumulaciones y asegurar el correcto funcionamiento del sistema, lo cual puede implicar paradas de producción y costes adicionales.

4.3 Cámara de choque

En este apartado se va a desarrollar el análisis de elementos finitos realizado para la geometría de la cámara de choque tanto en dos como en tres dimensiones.

4.3.1 Análisis del dominio 2D

Para realizar la simulación del dominio 2D de la cámara de choque o impacto, primero se debe abrir ANSYS Workbench y elegir el tipo de análisis a resolver y el solucionador adecuado, en este caso, Fluidflow con el solver Fluent.

4.3.1.1 Creación de la geometría

El siguiente paso es cargar la geometría de la cámara. Esto se puede hacer importando un archivo STEP, IGES o cualquier otro formato aceptado por el software, o bien generando la geometría directamente en el módulo de modelado de ANSYS. En este análisis específico, se ha generado la superficie importando el boceto que se ha comentado en el apartado de modelado de geometrías y se ha generado dicha superficie en el propio módulo de CAD de ANSYS, quedando como se muestra en la figura (34).

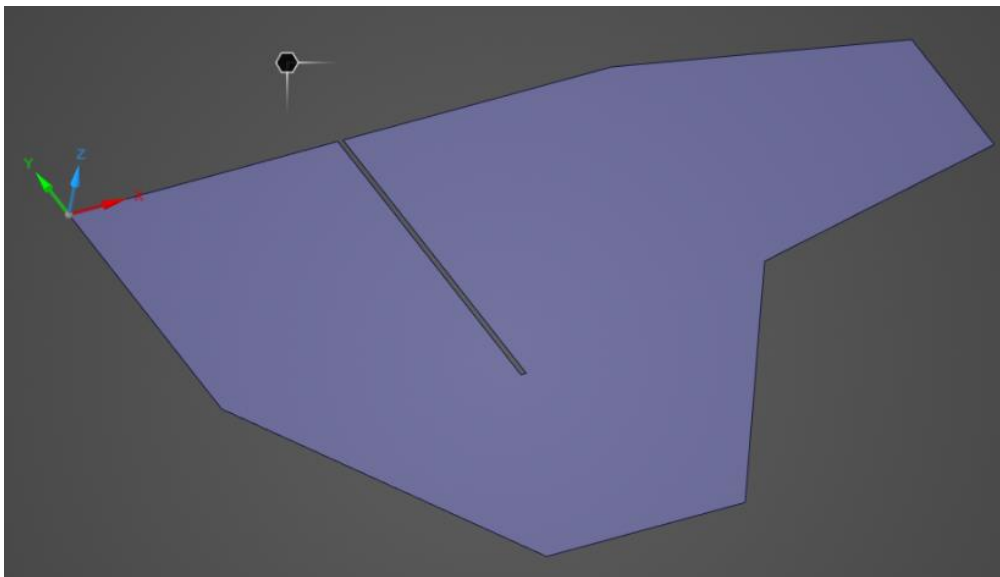


Figura 34: Geometría plana de la cámara de choque

Una vez generada la geometría, se pasa al módulo en el que se realizará el mallado. Este módulo ha sido explicado en profundidad previamente para la cámara de sedimentación, por lo tanto, no será necesario repetir esta información.

4.3.1.2 Mallado

Como primera opción de mallado, se va a realizar un "Edge Sizing" para que el mallado sea más refinado cerca de las paredes, dado que, para el modelo que se quiere estudiar, es crucial tener una buena calidad de solución en estas zonas debido a los choques o impactos que generarán rebotes y porque permite optimizar el uso de

recursos computacionales y mejorar la convergencia de la solución numérica. En la siguiente figura (35) se observan las líneas sobre las que se va a realizar este método de refinamiento de la malla.

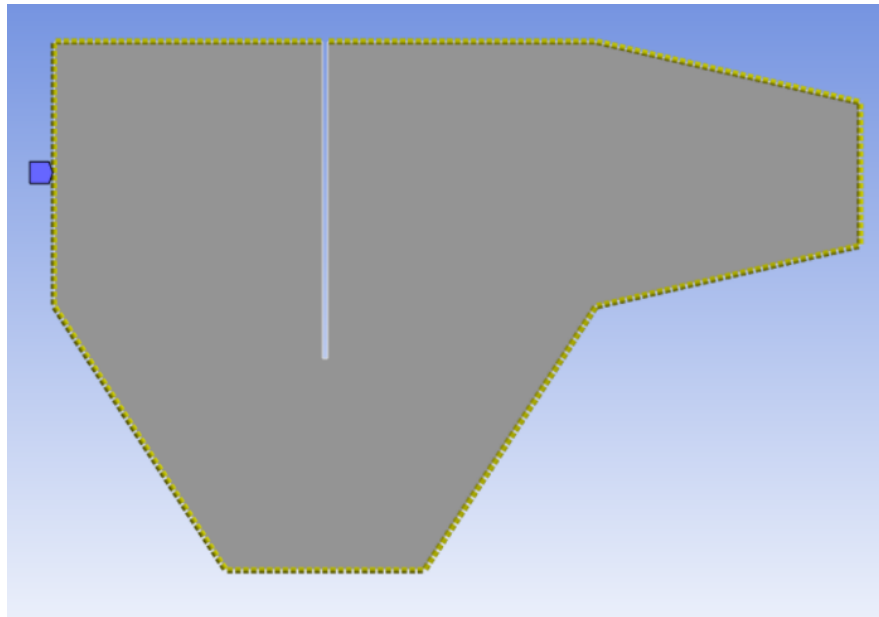


Figura 35: Aristas de la cámara de choque a las que se le aplica el "Edge sizing"

La imagen muestra una geometría con una configuración que abarca 9 aristas, con un tamaño de elemento de 0.015m. En las opciones avanzadas de dicho método, se ha cambiado la opción de "Growth Rate" al valor de 1.05, que permite que el mallado se desarrolle de forma más progresiva a medida que se separa de la zona refinada.

Por otro lado, se ha decidido seleccionar la opción "Inflation" que es una técnica de mallado utilizada para crear capas prismáticas o hexaédricas finas y uniformes a lo largo de las superficies de una geometría, particularmente en las regiones cercanas a las paredes, como se comentó anteriormente. Esto es especialmente importante, porque asegura una mejor resolución de los fenómenos de desviación y frenado de partículas, mejorando así la precisión del análisis de impacto y rebote de las partículas en la placa. A continuación, en la figura (36) se muestra la discretización tomada para este análisis.

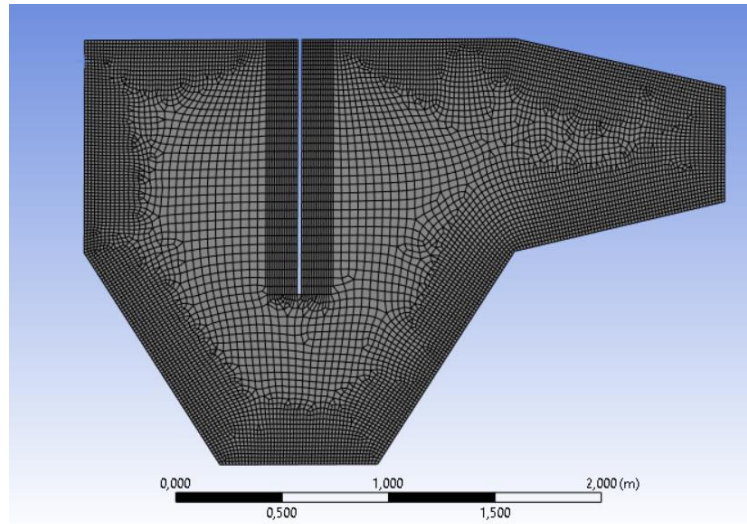


Figura 36: Mallado utilizado para la simulación de la geometría bidimensional de la cámara de choque

En la figura (36), se han considerado todas las opciones explicadas anteriormente. Como se puede observar, diferentes zonas se unen de forma progresiva, con un tamaño de elemento pequeño que proporciona una mayor calidad en los resultados, aunque también conlleva un mayor coste computacional en la resolución.

El siguiente paso sería crear las superficies de entrada, salida y los depósitos de sólidos o “collection bin” que se han comentado anteriormente para que el programa pueda detectarlas en el módulo de “Setup”. Esto se lleva a cabo haciendo uso de las “Named Selections”, al igual que se hizo anteriormente para la cámara de sedimentación. En la siguiente figura (37) se muestran las superficies creadas.

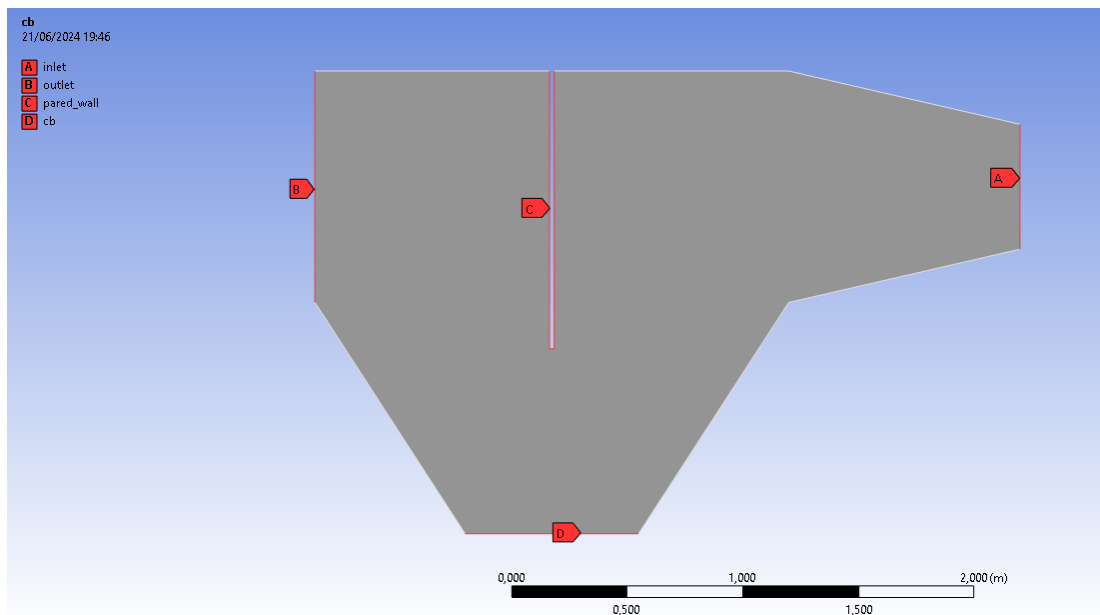


Figura 37: “Named Selections” declaradas para la simulación de la geometría bidimensional de la cámara de choque

Una vez definidas las superficies para comprobar que la discretización realizada es adecuada, al igual que se hizo en el apartado anterior se comprobará que la ortogonalidad y el ratio de aspecto no superen los valores límites de 0.1 y 10 respectivamente, esto puede observarse en la figura (38).

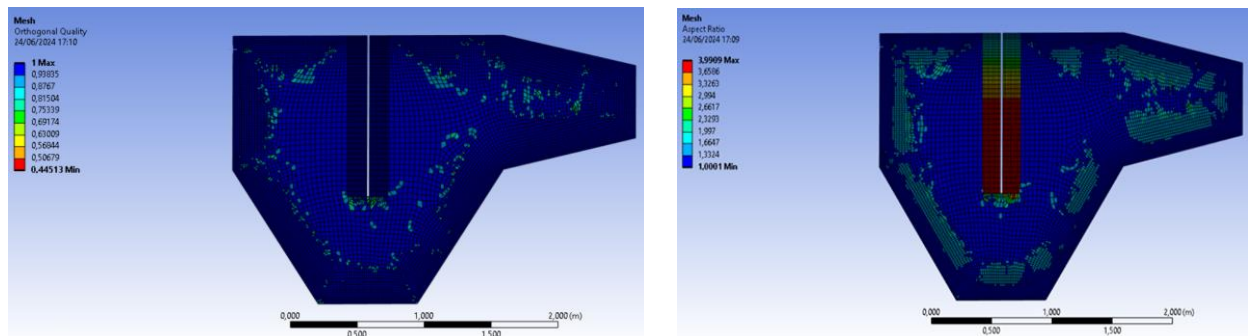


Figura 38: Parámetros de calidad de la malla utilizada para la simulación de la cámara de choque bidimensional

En la figura (38), se muestra todo lo comentado anteriormente pudiéndose observar que no se sobrepasa ningún límite en los parámetros de malla, con lo que se concluye, a falta de realizar un análisis de sensibilidad de la malla que esta es correcta.

4.3.1.3 Configuración de la simulación

Para seguir con este análisis, se procede a abrir el módulo de setup en el que se declaran todas aquellas variables que son necesarias para más tarde calcular las soluciones que se le pidan. Entre estas variables u opciones de resolución están:

- Modelo viscoso, que para el caso bajo estudio se va a usar el $k-\omega$ Standard debido a que tiene una alta precisión y capta bien todos los fenómenos de la capa límite, cerca de las paredes.
- Otro punto para tener en cuenta es la gravedad impuesta sobre el eje z en sentido negativo y con valor de 9.81m^2 .
- Inyección de polvos, para esto se ha impuesto una distribución de partículas de carbonato de calcio (simulando las partículas de suciedad) con un caudal de polvos de 0.1kg/s y cuyos parámetros de dispersión están basados en la distribución de Weibull. Esta inyección es exactamente la misma para todos los análisis realizados en este proyecto.
- Velocidad de inyección de polvos y de gas en la entrada es de 10m/s , como se explicó en la parte del diseño de la cámara de choque al imponer el caudal de descarga y el área de la entrada. Se asume en todos los casos que la velocidad de los sólidos es la misma que la del gas.
- La presión a la salida será la presión atmosférica, al igual que en el caso de la cámara anteriormente estudiado.

Una vez comentados todos los parámetros impuestos para el análisis, se procede a calcular el caudal de polvo que sale por el outlet, con el objetivo de evaluar la eficiencia de separación de este separador.

4.3.1.4 Post-procesamiento

El proceso de post-procesamiento de los resultados será igual que el caso de la cámara de sedimentación. A continuación, se muestran los resultados que se han obtenido al imponer todas las condiciones que antes se han comentado:

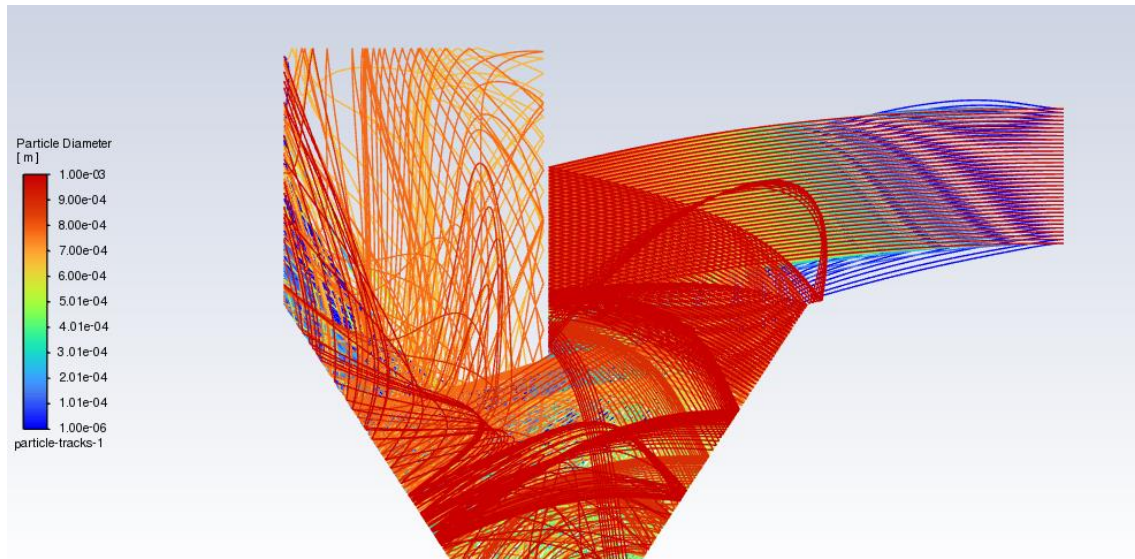


Figura 39: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque bidimensional

La figura (39) muestra las trayectorias de las partículas inyectadas en un flujo con un caudal de 0.1 kg/s. Los colores de las trayectorias, que van del azul al rojo, indican variaciones en los diámetros de las partículas, desde 1 micrómetros (azul) hasta 1 milímetro (rojo). Las trayectorias se curvan y entrelazan a lo largo del dominio fluido, sugiriendo la influencia choques o rebotes en la pared intermedia y del efecto de la gravedad sobre las partículas de mayor tamaño. Se observa que las partículas chocan con la pared cuando entran por el inlet y seguido comienzan a rebotar saliendo muchas de ellas por el collection bin.

