COLOMBIA POTENCIA DE LA VIDA

CONTRATO DE CONSULTORÍA No.373-2024

Realizar la actualización y complemento al análisis integral, para ejecutar labores de intervención por humedades y reparaciones identificadas de urgente atención en la sede centro del AGN. GSA 19.

INFORME MODELACIÓN HIDRÁULICA 3D DE CUBIERTAS TORRE NORTE, SUR Y ROSA DE LOS VIENTOS, DEL INMUEBLE DE INTERÉS CULTURAL "ARCHIVO GENERAL DE LA NACIÓN" _ BOGOTÁ D.C.



Acceso Principal.



Cubierta Bloque Costado Norte_ (vista rosa de los vientos).

BOGOTÁ D.C, NOVIEMBRE DE 2024
VERSIÓN FINAL
TÉCNICAS COLOMBIANAS DE INGENIERÍA S.A.S.

HOJA DE CONTROL

ENTIDAD	RESPONSABLE	EJEMPLARES
AGN		

ÍNDICE DE MODIFICACIONES

ÍNDICE VERSIÓN	SECCIÓN MODIFICADA	FECHA DE MODIFICACIÓN	OBSERVACIONES
1	INF DIAGNOSTICO HIDROSANITARIO	NOVIEMBRE DEL 2024	ENTREGA PARA REVISIÓN

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

TITULO DOCUMENTO:			MODELACIÓN HIDRÁULICA – ARCHIVO GENERAL DE LA NACIÓN.		
DOCUMENTO No:			1		
APROBACIÓN	NUMERO DE REVISIÓN		1	2	3
	“Profesional que elabora el documento”	Nombre:	**OMAR ARCHILA**		
		Firma:			
		Fecha:	**NOVIEMBRE 2024**		
	RESPONSABLE APROBACIÓN	Nombre:	**OMAR ARCHILA**		
		Firma:			
		Fecha:	**NOVIEMBRE 2024**		
	“Representante legal”	Nombre:	**MIGUEL ROSERO**		
		Firma:			
		Fecha:	**NOVIEMBRE 2024**		

TABLA DE CONTENIDO

1 INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO 6

1.1 ALCANCE GENERAL DE LA CONSULTORÍA 6
1.2 OBJETIVOS GENERAL DEL PROYECTO 6
1.1 PLAZO DE EJECUCIÓN. 6
1.2 OBJETIVO GENERAL. 6
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 7
1.1 ARCHIVO GENERAL DE LA NACIÓN 7
1.1.1 Localización 7
1.2 METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE REUSÓ DE AGUAS LLUVIAS. 8
1.3 REDES DE DESAGÜES DE AGUA DE REUSÓ DE AGUAS LLUVIAS 8
1.3.1 Marco Normativo 8
1.3.2 Marco teórico y metodología del diseño reutilización de lluvias 9

2 MODELO PREDICTIVO 3D 12

2.1 MODELADO GEOMÉTRICO INICIAL (3D CAD) 12
2.2 DEPURACIÓN Y VERIFICACIÓN DE LA GEOMETRÍA 13
2.3 GENERACIÓN DE LA MALLA ROSA DE LOS VIENTOS 15
2.4 CONDICIONES DE FRONTERA Y DE ENTRADA 23
2.5 CONFIGURACIÓN EN FLUENT 25
2.6 CONDICIONES MULTI-FASE Y ANÁLISIS DE ESCORRENTÍA SUPERFICIAL 26
2.7 PROCESO DE DISCRETIZACIÓN 27
2.8 ENFOQUE LAGRANGIANO 31
2.9 SIMULACIÓN Y POSTPROCESAMIENTO 32
2.9.1 Inicialización, ramp-up de condiciones de lluvia 33
2.10 VALIDACIÓN Y OPTIMIZACIÓN 36
2.10.1 Monitoreo de convergencia 37
2.10.2 Extracción de resultados 38
2.10.3 Extraextraccion de cotas rosa de los vientos 38
2.11 MODELACIÓN E INTEGRACIÓN ROSA DE LOS VIENTOS CON ÁREA DE LAS PALMERAS 54

3 CONCLUSIONES 78

4 BIBLIOGRAFÍA 79

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Localización Archivo General de la Nación. 8
Ilustración 2. Curva intensidad frecuencia, duración: OBS MET NACIONAL [2120523] 11

INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Bajo contrato No 373-2023 suscrito entre el ARCHIVO GENERAL DE LA NACIÓN y TÉCNICAS COLOMBIANAS DE INGENIERÍA SAS, cuyo objeto es realizar el "análisis y reusó de las aguas lluvias" para la sede centro del agn. gsa 19."; se cobija el presente documento.

El complejo edificatorio donde actualmente funciona la sede centro y principal del AGN ubicado en la Carrera 6 No 6 –91, fue construido hace 32 años y desde entonces, cumple con su carácter misional de prestación de los servicios asociados. Está conformado por dos edificaciones denominadas Bloque Sur y Bloque Norte.

El sistema de drenaje de aguas lluvias opera de manera convencional, cumpliendo las funciones de captación, conducción y evacuación final hacia la red pública de aguas pluviales generadas por la precipitación.

Actualmente, debido al fenómeno de La Niña y a los bajos niveles de los embalses que abastecen de agua potable a la ciudad de Bogotá, se ha implementado un esquema de racionamiento rotativo del suministro. Ante esta situación, tanto las edificaciones nuevas como las existentes han optado por incorporar sistemas de captación y almacenamiento de aguas lluvias, aprovechando este recurso para diversas actividades, como las descargas de sanitarios, el lavado de fachadas y cubiertas, así como el riego de áreas verdes y jardines, entre otros usos. Esta práctica no solo contribuye a reducir la demanda sobre la red pública de abastecimiento, sino que también genera beneficios económicos para las edificaciones al disminuir los costos asociados al consumo de agua potable destinada a dichas acciones.

El presente informe presenta un planteamiento para implementar un sistema destinado a captar la cantidad de aguas lluvias del bloque norte, con el objetivo de aprovechar este recurso para cubrir las necesidades de riego de las áreas ajardinadas y el lavado de cubiertas en ambos bloques: dicho volumen de acuerdo a las condiciones y no modificación de las estructurales y arquitectónicas se define en el sótano uno del bloque norte en donde se distribuirá la red de reusó de aguas lluvias para garantizar dichas actividades mencionadas anteriormente y reducir la dependencia de la red pública.

1 INFORMACIÓN GENERAL DEL PROYECTO

1.1 Alcance General de la Consultoría

"Implementar un sistema de manejo de aguas lluvias que incluya un proceso de pretratamiento previo a su almacenamiento, con el propósito de aprovechar este recurso en las actividades de riego y lavado de las áreas norte y sur del Archivo General de la Nación."

1.2 OBJETIVOS GENERAL DEL PROYECTO

El objetivo general del presente estudio es desarrollar el planteamiento integral de la red de conducción y almacenamiento de aguas lluvias para el aprovechamiento sostenible de este recurso en las áreas norte y sur del Archivo General de la Nación. Este proceso se llevará a cabo a partir de la coordinación con el diseño arquitectónico y el levantamiento detallado de las redes existentes, con el fin de garantizar una integración eficiente del sistema. La captación del agua lluvia se realizará a través de los colectores ubicados en el sótano 1 de ambos bloques, permitiendo su conducción hacia los puntos de almacenamiento designados. Adicionalmente, se establecerán y distribuirán de acuerdo a la red existente la designación de la misma ubicación de los puntos hidráulicos, adicionando solo los necesarios para el lavado de los equipos de ventilación también.

1.1 PLAZO DE EJECUCIÓN.

El término proyectado para la ejecución total del objeto del contrato es de TRES (3) MESES o 31 de diciembre de 2023.

1.2 OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar el planteamiento de reusó de aguas lluvias en la torre norte, destinado para abastecer las áreas de los bloques norte y sur garantizando el suministro eficiente de esta agua pluvial para las distintas actividades.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Determinar la capacidad hidráulica y los diámetros óptimos de los colectores de aguas lluvias, garantizando una captación y conducción eficiente del recurso dentro del sistema.