Esta solución no da mucha información acerca de la cantidad de polvos que sale por el outlet o la que se queda en el collection bin, por tanto, se van a obtener una serie de gráficas que se muestran a continuación en las que se pueden ver estos caudales mencionados:

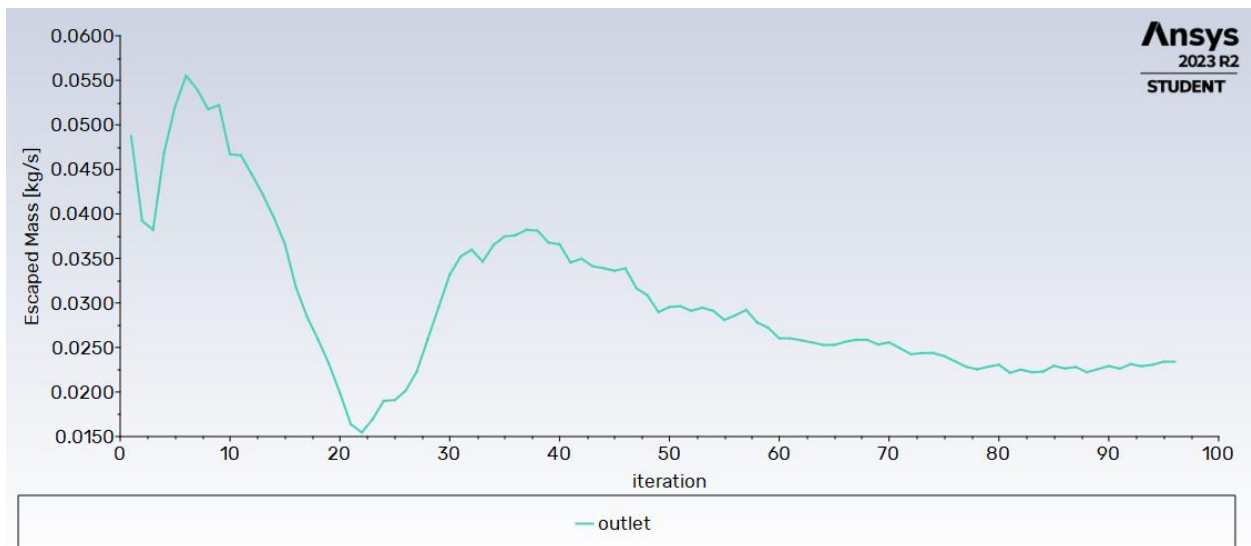


Figura 40: "Escaped Mass" por la salida de gases de la cámara de choque bidimensional

La figura (40) muestra la masa de polvo escapada por el outlet de la cámara de choque en función de las iteraciones. Se puede observar que, tras aproximadamente 85 iteraciones, la masa escapada se estabiliza alrededor de 0.026 kg/s, indicando que el sistema ha alcanzado un estado estacionario, dando por la válida la solución con los criterios de convergencia que se impusieron también para la cámara de sedimentación.

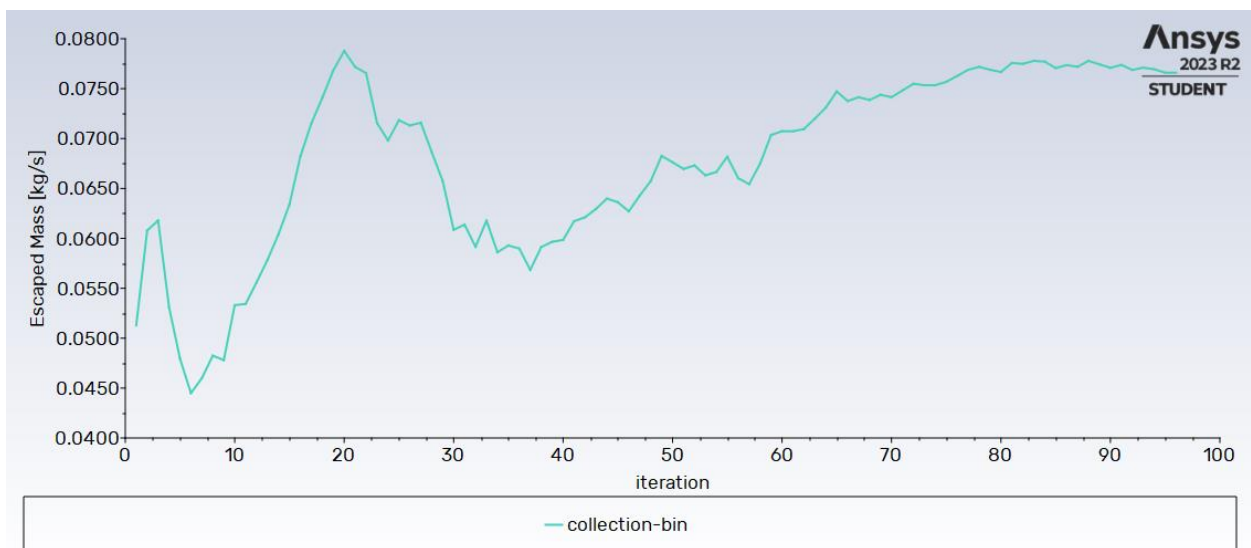


Figura 41: "Escaped Mass" por el depósito de solidos de la cámara de choque bidimensional

Por otro lado, en la figura (41), se puede observar una gráfica muy parecida a la anterior, con la única diferencia de que en esta se representa la cantidad de polvos que sale por el collection bin. Al igual que pasaba antes, este valor, de 0,0766 kg/s para este caso, también se estabiliza tras una serie de iteraciones pudiéndose dar por finalizado el cálculo.

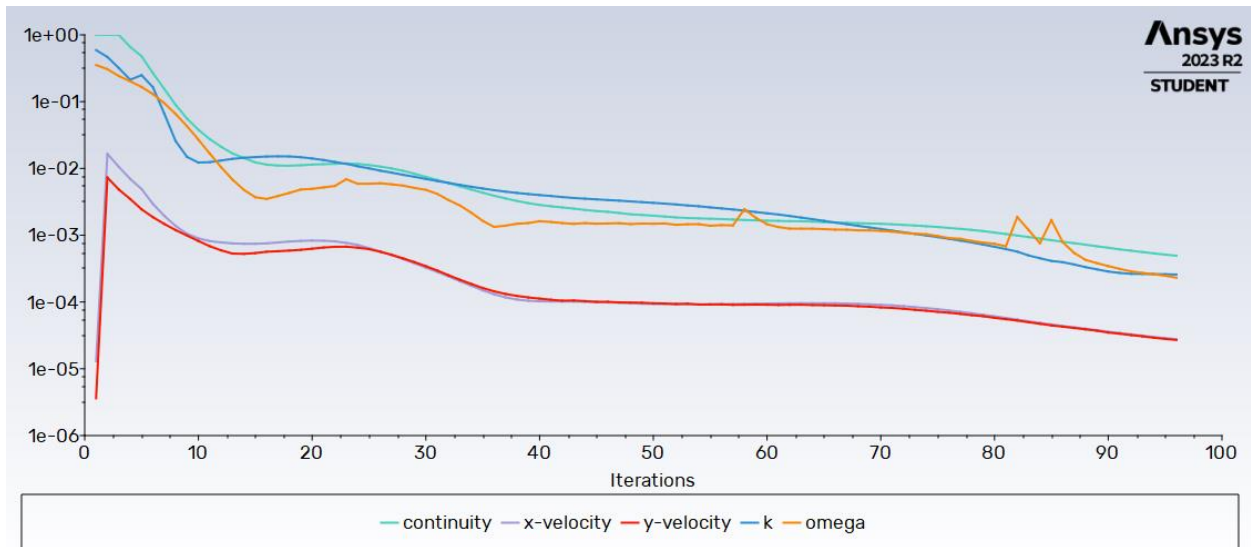


Figura 42: Residuos de la simulación de la cámara de choque bidimensional

La gráfica muestra la convergencia de varios parámetros clave durante el análisis CFD utilizando el modelo viscoso k-omega Standard, como se comentó anteriormente. A lo largo de 120 iteraciones, se observa cómo las variables de continuidad, velocidades en los ejes X e Y, y los parámetros k y omega se estabilizan. Inicialmente, todos los parámetros presentan picos elevados que rápidamente disminuyen, indicativo de un ajuste inicial del modelo. El campo de velocidades y continuidad junto con los parámetros k y omega, caen consistentemente hasta llegar a valores por debajo de 10^{-3} antes de las 100 iteraciones, mostrando una clara tendencia hacia la estabilización. Estos resultados demuestran que el modelo ha alcanzado un estado de convergencia aceptable, donde las variaciones entre iteraciones son mínimas, lo cual es crucial para asegurar la precisión y fiabilidad del análisis CFD.

Otro gráfico que puede ser útil para el análisis es la velocidad del fluido gas a través de la cámara, pudiéndose entender así de una forma más detallada cómo se comporta este fluido ante los cambios de sección y dirección.

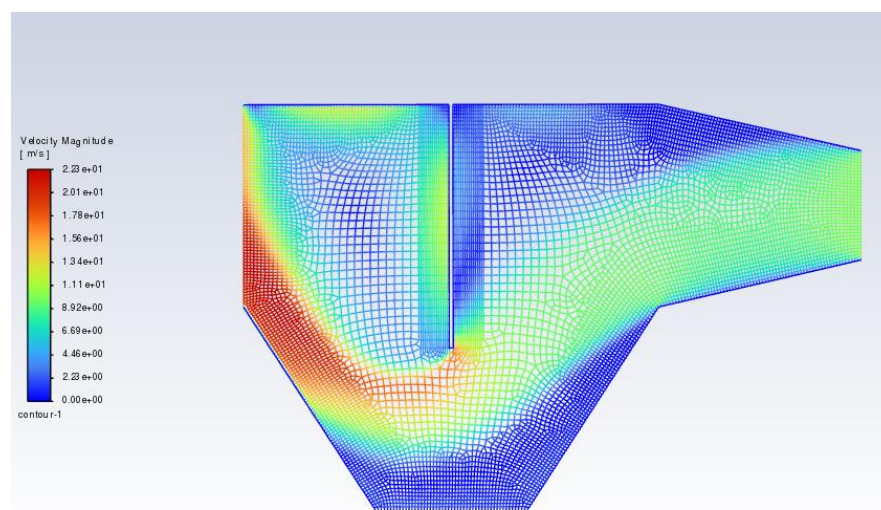


Figura 43: Contorno de velocidades del gas en la cámara de sedimentación bidimensional

La imagen superior muestra el contorno de la magnitud de la velocidad del flujo a través de una cámara de impacto siendo los colores que se ven, las representaciones de las diferentes velocidades del flujo, con azul indicando velocidades más bajas y rojo indicando velocidades más altas. La escala de color a la izquierda indica que las velocidades varían desde 0 m/s (azul oscuro) hasta aproximadamente 22.5 m/s (rojo).

En la parte inferior izquierda de la geometría, se observa una zona de alta velocidad que se representa de color rojo, indicando un aumento significativo en la velocidad del flujo producida debido a que la sección en esa zona es menor y por tanto las velocidades serán mayores, mientras que en sitios con áreas mayores como son la entrada a la cámara (una vez pasada el cambio de sección) el fluido se frena. El hecho de que el flujo se acelere, como ocurriría también en la cámara de sedimentación no es solo influencia de los cambios de sección sino también de cambios de dirección bruscos, como ocurre en la zona inferior de la placa deflectora. Estos cambios bruscos de sección hacen que el gas no tenga tiempo ni espacio de reconducirse por otras trayectorias más lejanas por lo que casi todo el gas pasa por la misma zona, esto constituye algo parecido a una disminución de sección y por tanto el fluido acaba acelerándose.

Con estos resultados se podría definir una cierta eficiencia de separación, ya que se tienen los datos de entrada y salida tanto para los polvos como para el gas. Sin embargo, esta eficiencia sería específica para las condiciones impuestas. Para estudiar el comportamiento de una forma más detallada, es necesario analizar casos con condiciones distintas, para ello, se va a realizar un análisis para un rango de velocidades que va desde 7 m/s hasta 25 m/s. Este análisis se presentará en apartados sucesivos.

4.3.1.5 Análisis de sensibilidad

Para asegurar que los resultados obtenidos son válidos y que la discretización del dominio no juega ningún papel en el cálculo de los resultados, se ha realizado un análisis de sensibilidad de la malla para determinar si el tamaño de elemento impuesto introduce un error considerable. Para ello, se ha variado el tamaño de elemento del "Edge Sizing", manteniendo constante el tamaño de elemento general y la "Inflation", ya que este es el parámetro que más afecta a la solución. Se ha establecido un rango de tamaños de elemento entre 0,01m y 0,03m, obteniendo los resultados que se muestran en la siguiente figura.

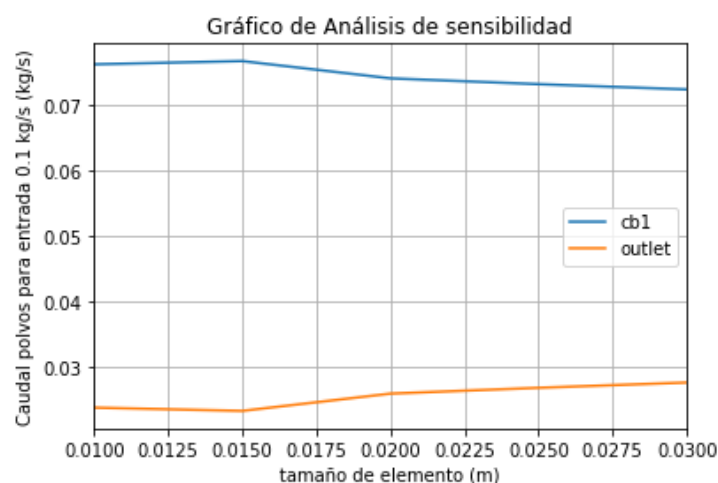


Figura 44: Gráfico de caudal de polvos que escapan por las superficies de interés frente a tamaño de elemento de la malla

En la figura (44), se puede observar de forma rápida que los resultados no varían mucho tanto para el caudal que sale por el “collection bin” como el que sale por el “outlet”, especialmente para tamaños de elemento pequeños. Debido a que no se aprecia adecuadamente la diferencia en la solución debido a la escala, se ha decidido calcular el error relativo asumiendo que la solución "exacta" es aquella que tiene el tamaño de elemento más pequeño, exactamente igual que se realizó con la cámara de sedimentación.

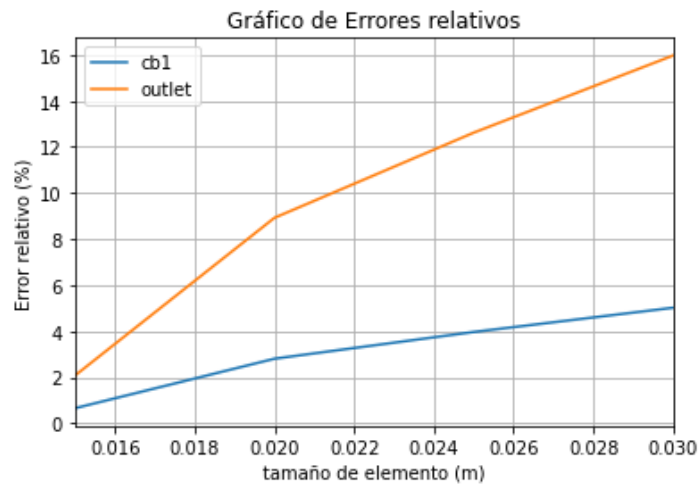


Figura 45: Gráfico de errores relativos frente a tamaño de elemento de malla

En la figura (45) se muestran los errores relativos que se cometen debido al mallado de la superficie que constituye el dominio del problema. Como se puede observar, el error aumenta a medida que se incrementa el tamaño del elemento. Esto es lógico, ya que un tamaño de elemento mayor modela los rebotes de una forma menos precisa, provocando un aumento en los errores.