Calcular el volumen de almacenamiento requerido para asegurar el suministro continuo de aguas lluvias reutilizadas en las actividades de riego y lavado de la edificación, optimizando el funcionamiento de la red.

Entregables:

- ✓ Se entregará un documento escrito que contenga la metodología y marco teórico
- ✓ Planos
- ✓ Conclusiones y Recomendaciones.

Los documentos escritos como los planos, estarán firmados por los profesionales responsables. Se anexar copia de la matricula profesional vigente del Ingeniero responsable.

El producto entregable corresponde al diseño de la red de almacenamiento y suministro del reusó de aguas lluvias (informe, planos (planta corte vertical y detalles constructivos).

1.1 ARCHIVO GENERAL DE LA NACIÓN

1.1.1 Localización

El complejo edificatorio donde actualmente funciona la sede centro y principal del AGN ubicado en la Carrera 6 No 6 –91, fue construido hace 32 años y desde entonces, cumple con su carácter misional de prestación de los servicios asociados. Está conformado por dos edificaciones denominadas Bloque Sur y Bloque Norte.



Ilustración 1. Localización Archivo General de la Nación.
Fuente: https://www.google.com/maps

1.2 METODOLOGIA PARA EL DISEÑO DE REUSÓ DE AGUAS LLUVIAS.

De acuerdo a información del levantamiento de la red existente de desagües de aguas lluvias, se realiza un análisis previo sobre el dimensionamiento y capacidad de los colectores existentes de bloque norte y sur para la determinación de las bajantes que abastecerán el llenado del tanque de aguas lluvias.

Una vez verificado le dimensionamiento de colectores y volúmenes del tanque de aguas lluvias, se establece las rutas y servicios de la cual se realizará abastecimiento para estos servicios a partir del agua lluvia.

1.3 Redes de desagües de Agua de reusó de aguas lluvias

1.3.1 Marco Normativo.

Para el diseño, revisión e inspección de las redes de suministro de agua potable en la sede aplican las siguientes normas:

- NTC 1500 – CODIGO COLOMBIANO DE INSTALACIONES HIDRAULICAS Y SANITARIAS – Sexta edición del 2023.

- Resolución 0330 de 2017 - Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS

- Datos mete reológicos o curva idf (IDEAM)

1.3.2 Marco teórico y metodología del diseño reutilización de lluvias

Determinación del sistema.

Para el sistema en general, se debe considerar la instalación de una caja de disipación de energía con el objetivo de reducir la velocidad del agua proveniente del colector, garantizando así que las velocidades sean adecuadas para la sedimentación del material particulado. Posteriormente, el agua pasará a un tanque de almacenamiento de 10 m³ ubicado en bloque norte sótano 1, el cual asegurará el suministro para las actividades designadas en ambos bloques. Una vez que el tanque alcanza su volumen de retención, el exceso de agua será evacuado mediante una tubería de rebose conectada a la red de alcantarillado público.

Método de conversión y metodología del diseño

El caudal de lluvia que cae sobre la superficie de una cubierta se debe convertir a un caudal de L/s(galón/min) de acuerdo con las siguientes ecuaciones