Debido a que computacionalmente es muy costoso utilizar un tamaño de elemento muy pequeño, se opta por escoger un tamaño de 0,015 metros, ya que los errores cometidos no son excesivos, siendo estos menores al 3% en ambas superficies.

4.3.2 Análisis del dominio 3D

Una vez que se ha estudiado la cámara de choque o impacto, para el caso 2D, se va a realizar este mismo análisis para un modelo 3D con las mismas dimensiones, teniendo en cuenta que la única diferencia es que para este modelo se define un ancho mediante una extrusión de 2 metros.

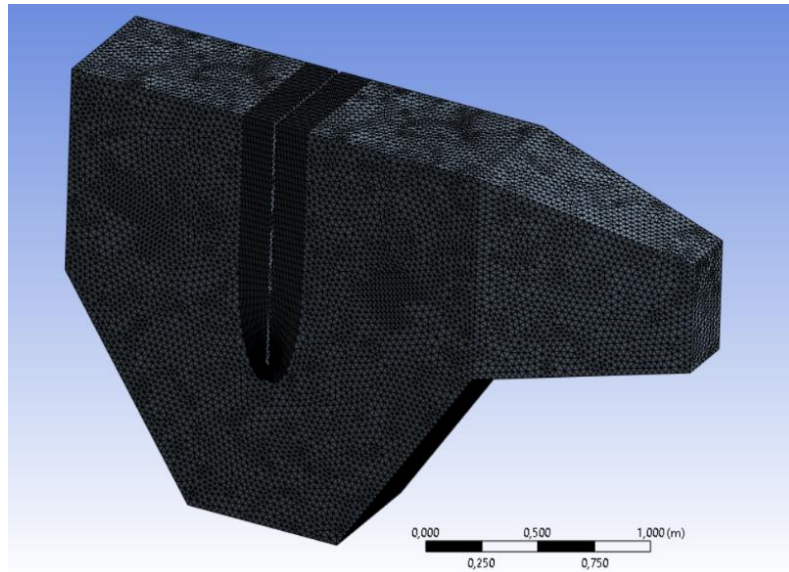


Figura 46: Mallado utilizado para la simulación de la geometría tridimensional de la cámara de choque

El objetivo de este análisis es verificar la validez de los resultados obtenidos en el análisis en 2D. Para ello, se ha definido un mallado con un tamaño de malla de 0.04 metros, considerado suficiente para asegurar la convergencia de la solución. Además, se ha activado la opción de "Inflation", que crea un mallado por capas. Las principales características de este mallado son: un máximo de 50 capas y un espesor máximo de capa de 0.02 metros. La superficie en la que se ha activado esta opción es la pared intermedia, con el fin de mejorar la precisión de la malla en esa zona, ya que es crucial debido a los numerosos rebotes que ocurren allí. Asimismo, se ha verificado la calidad del mallado utilizando las herramientas que el programa proporciona, como la ratio de aspecto y la ortogonalidad, las cuales nos proporcionan una idea de la bondad de la discretización. En este caso no ha sido posible establecer la opción de "Edge Sizing" debido a la limitación de nodos y elementos que presenta la licencia de estudiante.

En la figura (46) que se ha mostrado anteriormente, se puede ver como ha quedado el mallado destacando que con el tamaño de malla que se le ha impuesto se adapta muy bien la malla a la geometría y también las capas que forman la "Inflation" explicada anteriormente. Como se ha comentado antes se muestra a continuación la figura (47) con las opciones de visualización con las que se podrían observar los posibles errores del mallado.

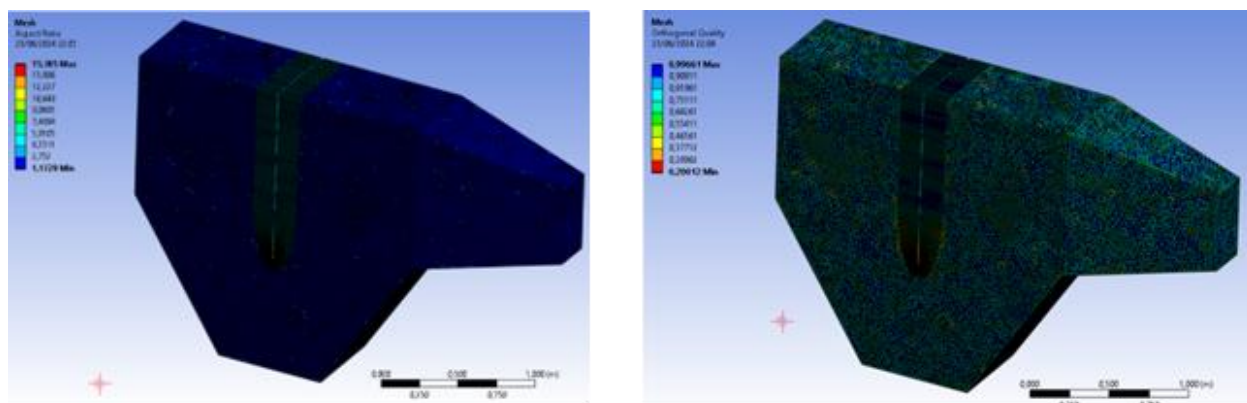


Figura 47: Parámetros de calidad de la malla para la discretización de la cámara de choque tridimensional

En la figura (47) anterior se muestra, a la izquierda la visualización del mallado activando la opción del aspecto ratio el cual muestra la relaciones de aspecto que existen entre los diferentes elementos del mallado, pudiéndose observar que de manera bastante homogénea este aspecto ratio tiene un valor de aproximadamente 2, siendo esto un valor muy pequeño, lo cual nos dice que el mallado se ha realizado de forma correcta en cuanto a esta opción. También cabe destacar que el valor máximo, que es aproximadamente 15.385, un valor que, aunque está un poco por encima de tolerancia se podría tomar como aceptable para análisis menos precisos.

Por otro lado, a la derecha se muestra la calidad ortogonal de la malla, con un mínimo de aproximadamente 0.2, valor que se encuentra también un poco por debajo de la tolerancia para una malla aceptable, pero, teniendo en cuenta las limitaciones de esta discretización, se podría tomar por correcta.

Una vez se ha definido el mallado, se seleccionan las “Named Selections” o superficies en las que se imponen las condiciones de contorno como se ha realizado para el caso bidimensional. En la siguiente figura (48) se muestra tanto el inlet, a la derecha en la imagen, que iría seguido de una tobera divergente, como el outlet (superficie más extensa marcada a la izquierda con la etiqueta “B”) y por último el collection bin que es la superficie inferior que acumula los polvos una vez estos hayan precipitado.

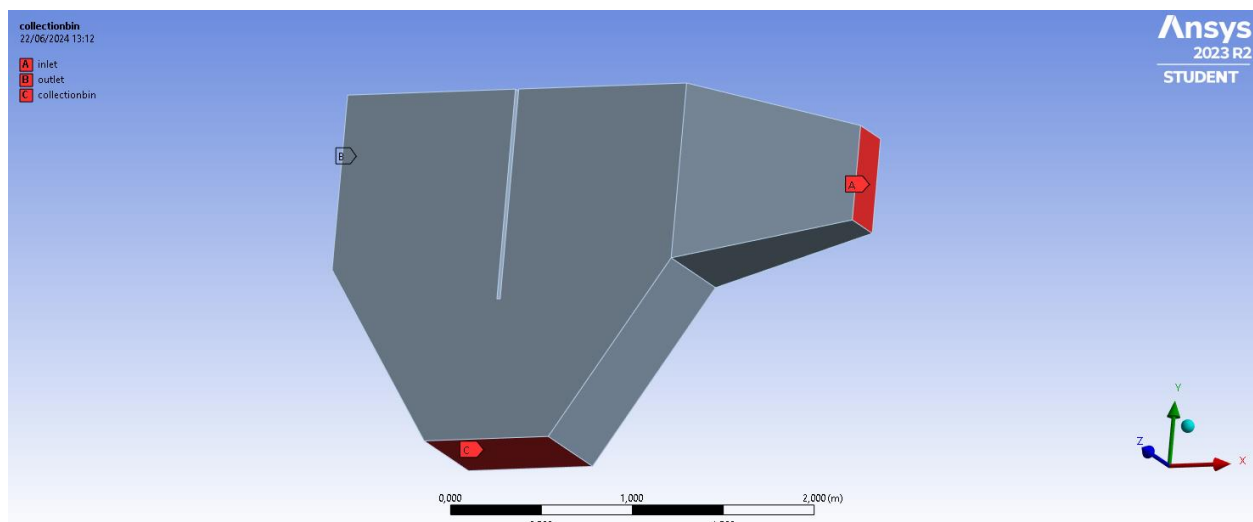


Figura 48: “Named Selections” declaradas para la simulación de la cámara de choque tridimensional

Por otro lado, para este análisis se ha decidido no exponer cada uno de los pasos realizado en el análisis CFD, debido a que ya se han realizado estos modelos para otros casos expuestos anteriormente.

Por tanto, se va a resumir este contenido en una tabla, como se ha realizado anteriormente para la cámara de sedimentación en 3D, en la que se reflejen todas las características del modelo, indicando también las condiciones que se imponen. A continuación, se muestra dicha tabla con todos los datos necesarios para el análisis.

Menú	Configuración	Valores / Selección	Comentarios
General	Gravedad	9.81m/s ²	En dirección del eje Z, en sentido negativo
Modelos	Viscosidad	SST $k - \omega$	-
	Modelo de fase discreta	Igual configuración que en el modelo bidimensional	
Materiales	Fluido	Dióxido de carbono	-
Condiciones de dominio	-	-	Seleccionar el volumen de control y asignarle como material el dióxido de carbono
Condiciones de contorno	Inlet	Velocidad en la sección de entrada = 10 m/s DPM (comportamiento): escape	-
	Outlet	Presión manométrica en la sección de salida = 0bar DPM (comportamiento): escape	
	Collection bin 1	DPM (comportamiento): trap	
Reportes	-	-	Crear los mismos reportes que en el caso 2D para las superficies Outlet y Collection bins
Inicialización y Numero de iteraciones	Inicialización Standard	Inlet	-
	Número máximo de iteraciones	600	
Criterios de convergencia	-	Comentados en el modelo 2D de la cámara de sedimentación	Añadir los reportes creados a los criterios de convergencia con la tolerancia por defecto (1e-3)

Tabla 6: Tabla resumen de la configuración utilizada para la simulación de la cámara de choque tridimensional

En la tabla anterior se muestran todas las condiciones impuestas para el caso estudiado, destacando algunas, como la velocidad de 10 m/s, que es la misma utilizada en el análisis en 2D. Esto permite obtener una serie de resultados, incluyendo un reporte del caudal de polvos que sale por el outlet y otro reporte del caudal de polvos que se quedan en el collection bin. Con estos datos, es posible calcular la eficiencia de la separación. A continuación, se presentan estos resultados en las figuras (49 y 50).

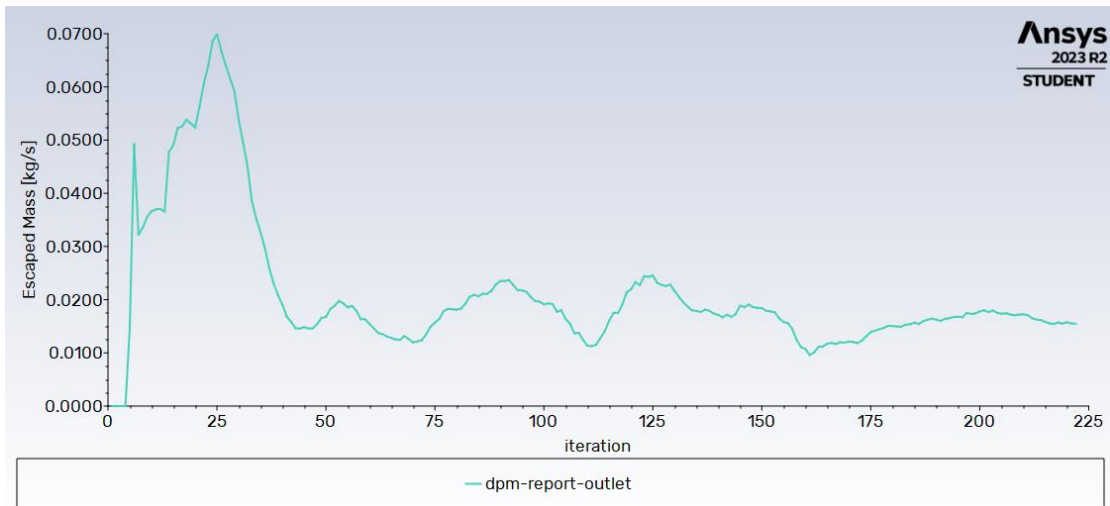


Figura 49: Reporte de caudal masico escapado por la superficie de salida de la cámara de choque

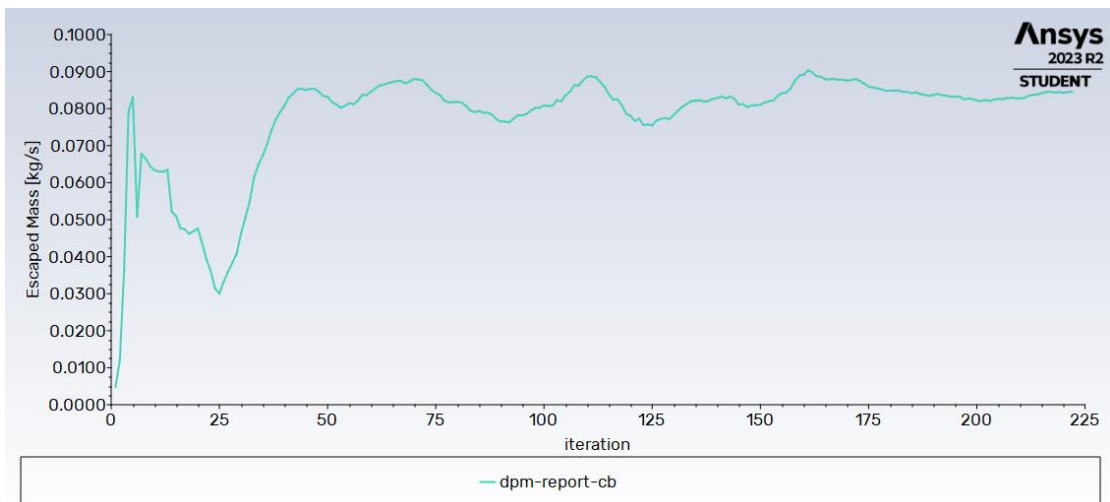


Figura 50: Reporte de caudal masico escapado por la superficie de depósito de la cámara de choque

En las figuras anteriores, se muestran los resultados que se han obtenido en cuanto al caudal de polvos que sale por el collection bin y por el outlet, de esta forma se puede observar que estos valores y los de continuidad, campo de velocidades, energía cinética turbulenta y tasa de disipación específica se estabilizan al llegar a unas 200 iteraciones, permitiendo así dar por terminado el cálculo antes de llegar al máximo de iteraciones.

Como se muestra en las figuras, el reporte del outlet indica un caudal de 0.01548kg/s, mientras que el reporte del collection bin muestra un valor de 0.0845kg/s. Se puede observar que estos valores difieren casi en un 10% de la cantidad de sólidos inyectada de los valores obtenidos en el análisis del dominio bidimensional de esta misma geometría. En este caso se observa entonces que la extrapolación no es tan precisa como ocurría en la cámara de sedimentación, en la que se cometían errores inferiores al 1% en los resultados comparando el caso 2D con el 3D. El origen de estas imprecisiones pueden ser perfectamente los rebotes ocasionados por la alta velocidad de operación de la cámara de choque y la mayor complejidad que se da en el flujo del gas y las partículas a través de este separador.

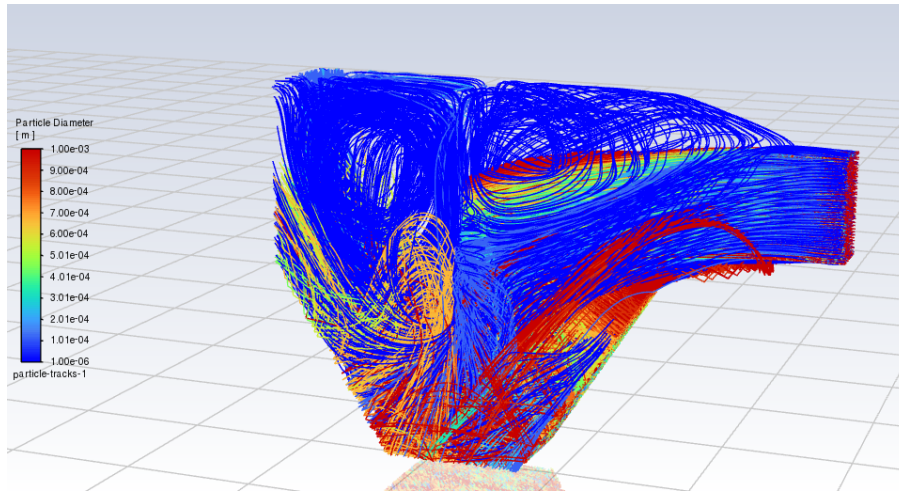


Figura 51: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque tridimensional

Para corroborar que el comportamiento de los polvos en el interior es parecido al que se había obtenido anteriormente, en la gráfica anterior, figura (51), se ha generado un “Particle Tracks” que consiste en una gráfica que muestra las trayectorias que seguirían los polvos en régimen permanente, destacando en esta una cantidad elevada de rebotes. En esta figura también se muestra como muchas de las partículas gruesas, que tienen un color rojo, se depositan sobre el collection bin, superficie que, como se comentó, tiene como objetivo la recolección de estos polvos.

Las trayectorias que siguen las partículas para este modelo cuya geometría es la 3D, son algo mas complejas debido a que también pueden existir trayectorias que siguen la otra dirección que no se ha estudiado en el análisis 2D, haciendo que la figura (51) se vea algo enmarañada, por ello, esta gráfica sirve para comprender y verificar que el comportamiento de las partículas en el interior de la camara es complejo.

A continuación, en la figura (52) se presenta también el mapa de trayectorias de las partículas de fluido coloreadas según la velocidad de la partícula.

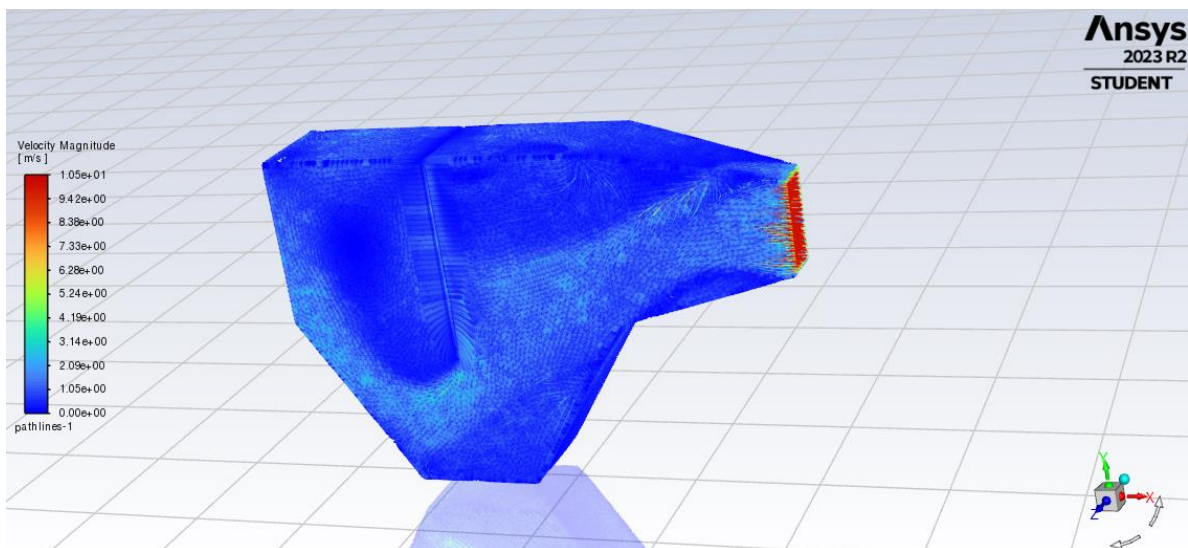


Figura 52: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en la cámara de choque tridimensional

En este gráfico se pueden observar una vez más los gradientes de velocidad a medida que las partículas se acercan a las paredes del dominio, consecuencia de la condición de “No Slip” impuesta en la configuración de la simulación. Por otro lado, las zonas coloreadas en celeste se parecen mucho a las trayectorias más rápidas que se observaban en la figura (43) del apartado de análisis de esta misma geometría bidimensional. Se podría concluir entonces que el comportamiento del gas, teniendo en cuenta estas trayectorias simuladas es parecido en ambos casos (2D y 3D).

Para este sistema, igual que se hizo en el caso anterior se ha calculado una pérdida de carga resultante de evaluar la presión total en la sección de entrada y hacer la diferencia con la presión evaluada en la sección de salida. En este caso la pérdida de carga resulta ser de 20.1Pa, valor que comparado con las presiones de operación de este sistema en el marco del proyecto (del orden de decenas o centenares de bares) es insignificante.

4.3.3 Conclusiones: Ventajas e inconvenientes

El hecho de que se haya decidido comparar con otros componentes se debe a que existen algunas ventajas frente al diseño de otros tipos de cámaras o sistemas de limpieza. Estas ventajas se definen a continuación:

- Eficiencia intermedia y capacidad de separación de partículas grandes: La cámara de choque es particularmente eficaz para la separación de partículas de mayor tamaño, lo que la hace adecuada para aplicaciones donde estas partículas son predominantes. Aunque no ofrece la máxima eficiencia de separación en comparación con otros sistemas más complejos, su rendimiento es adecuado para muchas aplicaciones industriales. Teniendo en cuenta los estudios anteriores, la cámara de choque diseñada separa hasta un 84.50% del caudal masico de partículas introducido.
- Sistema compacto (menor coste): El diseño compacto de la cámara de choque permite su instalación en espacios reducidos, reduciendo así los costos de infraestructura. Además, su simplicidad estructural contribuye a un menor coste de fabricación y mantenimiento.
- Baja energía para su funcionamiento: La operación de una cámara de choque no requiere grandes cantidades de energía, más aún teniendo en cuenta que la pérdida de carga calculada para ella es baja, lo que la convierte en una opción económica y ecológica en comparación con otros sistemas de separación de partículas que demandan un mayor consumo energético.
- Operación rápida: La separación de partículas en una cámara de choque ocurre de manera inmediata al impacto, lo que resulta en un proceso de limpieza rápido. Esto es beneficioso en entornos donde el tiempo es un factor crítico y se requiere una alta capacidad de procesamiento.
- Menor dependencia de la gravedad: A diferencia de otros sistemas de separación que dependen en gran medida de la gravedad, la cámara de choque puede operar eficazmente en una variedad de orientaciones y condiciones. Esto le otorga una mayor versatilidad en su instalación y funcionamiento.
- Mayor flexibilidad y adaptabilidad a diferentes situaciones: La simplicidad y robustez del diseño de la cámara de choque permiten que se adapte fácilmente a diferentes tipos de partículas y condiciones

operativas. Esto la hace una solución flexible para una amplia gama de aplicaciones industriales, desde la minería hasta la manufactura.

Sin embargo, también es importante considerar las desventajas asociadas con el uso de una cámara de choque:

- Mayor probabilidad de daño en deflector: La placa deflectora, que es el componente principal donde las partículas impactan y se frenan, está sujeta a un desgaste significativo. Las partículas grandes y abrasivas pueden causar daños y desgaste prematuro, lo que puede llevar a la necesidad de reparaciones o reemplazos frecuentes.
- A velocidades mayores su funcionamiento empeora: El rendimiento de la cámara de choque disminuye a velocidades de flujo de gas más altas. A velocidades elevadas, las partículas pueden no ser suficientemente frenadas por la placa deflectora, lo que reduce la eficiencia de separación y permite que más partículas sigan en el flujo de gas saliente.
- Debe ser mantenido periódica y cuidadosamente: Para garantizar un funcionamiento óptimo, la cámara de choque requiere un mantenimiento regular y meticuloso. La acumulación de partículas y el desgaste de los componentes internos deben ser monitoreados y atendidos para evitar disminuciones en la eficiencia y posibles fallas del sistema.
- Flujos más complicados (mayor coste computacional): En situaciones donde los flujos de gas son complejos o varían significativamente, la simulación y el diseño de una cámara de choque pueden volverse más complicados. Esto implica un mayor coste computacional para modelar y optimizar su funcionamiento, comparado con otros sistemas de limpieza más simples.

4.4 Ciclón

Teniendo en cuenta las eficiencias de separación de los sistemas estudiados anteriormente, en este punto se plantea integrarlos en serie con un sistema que constituya una segunda etapa de limpieza de partículas más finas. En este apartado se comentarán también las razones que justifican porque no se ha realizado un análisis aislado del ciclón.

El caso del estudio de un ciclón con elementos finitos es algo más complicado que para las geometrías anteriores ya que un ciclón, al tener una entrada tangente al cuerpo cilíndrico no tiene ningún tipo de simetría. Si se obviara esta entrada, lo cual no tiene sentido hacer, se podría considerar una cierta axisimetría, y simular así cualquier sección del ciclón que contuviera al eje de simetría. Estas razones justifican por qué no se ha realizado un análisis en dos dimensiones.

Por otro lado, el análisis en tres dimensiones de esta geometría si es posible, pero en este caso , dado que la posición de este ciclón en el sistema se encuentra aguas abajo de los otros sistemas (cámara de sedimentación o cámara de choque) se ha decidido realizar directamente simulaciones de los conjuntos cámara de sedimentación y ciclón y cámara de choque y ciclón. De esta forma la distribución de partículas que le llegaría al ciclón es directamente la que sale de cualquiera de los separadores de la etapa de limpieza primera. Esto es

posible simularlo también en ANSYS sin necesidad de simular todo el conjunto, es decir, se puede simular cualquiera de los separadores de primera etapa e importar la solución a un análisis en el que solo se tiene en cuenta el dominio del ciclón. Para este proyecto, como ya se ha comentado se ha visto más oportuno, dados los recursos disponibles, simular todo el conjunto para ver cómo se comporta en su totalidad.

Tendría sentido también calcular la eficiencia y capacidad de separación del ciclón frente a la corriente de gas que procede directamente de los reservorios, pero en este proyecto se han planteado sistemas en serie que aseguren una cierta pureza, lo cual no quiere decir que esto no se pueda conseguir solo con un ciclón.

4.4.1 Conclusiones: Ventajas e inconvenientes

En este apartado se comentarán algunas de las ventajas y desventajas del uso de un ciclón como separador de partículas.

- Alta eficiencia y capacidad de separación de partículas grandes: Los ciclones son muy eficientes en la separación de partículas grandes y densas del flujo de aire o gas debido a la fuerza centrífuga generada por el flujo en espiral. Esta capacidad de separar rápidamente las partículas más pesadas los hace ideales para aplicaciones industriales donde es esencial reducir la contaminación del aire y recuperar materiales valiosos.
- Baja pérdida de carga: Los ciclones, si están bien diseñados, suelen tener una baja resistencia al flujo de aire o gas, lo que resulta en una mínima pérdida de presión a través del sistema. Esto implica que se requiere menos energía para mantener el flujo, lo que aumenta la eficiencia del sistema y reduce los costes de operación.
- Sistema compacto (menor coste): En comparación con otros equipos de separación, los ciclones son relativamente compactos y simples en diseño, lo que reduce los costos de instalación, materiales y mantenimiento. Su tamaño compacto permite una fácil integración en instalaciones existentes sin necesidad de grandes modificaciones.
- Baja energía para su funcionamiento: El funcionamiento de los ciclones no requiere partes móviles ni sistemas complejos, lo que resulta en un bajo consumo de energía. Esta simplicidad mecánica reduce los costos operativos y de mantenimiento, haciendo de los ciclones una opción económica y eficiente para muchas aplicaciones.

Las desventajas de estos separadores se comentan a continuación:

- Menor eficiencia para partículas muy finas: Aunque los ciclones son excelentes para separar partículas grandes y densas, su eficiencia disminuye considerablemente cuando se trata de partículas muy finas. Esto puede ser problemático en aplicaciones donde se necesita una alta eficiencia de separación para partículas de menor tamaño, lo que puede requerir equipos adicionales para lograr la limpieza deseada.

- Puede generar altas pérdidas de carga si no se diseña correctamente: Si el diseño del ciclón no está optimizado, puede generar una resistencia significativa al flujo de aire o gas, resultando en altas pérdidas de carga. Esto puede incrementar los costos operativos debido al mayor consumo de energía necesario para mantener el flujo adecuado a través del ciclón.
- Requiere mantenimiento periódico: Con el tiempo, las paredes del ciclón pueden acumular material y suciedad, lo que puede reducir la eficiencia de separación ya que varía el diámetro de este y aumentar la resistencia al flujo. Para mantener el rendimiento óptimo, es necesario realizar un mantenimiento periódico, lo que implica tiempo y recursos adicionales.

4.5 Conjuntos de sistemas de limpieza

En este proyecto como se ha mencionado anteriormente, el proceso de limpieza de corrientes se ha planteado en dos etapas, una primera en la que se eliminan las partículas de mayor tamaño y otra en la que se eliminan las partículas más finas. La integración de los sistemas de limpieza estudiados en apartados anteriores se realiza en serie para asegurar que el gas se limpia de todas las partículas que contiene en suspensión a su paso por todos los separadores. Visto el comportamiento de la cámara de sedimentación y la de choque se observa la necesidad de establecer un segundo sistema en serie que limpie el residuo de sólido que haya podido quedar de la primera etapa. Por otro lado, en el caso de que el caudal de operación se aumentara podrían integrarse diferentes geometrías en paralelo para que las condiciones de operación en términos de velocidades de flujo del gas fueran favorables para el uso de estos separadores. La determinación de estas velocidades admisibles para cada separador se realizará en el apartado 5. Con esta perspectiva se espera que los resultados en términos de separación de sólidos mejoren respecto a los estudios anteriores. Este apartado se centra en la simulación de modelos que combinan estas dos etapas de separación en serie para conseguir los requisitos de limpieza necesarios.

4.5.1 Cámara de sedimentación con ciclón en serie

El primer conjunto que se ha modelado es el de la cámara de sedimentación en tres dimensiones con el ciclón en serie. De este conjunto de sistemas de limpieza se espera que el residuo de sólidos que quedan en suspensión en la corriente de gases procedente de la cámara de sedimentación se limpie con ayuda del ciclón y, por tanto, que en la salida de este no haya ninguna partícula que pueda pasar hacia los equipos que se encuentran aguas abajo.

4.5.1.1 Creación de la geometría

El hecho de que el ciclón no se pueda modelar de ninguna forma con una geometría en dos dimensiones hace que todo este modelo deba ser tridimensional, lo que también lo dota de mayor realismo, aunque también de mayor complejidad a la hora de resolver.

Para conectar ambos deparadores se ha tenido que modelar un adaptador de sección que ya se mostró en la figura (13) del apartado 3.3. La geometría que se va a simular se presenta en la figura (53).

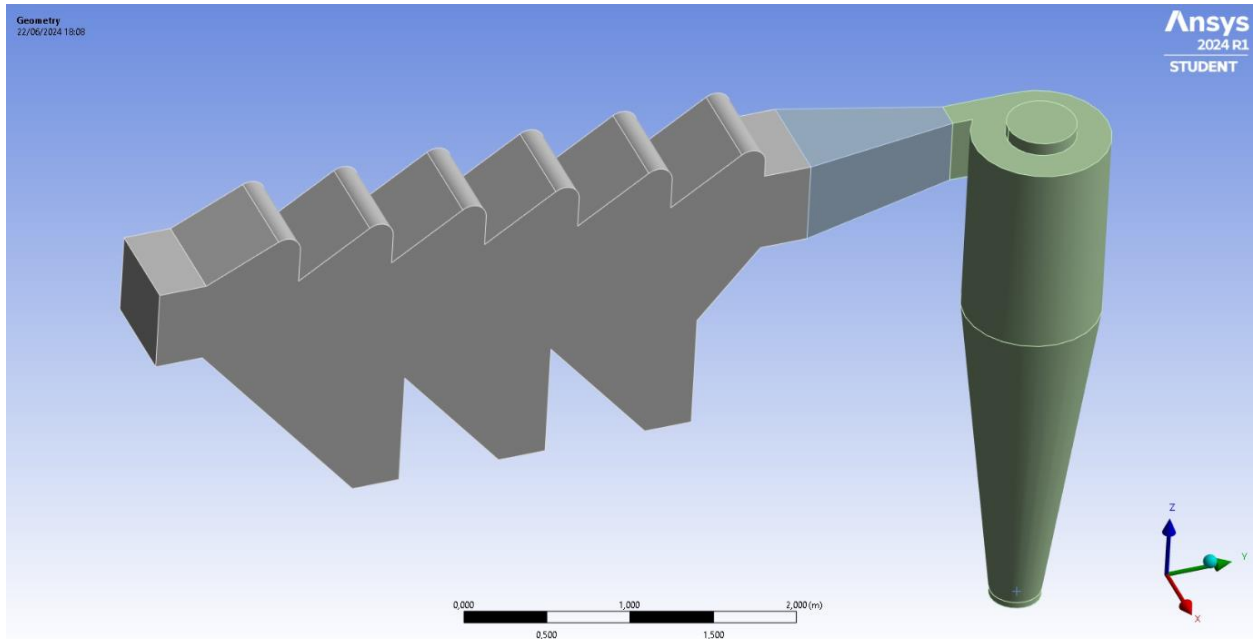


Figura 53: Dominio simulado para el conjunto de cámara de sedimentación y ciclón en serie

En ella se muestra el conjunto mencionado y el adaptador de sección, coloreado en azul, este adaptador y todos los mostrados en el apartado 3.3 son simplemente conductos que conectan un separador con otro y adaptan sus secciones de salida y entrada, aunque constructivamente en realidad no tienen por qué parecerse a los que se han modelado. Sin embargo, las geometrías de los separadores tienen esta forma porque el diseño y la forma son importantes por lo que en caso de que se construyan serán parecidos a los diseñados.

4.5.1.2 Mallado

El mallado en el caso del ciclón, como se mostrará en la figura (54) es notablemente más complicado puesto que la entrada tangente genera casi en el punto de tangencia elementos con una ratio de aspecto muy alta y por tanto la ortogonalidad también se ve afectada negativamente. En la siguiente figura (54) se muestra el mallado de todo el conjunto representado en un mapa de colores según la ratio de aspecto.

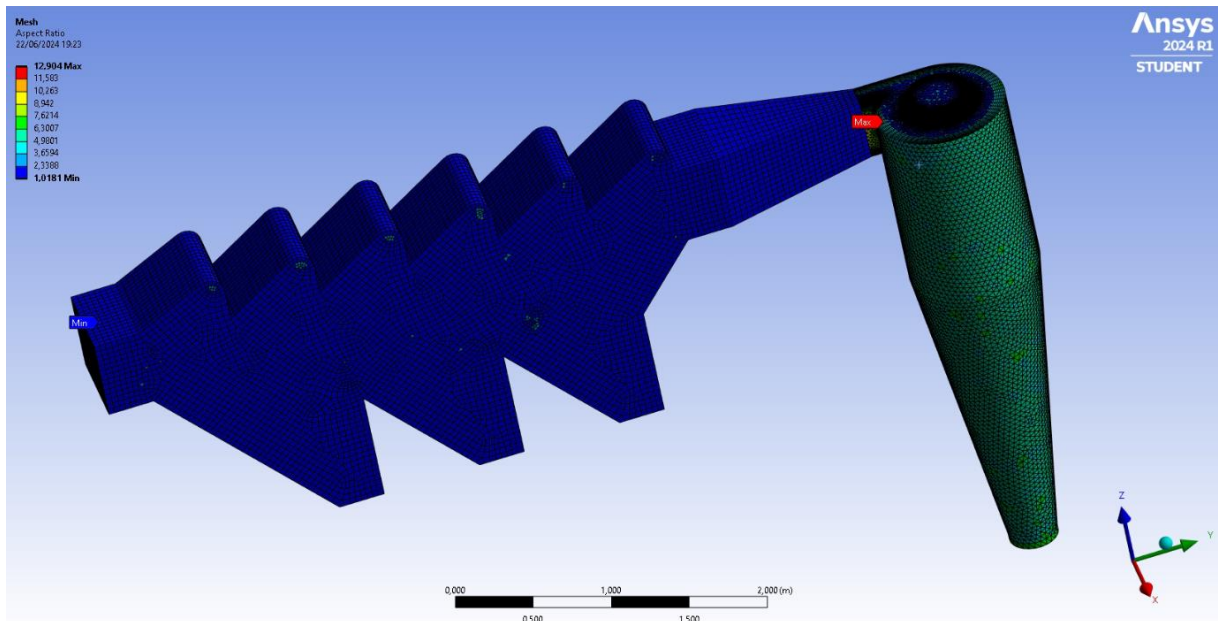


Figura 54: Ratio de aspecto para el mallado utilizado para la simulación del conjunto de la cámara de sedimentación y ciclón en serie

Se puede apreciar que la zona en la que el mallado está peor realizado es en el ciclón, precisamente porque tiene detalles bastante complicados de discretizar. Las opciones utilizadas para realizar este mallado han sido las siguientes:

- Inflation: en las paredes del ciclón para captar correctamente el comportamiento del fluido y de las partículas en las zonas cercanas a ellas, ya que será por donde más caudal de gas y partículas habrá.
- Edge sizing: en las aristas de la entrada tangente del ciclón y en la pared interna, para mejorar la calidad de la malla en estas zonas más complicadas.

En general el tamaño de elemento de la malla es de 4cm, con esto se consigue que tanto el adaptador como la cámara de sedimentación queden bastante bien discretizadas.

Observando la escala de valores de ratio de aspecto se aprecia que el máximo está ligeramente por encima de los valores aceptables, este máximo se da en zonas cercanas a las aristas en entrada al ciclón.

En la figura (55) se muestra también el mapa de ortogonalidad para esta malla. En ella también se ve que el mínimo está un poco por debajo de la tolerancia de una malla aceptable. En este caso este mínimo se da en el punto de tangencia de la entrada del ciclón con el cuerpo cilíndrico, esta zona es muy complicada de mallar debido a que la dimensión de la cara inferior del conducto de entrada cada vez va siendo más pequeña. Para mallarlo de manera más adecuada habría que bajar mucho el tamaño de elemento del mallado en esa zona lo cual haría que el número de nodos y elementos subiera y por tanto que la licencia de estudiante se viera sobrepasada.

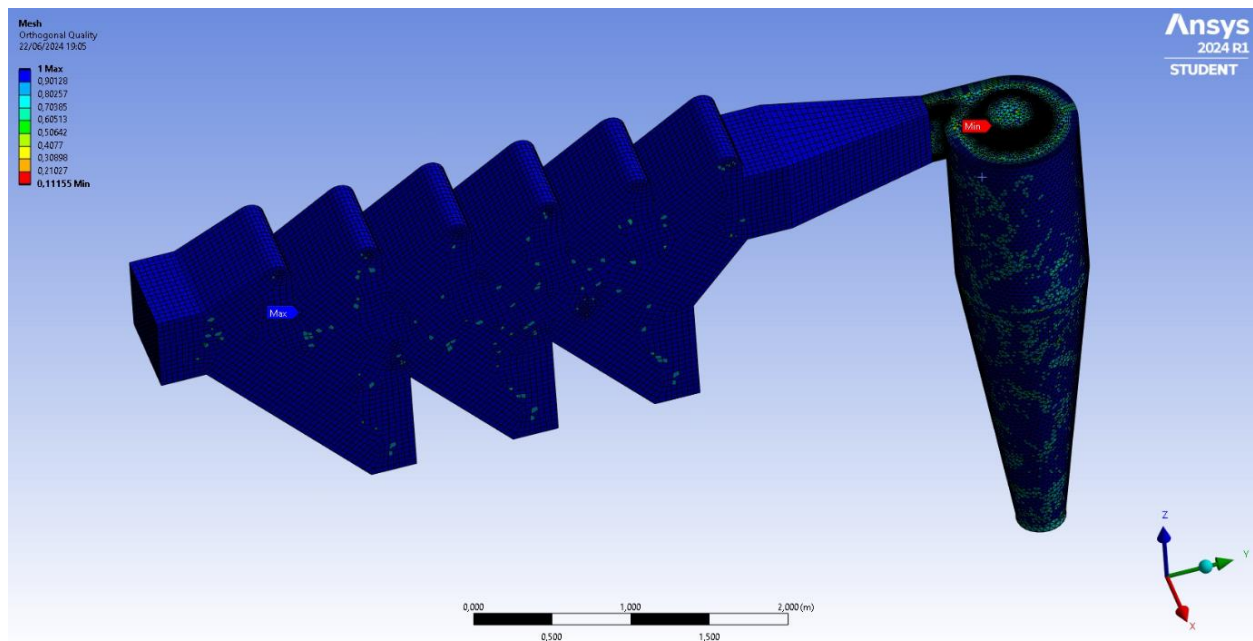


Figura 55: Ortogonalidad para el mallado utilizado para la simulación del conjunto de la cámara de sedimentación y ciclón en serie

Evaluada la malla en función de estos dos parámetros y dado que falla puntualmente en zonas muy concretas se acepta este mallado ya que en su mayoría todas las celdas y elementos tienen buena calidad.

4.5.1.3 Configuración de la simulación

En este apartado se describe mediante una tabla resumen como la mostrada en el apartado 4.2.2.2 la configuración de esta simulación.

Menú	Configuración	Valores / Selección	Comentarios
General	Gravedad	9.81m/s ²	En dirección del eje Z, en sentido negativo
Modelos	Viscosidad	SST $k - \omega$	-
	Modelo de fase discreta	Igual configuración que en modelos anteriores	
Materiales	Fluido	Dióxido de carbono	-
Condiciones de dominio	-	-	Seleccionar el volumen de control y asignarle como material el dióxido de carbono
Condiciones de contorno	Inlet	Velocidad en la sección de entrada = 4.5m/s DPM (comportamiento): escape	Estas condiciones de contorno permiten el análisis de un rango de velocidades Caudal volumétrico de gas: 1.464m ³ /s
	Outlet	Presión manométrica en la sección de salida = 0bar DPM (comportamiento): escape	
	Collection bin 1	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin 2	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin 3	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin ciclón	DPM (comportamiento): trap	
Reportes	-	-	Crear los mismos reportes que en el caso anterior para las superficies Outlet y Collection bins
Inicialización y Numero de iteraciones	Inicialización Standard	Inlet	-
	Número máximo de iteraciones	300	
Criterios de convergencia	-	Comentados en el modelo 2D de la cámara de sedimentación	Añadir los reportes creados a los criterios de convergencia con la tolerancia por defecto (1e-3)

Tabla 7: Tabla resumen de la configuración utilizada en la simulación del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie

4.5.1.4 Post-procesamiento

Una vez resuelta la simulación, se visualizan los resultados de interés, que en este caso son principalmente los caudales masicos que se escapan por todos los collection bins tanto del ciclón como de la cámara de sedimentación. En la siguiente figura (56) se presentan las gráficas que representan los caudales masicos de solidos escapados por cada superficie en función de las iteraciones.

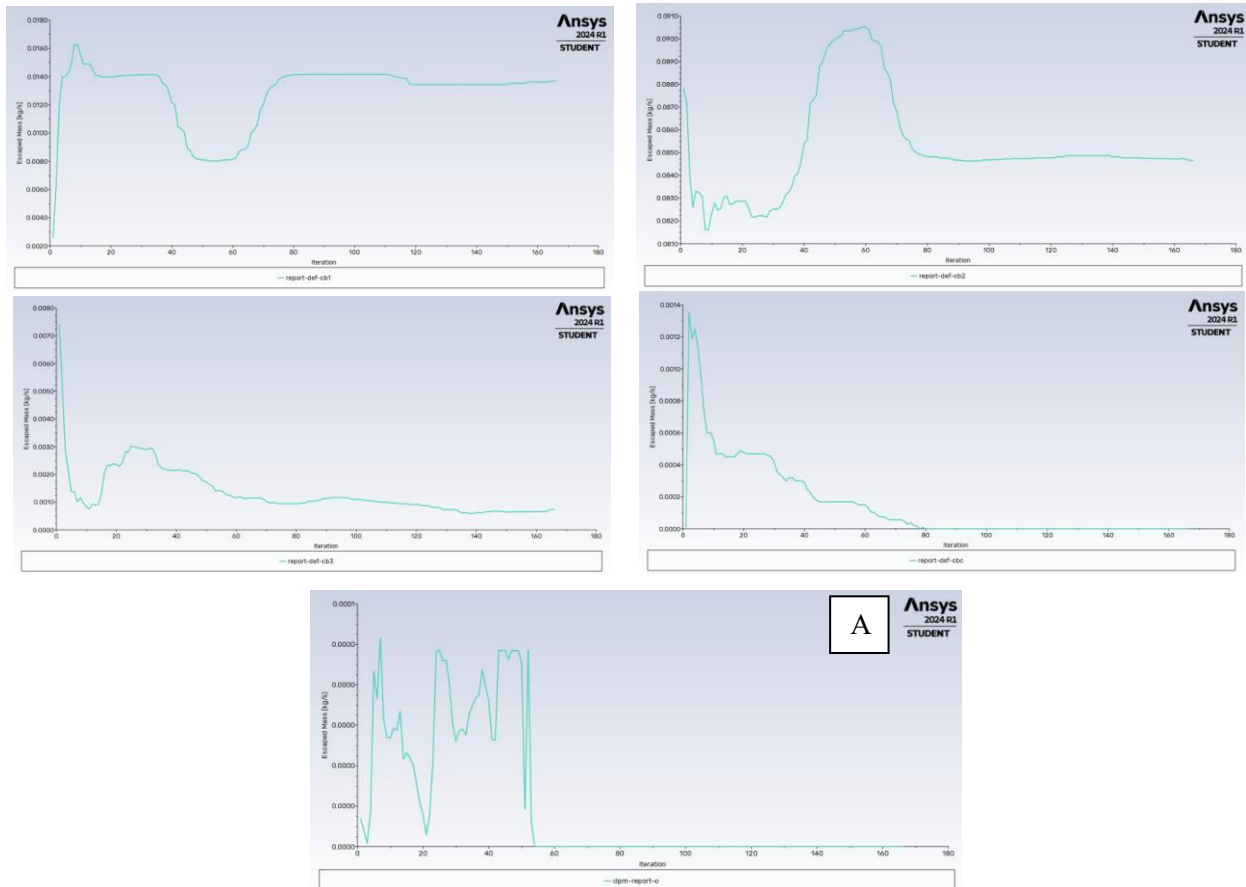


Figura 56: Reportes de caudales masicos escapados por las diferentes superficies de interés del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie

Como consecuencia de los criterios de convergencia impuestos todos estos reportes han llegado a una solución de valor constante. Los resultados numéricos que se ilustran en estas gráficas se resumen en la siguiente tabla.

Superficie	Caudal masico (kg/s)	Relación de caudal ($q_{\text{escapado}}/q_{\text{part}}$)
Collection bin 1	0.01370	13.70%
Collection bin 2	0.08464	84.64%
Collection bin 3	0.0007417	0.7417%
Collection bin ciclón	0	0%
Total separado	0.09908	Eficiencia de separación
		99.08%
Outlet	0	0%

Tabla 8: Resultados de la simulación del conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie

Teniendo en cuenta estos resultados se observa que la eficiencia de separación de todo el conjunto es muy parecida a la de la cámara de sedimentación, la diferencia es que ahora el caudal de solidos que sale por la

salida del ciclón es cero. Eso sugiere que la corriente que sale del ciclón contiene solamente dióxido de carbono con lo cual los requisitos de limpieza de la corriente se han alcanzado.

En esta tabla también se observa que en el depósito que se encuentra en la parte inferior del ciclón no cae nada de sólido, lo cual indica que en régimen permanente este ciclón sufrirá resuspension de partículas en su interior y por tanto de ello se deduce que no está funcionando correctamente. En la figura (57) se presentan las trayectorias de las partículas a su paso por este conjunto de limpieza.

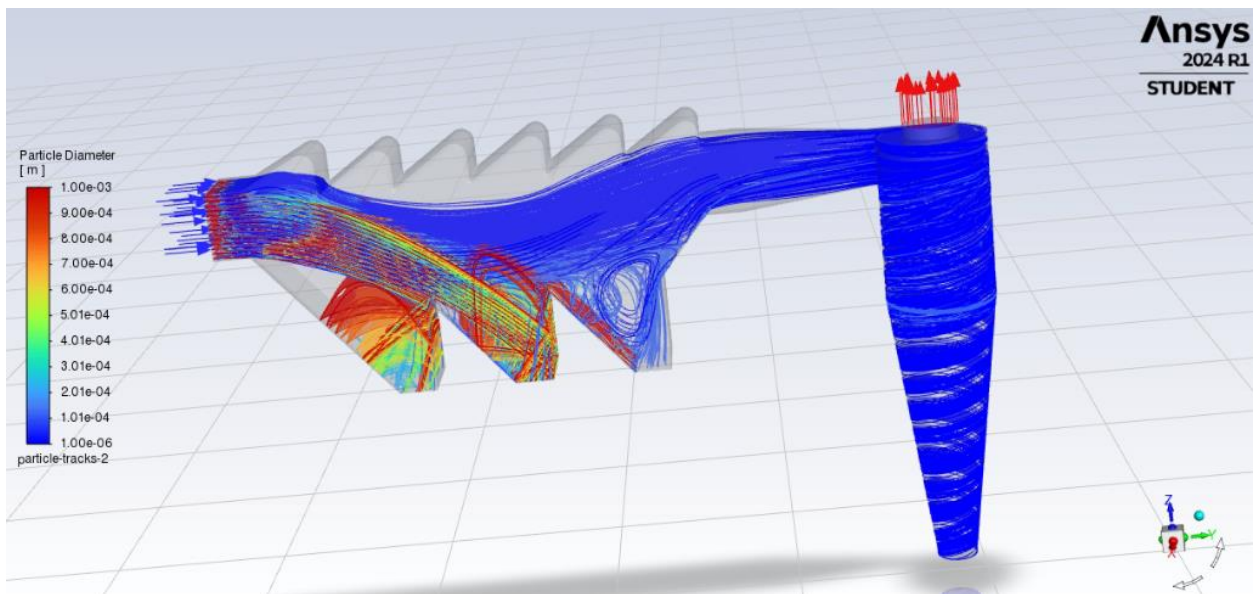


Figura 57: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie

En esta figura se puede apreciar lo que se resume numéricamente en la tabla anterior, las partículas más gruesas, que suponen el mayor porcentaje de masa de la corriente de sólidos precipitan en el primer y segundo depósito y pocas de ellas en el tercero. Las partículas más finas continúan hacia el ciclón y empiezan a precipitar hacia el depósito inferior pero no terminan de caer.

Esto podría ser un problema si el sistema operara de manera constante en el tiempo y no pudiera pararse, pero dado que este sistema se incluiría en un sistema para la producción de potencia mediante CO₂ almacenado se asume que este sistema no funcionara de manera permanente, sino que lo hará de forma intermitente cuando se necesite energía. De esta manera, el ciclón podría funcionar con peor rendimiento si en el tiempo que funcione el sistema se acumulara gran cantidad de partículas finas. En caso contrario, al parar el sistema debido a la ausencia de necesidad de producción de energía las partículas simplemente precipitarían por gravedad al depósito al cesar el flujo de gas a través del ciclón.

En la figura (58) se presentan las trayectorias de las partículas fluidas representadas en función de su velocidad.

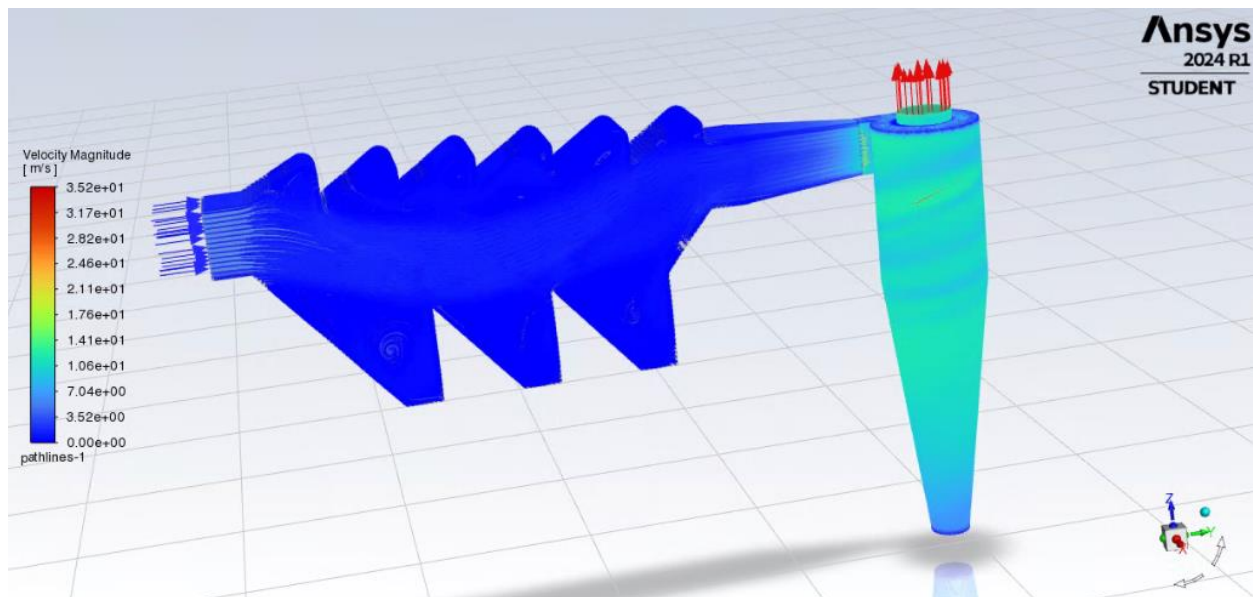


Figura 58: Trayectorias de las partículas de gas simuladas en el conjunto cámara de sedimentación y ciclón en serie

El comportamiento del gas en esta simulación es el que se esperaba, el dióxido de carbono va más lento en la cámara de sedimentación dado que su sección de paso es mayor, a medida que pasa por el adaptador se va acelerando hasta llegar a la velocidad de diseño del ciclón (20m/s) y dentro del ciclón el gas ocupa todo el volumen y finalmente se reconduce por el conducto de salida. La salida del gas en el conducto de salida no genera un perfil de velocidad uniforme, sino que este sale todavía con cierta aceleración centrífuga y por tanto se pega a las paredes de este conducto.

La pérdida de carga de este conjunto de sistemas de limpieza empieza a ser más notable tras la adición del acople y el ciclón, tomando un valor en este caso de 1911 Pa. Aun así, esta pérdida de carga en relación con las presiones de operación que se manejan se puede considerar baja.

4.5.2 Cámara de choque con ciclón en serie

Este conjunto se presenta como alternativa al anterior, que comprendía una cámara de sedimentación con un ciclón en serie. A priori, se espera que los sólidos que provienen de la salida de la cámara de choque se puedan limpiar en el ciclón, evitando que salgan por el conducto de salida de gases y precipitando por tanto a la parte inferior del ciclón. Teniendo en cuenta que la eficiencia de la cámara de choque es inferior a la de la cámara de sedimentación es posible que el ciclón en este caso tenga más carga de sólidos en su interior.

4.5.2.1 Creación de la geometría

En la siguiente figura (59) se muestra la geometría correspondiente al dominio en tres dimensiones del conjunto cámara de choque y ciclón en serie.

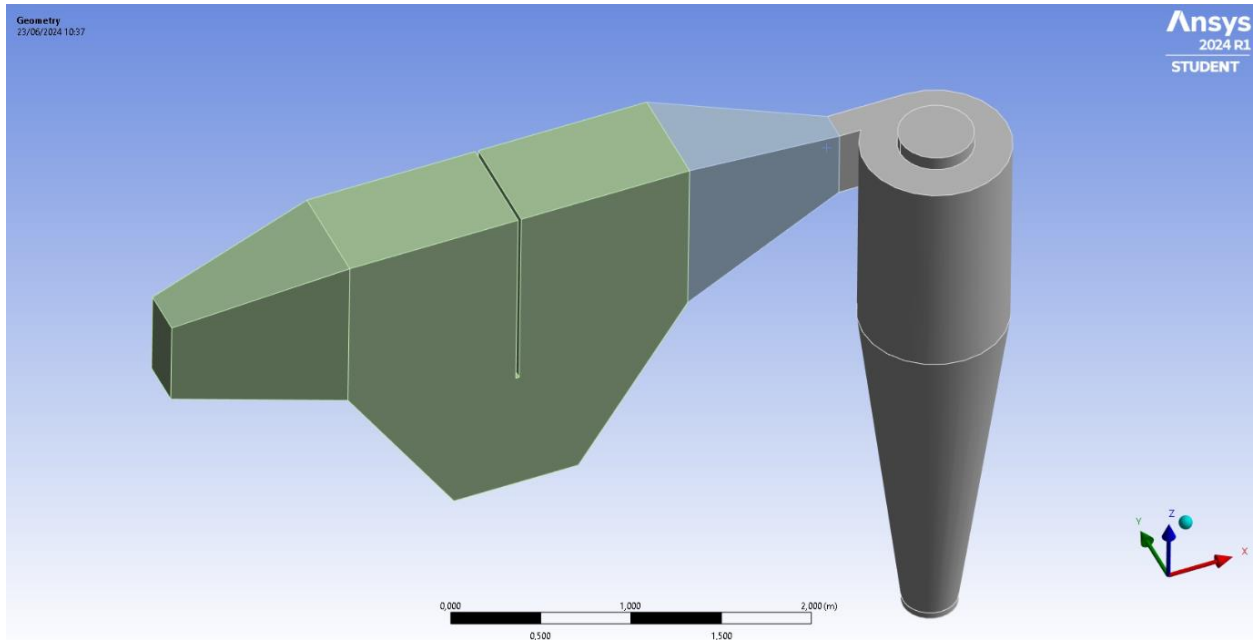


Figura 59: Dominio simulado para el conjunto de cámara de choque y ciclón en serie

Como ocurría en el apartado anterior dado que las secciones de salida y entrada de la cámara de choque y el ciclón no son iguales ha sido necesario realizar una adaptación, este adaptador se muestra coloreado en azul en la imagen.

4.5.2.2 Mallado

El mallado, igual que en el caso anterior, es también algo complicado debido a los detalles más finos del ciclón, además en este caso en la cámara de choque, como se pudo observar en el apartado 4.3.2.2 ha sido necesario tomar alguna opción de mallado para refinarlo en las zonas cercanas a la pared intermedia. A continuación, se especifican las opciones de mallado escogidas para este modelo.

- Inflation: en la pared deflectora intermedia de la cámara de choque para captar correctamente los primeros rebotes de las partículas. También, como se vio anteriormente, en las paredes del ciclón con el objetivo de captar mejor el comportamiento de gas y partículas en las zonas más cercanas a las pared.
- Sizing: en ciertas aristas de la entrada del ciclón para mejorar la discretización en zonas con detalles complicados.

En la siguiente figura (60) se muestra un mapa de colores del mallado, coloreado según la ratio de aspecto de cada elemento. Como ocurría en el modelo del apartado anterior este parámetro de malla está un poco por encima de la tolerancia para una discretización aceptable pero como se explicó anteriormente no ha sido posible refinar más la malla debido a la limitación de recursos.

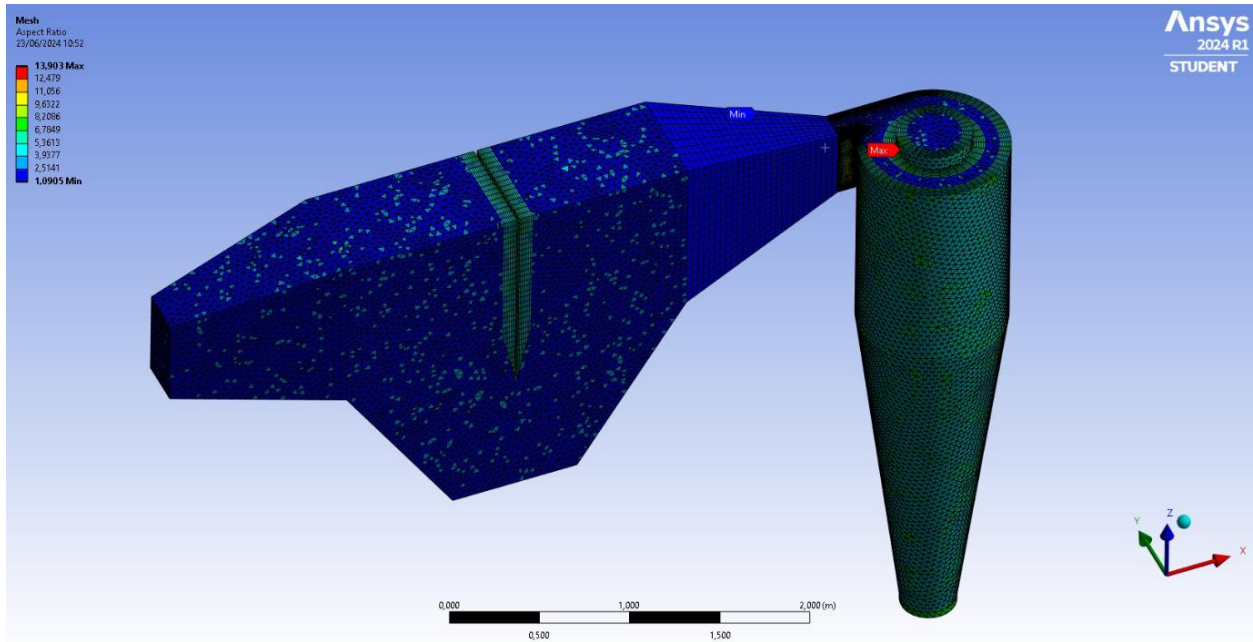


Figura 60: Ratio de aspecto de la malla utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie

En la figura (61) se presenta también un mapa de colores similar, pero para el parámetro de ortogonalidad de la malla.

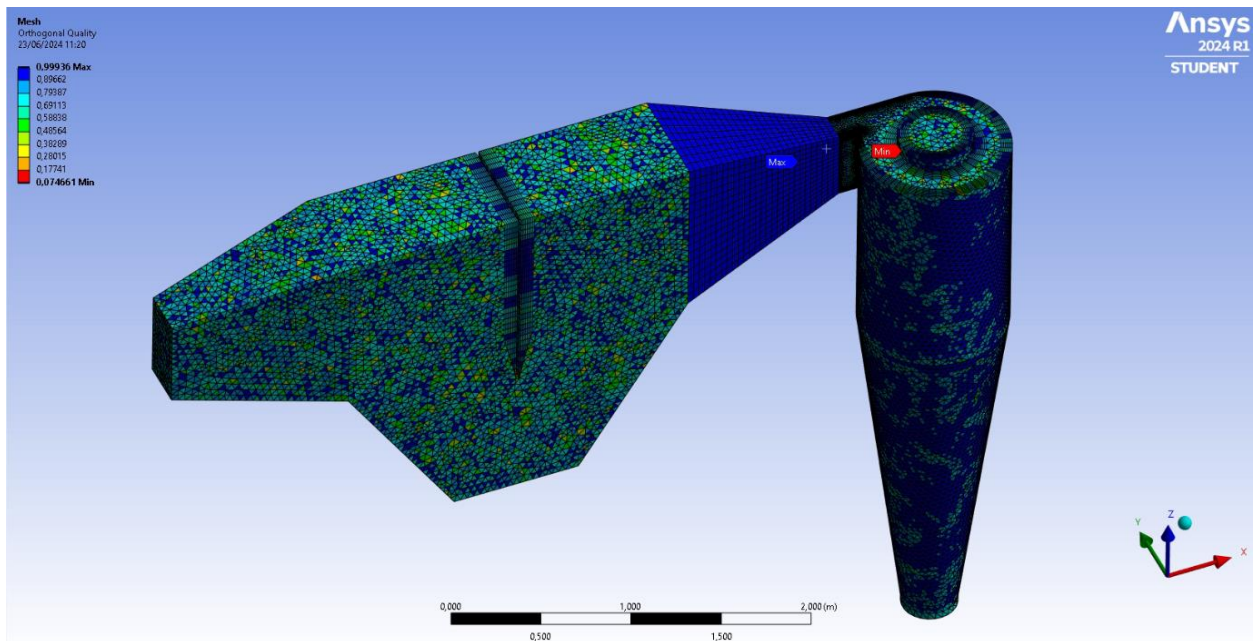


Figura 61: Ortogonalidad de la malla utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie

Como ocurría con el parámetro de ratio de aspecto, el máximo de la ortogonalidad de esta malla también se encuentra un poco fuera del rango admisible. Sin embargo, teniendo en cuenta que ambos parámetros en la mayoría de los elementos de la malla están en valores que se consideran correctos, comprendiendo las limitaciones de esta discretización se acepta esta malla como adecuada.

4.5.2.3 Configuración de la simulación

En la siguiente tabla se resume la configuración que se ha escogido para esta simulación.

Menú	Configuración	Valores / Selección	Comentarios
General	Gravedad	9.81m/s ²	En dirección del eje Z, en sentido negativo
Modelos	Viscosidad	SST $k - \omega$	-
	Modelo de fase discreta	Igual configuración que en modelos anteriores	
Materiales	Fluido	Dióxido de carbono	-
Condiciones de dominio	-	-	Seleccionar el volumen de control y asignarle como material el dióxido de carbono
Condiciones de contorno	Inlet	Velocidad en la sección de entrada = 10m/s DPM (comportamiento): escape	Estas condiciones de contorno permiten el análisis de un rango de velocidades. Caudal volumétrico de gas: 1.464m ³ /s
	Outlet	Presión manométrica en la sección de salida = 0bar DPM (comportamiento): escape	
	Collection bin 1	DPM (comportamiento): trap	
	Collection bin ciclón	DPM (comportamiento): trap	
Reportes	-	-	Crear los mismos reportes que en el caso anterior para las superficies Outlet y Collection bins
Inicialización y Numero de iteraciones	Inicialización Standard	Inlet	-
	Número máximo de iteraciones	300	
Criterios de convergencia	-	Comentados en el modelo 2D de la cámara de sedimentación	Añadir los reportes creados a los criterios de convergencia con la tolerancia por defecto (1e-3)

Tabla 9: Tabla resumen de la configuración utilizada para la simulación del conjunto cámara de choque y ciclón en serie

4.5.2.4 Post-procesamiento

Los resultados obtenidos para este modelo se presentan en este apartado una vez resuelta y convergida la simulación. En la siguiente figura se visualizan los caudales masicos de solidos que escapan por las superficies que hacen de depósito en la cámara de choque y en el ciclón y también los que escapan por la salida de gases del ciclón.

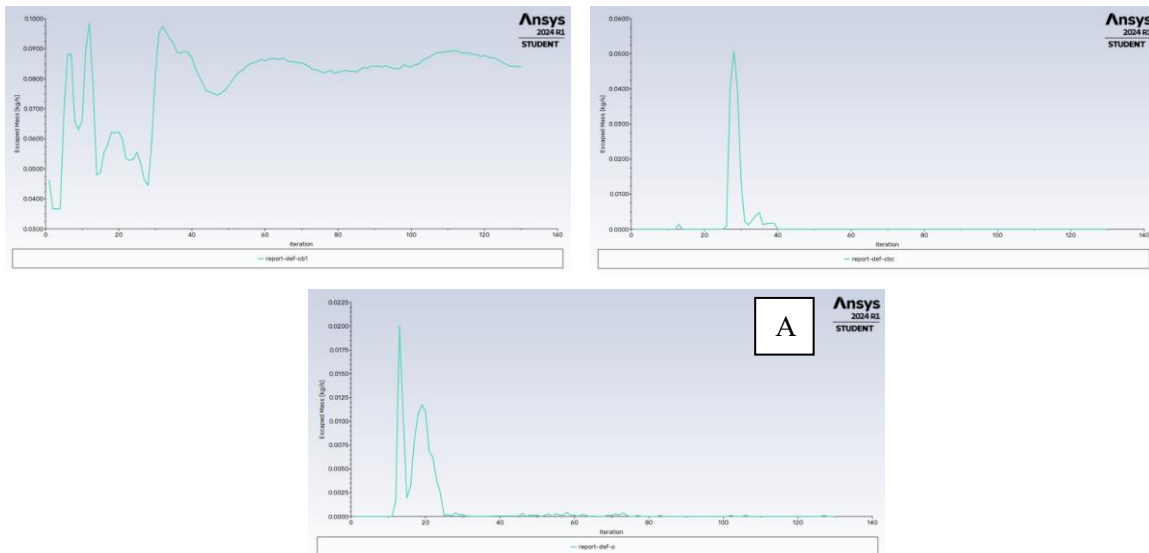


Figura 62: Reportes de caudal masico escapado por las superficies de interés del conjunto cámara de choque y ciclón en serie

Echando un vistazo a las gráficas que se han obtenido se observa que prácticamente toda la masa de sólidos sale por el collection bin de la cámara de choque y por las otras dos no sale caudal masico de sólidos. Para aclarar y entender mejor el comportamiento del sistema en la siguiente tabla se resumen los resultados mostrados en las gráficas de la figura.

Superficie	Caudal masico (kg/s)	Relación de caudal ($q_{\text{escapado}}/q_{\text{part}}$)
Collection bin 1	0.084	84.00%
Collection bin ciclón	0	0%
Total separado	0.084	Eficiencia de separación
		84.00%
Outlet	0	0%

Tabla 10: Resultados de la simulación del conjunto cámara de choque 7 ciclón en serie

Con los resultados mostrados en la tabla se aprecia que, aunque la corriente sale limpia del ciclón, todo el conjunto se está quedando dentro el 16% del caudal cuando este opera en régimen permanente. Si se analizan estos resultados comparándolos con el conjunto cámara de sedimentación con ciclón en serie, se observa que el comportamiento para un mismo caudal de gas es mejor para el sistema analizado en el apartado anterior. La cámara de sedimentación al operar a menor velocidad genera menos rebotes de partículas en su interior y por lo tanto las partículas pasan menos tiempo dentro de ella, además ofrece una eficiencia mayor en el proceso de separación. Por su parte la cámara de choque tiene trayectorias de partículas mucho más complejas, con muchos rebotes, esto hace que la simulación sea más difícil de resolver y que los resultados en cuanto a eficiencia de separación sean peores. Estas trayectorias se muestran en la figura (63) coloreadas según el diámetro de la partícula simulada.

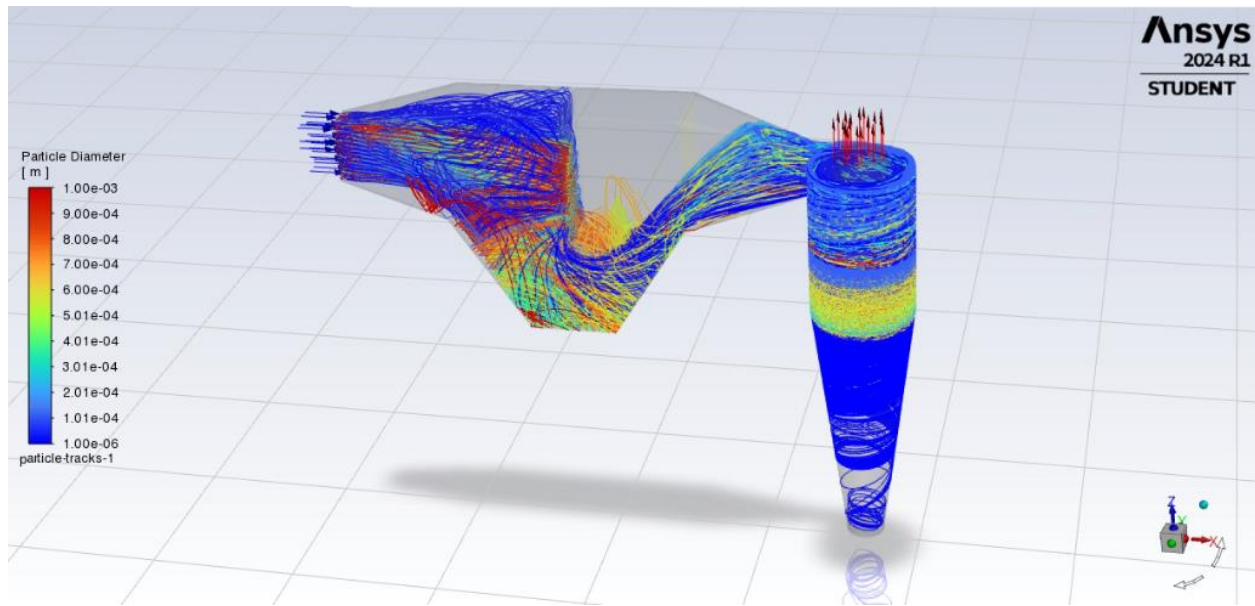


Figura 63: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de choque y ciclón en serie

En esta imagen se parecía bastante bien la complejidad de las trayectorias de las partículas debido a la cantidad de rebotes que se originan. Las partículas llegan con mucha inercia a la entrada de la cámara de choque y esto hace que reboten, se frenen y caigan (esto les ocurre a las partículas más gruesas) o en el caso de las partículas medias y finas que vuelvan a ser arrastradas por la corriente de CO₂ y llevadas hasta el ciclón. En este caso como hay partículas más gruesas que antes en el ciclón hay más masa que se queda resuspendida en él y esto causará un mal funcionamiento de este. Por otro lado, el hecho de que se produzca esta resuspension podría ser en gran parte debido a un problema en la velocidad a la entrada del ciclón, este conflicto se tratará de resolver en fases futuras del proyecto.

Se presenta también en la figura (64) un mapa de colores gráfico en función de la velocidad de las partículas de gas.

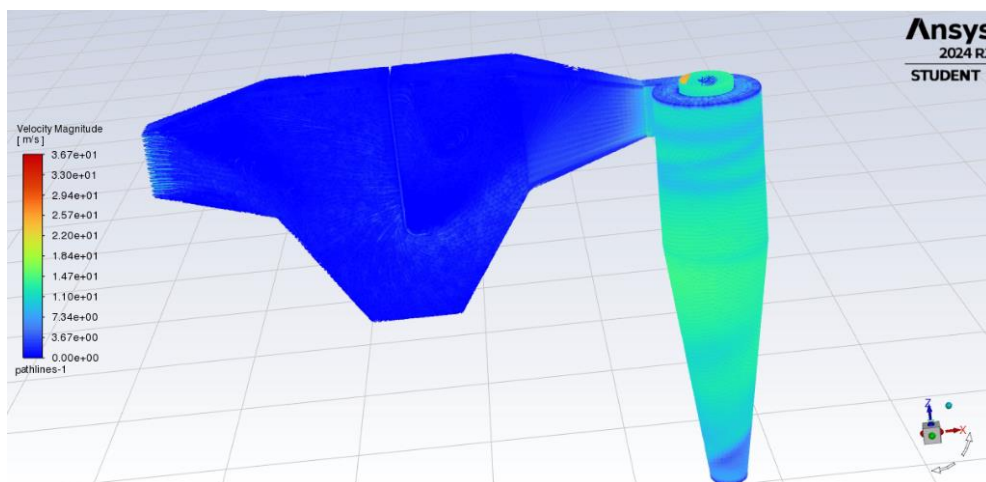


Figura 64: Trayectoria de las partículas simuladas en el conjunto cámara de choque y ciclón en serie

En este caso, tampoco se ven muy bien las trayectorias de las partículas de fluido dentro de la cámara de choque, aunque se intuyen líneas más claras en las que se acelera el fluido a causa de un cambio de sección o incluso de un cambio de dirección, como ocurre en las zonas cercanas a la placa deflectora. Las velocidades dentro del ciclón son prácticamente las mismas que las que se veían en la figura (58) del apartado anterior. El máximo de velocidad del gas se da en el interior del ciclón y, además, en el conducto de salida de este se observa que el gas, como ocurría también anteriormente, sale todavía con cierta aceleración centrífuga, por eso sale con trayectorias cercanas a la pared del conducto.

Una vez más se ha computado la presión total de la superficie de entrada y salida de gases en el conjunto y se ha determinado la pérdida de carga, que en este caso tiene un valor de 2046.11Pa. Teniendo en cuenta que todas las pérdidas de carga calculadas hasta ahora son muy bajas en comparación con las posibles presiones de operación se puede deducir que todos los equipos consumirán poca energía en su funcionamiento.

Teniendo en cuenta los resultados de los dos conjuntos simulados hasta ahora, se observa que el comportamiento de la cámara de sedimentación junto con el ciclón en serie es mucho mejor y a la larga causará menos problemas en operación debido a la menor masa de sólidos que queda contenida en el sistema.

5 PROCESAMIENTO DE DATOS DEL ANÁLISIS EN PYTHON

En este apartado se analizarán los datos correspondientes a los análisis de elementos finitos realizados para las diferentes geometrías (cámara de sedimentación y cámara de choque) imponiendo diferentes condiciones de velocidad de gas y partículas a la entrada de ambos separadores. Esto genera un abanico de caudales volumétricos en los que estos sistemas de limpieza podrían funcionar de manera eficiente.

5.1 Análisis de velocidades de la cámara de sedimentación

En el caso de la cámara de sedimentación, teniendo en cuenta que el modelo bidimensional capta de manera fiel lo que ocurre con el flujo de partículas a su paso por el dominio simulado, se ha decidido utilizar este modelo para realizar el análisis de velocidades y determinar así el rango de operación concreto para este separador.

Tanto el mallado utilizado como las opciones de configuración son exactamente las mismas que las explicadas en apartado 4.2.1, la única diferencia es que para este análisis se han declarado tanto la velocidad del gas como la velocidad de inyección de las partículas como parámetros. De esta manera no habrá que realizar las simulaciones de una en una, sino que se realizarán desde la pantalla de inicio en el menú “Parameter Set”, esto permite dejar la simulación corriendo durante el tiempo necesario para que resuelva todos los casos que se hayan declarado. Para este estudio se han definido velocidades de 1m/s a 10m/s de 0.5m/s en 0.5m/s, lo que supone simular 19 casos diferentes, por tanto, en esta situación en concreto el ahorro de tiempo al parametrizar el modelo es significativo.

Es importante señalar que para todos los casos resueltos se ha asumido que tanto la velocidad del gas como la de las partículas son iguales, por lo que realmente se podría haber declarado una sola variable como parámetro e imponerla tanto como velocidad del gas como de la inyección.

Una vez resueltos todos los casos se pide a ANSYS que exporte la tabla como un archivo .csv, de esta forma será fácil leerlo con programa de Python. En la siguiente figura (65) se representan los resultados de caudal masico de solidos obtenidos para las diferentes velocidades de operación.

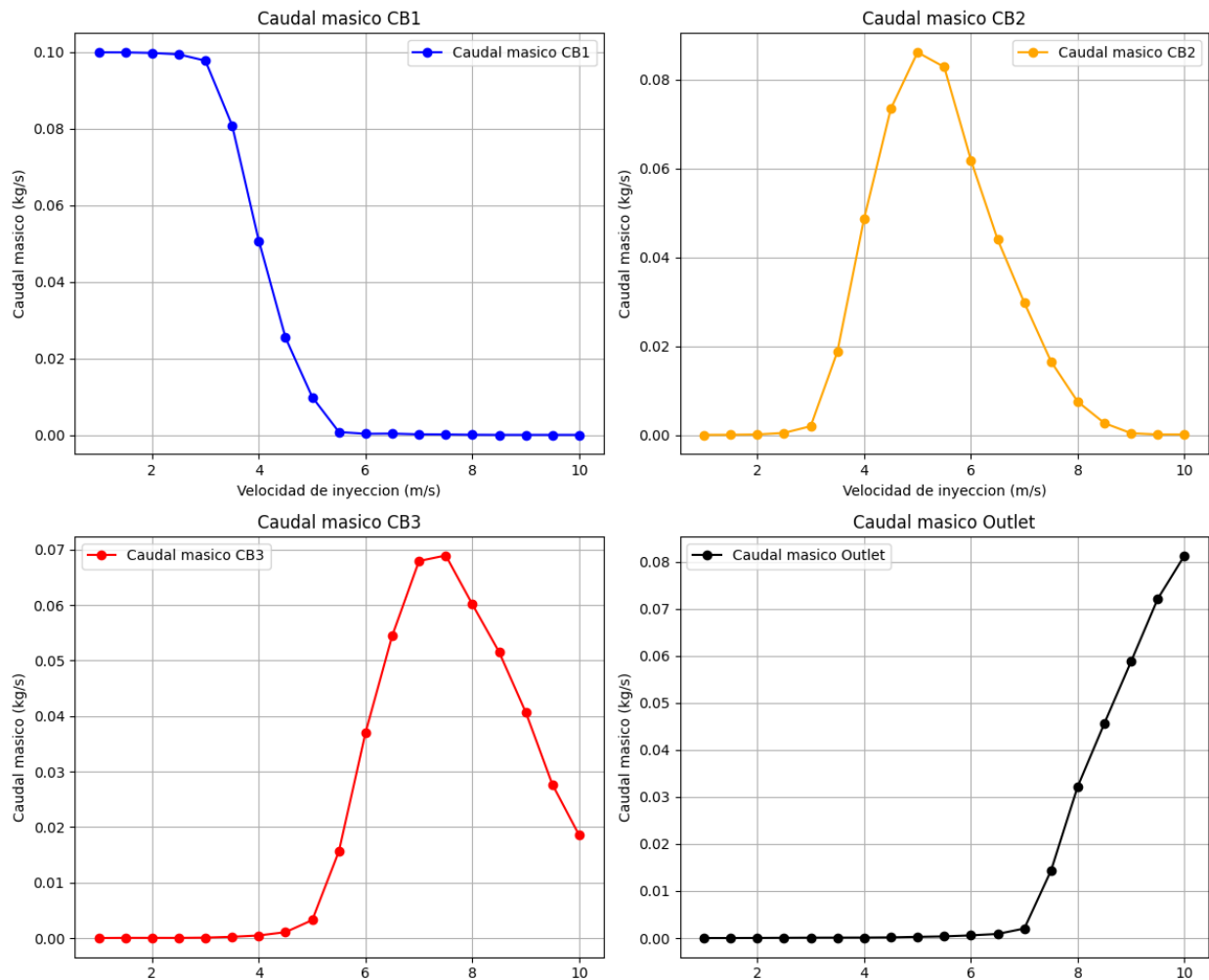


Figura 65: Gráficas de caudales masicos escapados por las superficies de interés en la cámara de sedimentación frente a velocidad de operación

En estas cuatro gráficas se observa el caudal de solidos que saldría por cada uno de los depósitos y por la salida de gases. Se puede apreciar que a medida que la velocidad de operación aumenta las partículas empiezan a salir por los depósitos más lejanos a la entrada, esto es consecuencia de una mayor inercia en estas, lo que supone que estas lleguen más lejos dentro del dominio. Cuando se supera un cierto umbral de velocidad, las partículas comienzan a salir por la salida de gases tras rebotar en las paredes adyacentes a esta.

Teniendo en cuenta estas gráficas, se podría concluir que el régimen de operación óptimo de la cámara de sedimentación, en el cual la eficiencia de separación de esta se mantiene por encima del 97%, se da para velocidades de 1 a 7m/s, siendo aceptable hasta unos 7.5m/s, punto en el que la eficiencia de separación baja hasta situarse alrededor del 85%. Se observa que a partir de este punto las condiciones de operación sobrepasan las capacidades del separador y por lo tanto de 8 a 10m/s se obtienen eficiencias de separación que no son aceptables para los requisitos que se tienen en este proyecto.

5.2 Análisis de velocidades de la cámara de choque

Como se explicó en apartados anteriores, modelar el comportamiento de las partículas en el dominio de la cámara de choque ha sido un reto, pues el hecho de que las partículas entren con tanta inercia en un espacio tan reducido hace que estas reboten en todas las paredes que encuentren a su paso. Todos estos rebotes deben ser calculados, determinando así cual será el punto final de la trayectoria de cada una de las partículas simuladas. Dado que esto es computacionalmente costoso se ha decidido utilizar el modelo bidimensional ya que, aunque sus resultados no fueran directamente extrapolables al caso en tres dimensiones, estas simulaciones podrían servir para obtener un idea de cuáles serían las condiciones de operación adecuadas para este separador. Para este análisis dado que este separador es más compacto se ha decidido llegar a estudiar velocidades de operación más altas. Se proponen entonces como casos de estudio las velocidades que comprenden de 3 a 20m/s estudiándose en este caso de un metro por segundo en un metro por segundo.

En la figura (66) se presenta el gráfico que muestra los resultados para el caudal de solidos que se deposita en el collection bin y el que escapa por la salida de gases (outlet).

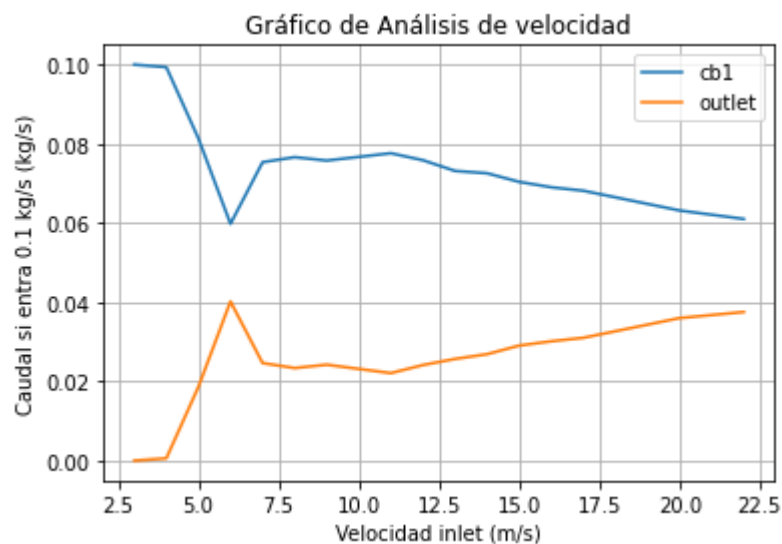


Figura 66: Gráficas de caudales masicos escapados por las superficies de interés en la cámara de choque frente a velocidad de operación

En este caso se observa, teniendo en cuenta la línea naranja, que la eficiencia de separación es de entrada inferior a la de la cámara de sedimentación, aunque en el caso de la cámara de choque, se observan resultados de eficiencia aceptables (superiores al 70%) hasta velocidades cercanas a los 15m/s lo cual sugiere que el comportamiento de este separador es más independiente de la velocidad de entrada. De este estudio se puede deducir que la cámara de choque tiene un mejor comportamiento frente a velocidades grandes y mantiene un mínimo de eficiencia por encima del 60% hasta velocidades de 20m/s.

Se aprecia un punto especialmente singular para una velocidad de entrada de 6m/s en el cual se tiene un punto de mínima eficiencia, bajando este valor por debajo del 60%. A continuación, se analizará este caso con más detalle para encontrar una justificación a este comportamiento anómalo.

Es conveniente, cuando se realiza un análisis paramétrico de este tipo, activar en ANSYS la opción “Retain Data” que permite que el programa guarde en memoria todos los casos calculados. Abriendo la solución del caso de 6m/s se obtiene el gráfico que representa la trayectoria de partículas coloreadas según su diámetro que se presenta en la figura (67).

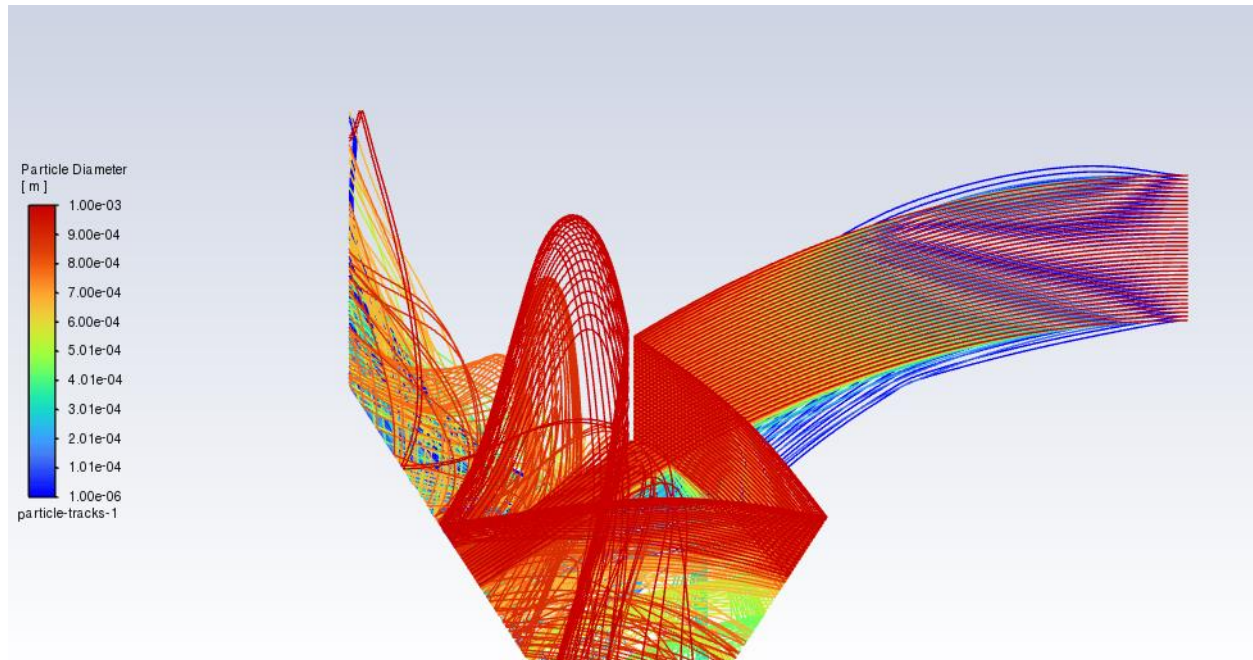


Figura 67: Trayectoria de las partículas simuladas en la cámara de choque bidimensional para el caso de velocidad de operación 6m/s

Se puede apreciar en la imagen que este caso es muy particular ya que la trayectoria de rebotes calculada hace que salgan más partículas gruesas (representadas en color naranja) por la superficie de salida de gases, esto hace que el caudal de sólidos que salen por este conducto sea significativamente mayor. Se observa también que las partículas más finas no cambian su comportamiento respecto a otros casos analizados, como el de 10m/s, estas siguen siendo arrastradas por la corriente de gas y transportadas hacia la salida.

Teniendo en cuenta todos estos datos se concluye que en lo que se refiere a los separadores de primera etapa, la cámara de sedimentación es más adecuada para velocidades de flujo relativamente pequeñas ya que proporciona eficiencias que para la cámara de choque son inalcanzables en cualquier rango de velocidades estudiado. Por otro lado, para velocidades altas, es decir, caudales mayores, la cámara de choque tiene resultados bastante aceptables, más aún si fuera combinada en serie con otro separador que eliminara tanto las partículas más finas como las de tamaño medio que se cuelan hacia el conducto de salida de esta.

6 CONCLUSIONES

La captura y almacenamiento de CO₂ en cavidades salinas ofrecen una solución prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. La integración de estas tecnologías en sistemas de almacenamiento de energía contribuye a la transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Además, el uso de cavidades salinas como reservorios naturales maximiza la eficiencia de la captura de CO₂ y minimiza el impacto ambiental. La investigación identifica varios desafíos técnicos asociados con la limpieza de las corrientes de CO₂, como la sedimentación de partículas y la búsqueda y diseño de sistemas de separación eficientes en diferentes condiciones operativas. Las soluciones propuestas, basadas en el diseño y análisis de cámaras de sedimentación, cámaras de choque y ciclones, proporcionan recomendaciones valiosas para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas de captura de CO₂.

Los sistemas de limpieza evaluados han demostrado ser efectivos en la limpieza de corrientes de dióxido de carbono para ciclos de producción de potencia, otorgando unos resultados muy favorables en la separación de partículas de tamaño medio y grande (de 30 μ m a 1mm), para el caso de la cámara de sedimentación se obtuvo una eficiencia cercana al 99% y en el caso de la cámara de choque de un 85% aproximadamente. Por otro lado, los conjuntos de sistemas de limpieza simulados han demostrado ser capaces de eliminar todas las partículas de la corriente de gas, esto sugiere que podrían ser soluciones efectivas que permitirían satisfacer los requisitos de limpieza propuestos. La capacidad de estos sistemas para eliminar impurezas y partículas sólidas de las corrientes de CO₂ es crucial para garantizar el funcionamiento óptimo de los equipos involucrados en el proceso de almacenamiento y utilización de CO₂. El uso de herramientas de simulación como ANSYS permitió un análisis detallado del comportamiento de los sistemas de limpieza bajo diferentes condiciones operativas. Las simulaciones en 2D y 3D ayudaron a mejorar el diseño de los separadores y a evaluar su viabilidad técnica y económica. Este enfoque de modelado proporciona una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la tecnología de captura y reutilización de CO₂.

6.1 Desarrollos futuros

El trabajo también sugiere varios desarrollos futuros para avanzar en esta línea de investigación. Entre ellos se incluyen la optimización de materiales, ya que la selección de materiales resistentes a la corrosión y a la erosión es fundamental para garantizar la durabilidad de los sistemas de limpieza.

La combinación de tecnologías de captura de CO₂ con sistemas de almacenamiento de energía renovable, como las centrales termosolares y las baterías de iones de litio, puede mejorar la viabilidad económica y la sostenibilidad de estos sistemas. Estudios pequeña escala y bajo condiciones operativas similares a las reales son necesarios para validar los resultados obtenidos en simulaciones como las que se han realizado en este trabajo. Estos estudios pueden proporcionar datos más precisos sobre el rendimiento y la eficiencia de los

sistemas de limpieza. La investigación y desarrollo de nuevas tecnologías de separación, como los sistemas de membranas y la captura directa de aire, pueden complementar los métodos actuales y ofrecer soluciones más eficientes para la captura y almacenamiento de CO₂.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] https://personal.us.es/mfarevalo/recursos/tec_far/separacion_solidos.pdf
- [2] <https://www.solerpalau.com/es-es/hojas-tecnicas-depuracion-del-aire-filtros-ii/>
- [3] <https://ceegsproject.eu/>
- [4] <https://ceegsproject.eu/technical-reports/>
- [5] <https://forum.ansys.com/uploads/846/SCJEU0NN8IHX.pdf>
- [6] <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/el-hidrogeno-verde-un-acumulador-energetico-para-catapultar-las-renovables>
- [7] <https://www.chumillastechnology.com/blog/infografia-funcionamiento-de-una-planta-termosolar/>
- [8] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431121002635?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=89d871bbae6c2f82
- [9] https://www.researchgate.net/publication/258381813_Technology_Review_of_Modern_Gas_Turbine_Inlet_Filtration_Systems