$$Litros/segundo = R \times A \times 0{,}000278$$

en donde

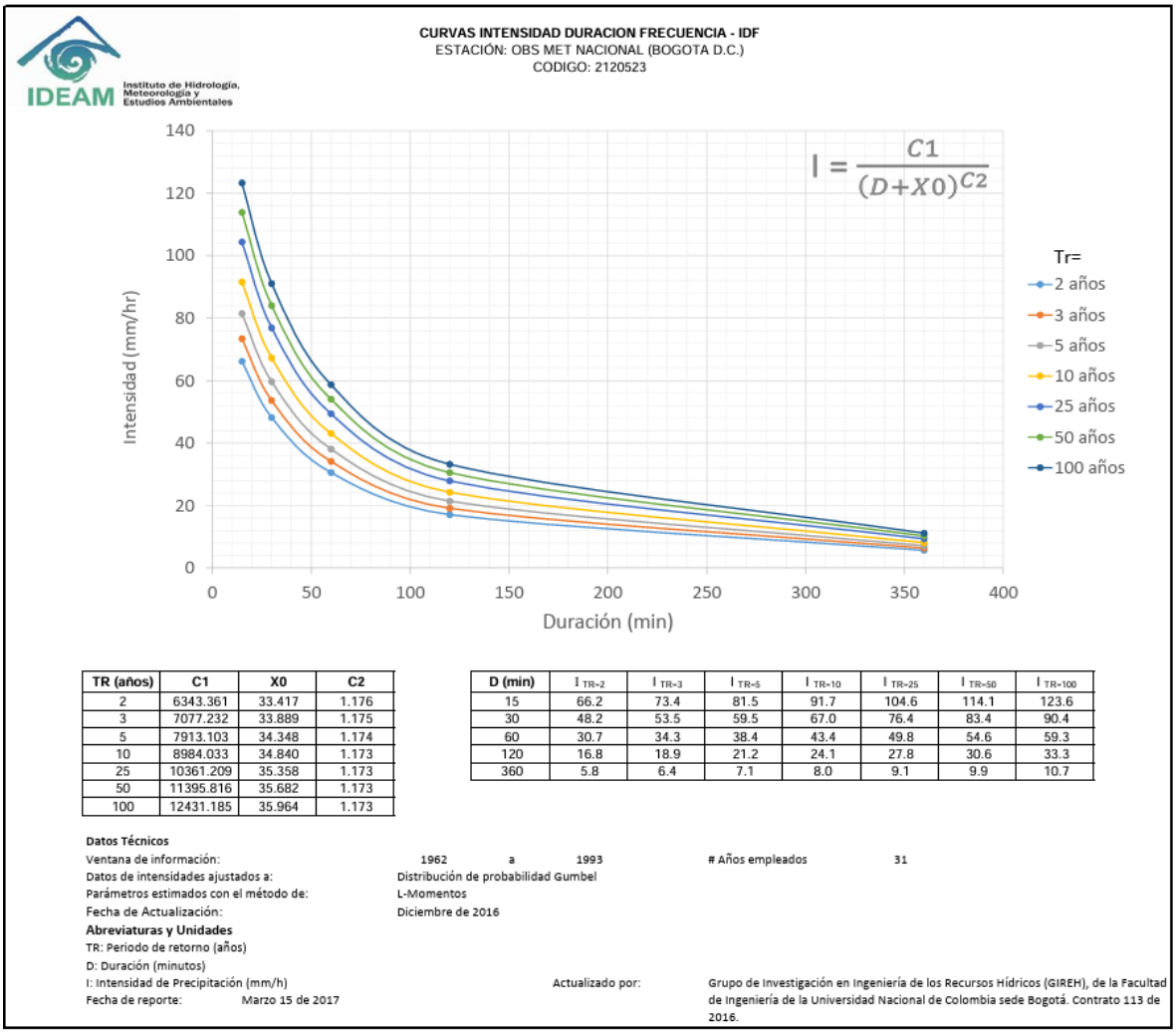
R = intensidad de lluvia en mm/hora

A = Área de la cubierta en m^2

En este contexto para la validación de los colectores y los dimensionamientos de los tanques de almacenamiento de aguas lluvias se tomó como periodo de retorno de 10 años

y tiempo de concentración de 10 minutos de acuerdo a el capítulo 12.6.1 generalidades del dimensionamiento de conductores, bajantes y desagües para aguas lluvias en donde se indica: “la dimensión de los conductores verticales y bajantes, desagües de la edificación y alcantarillado de aguas lluvias de la edificación y cualquier ramal horizontal de dichos desagües o alcantarillas debe basarse en el caudal de precipitación por 10 minutos de un intervalo de 10 años o de la información meteorológica local representativa estadísticamente existente a la fecha suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) o en otras tasas de precipitación determinadas por información meteorológica local aprobada”.

En este contexto, la validación de los colectores y el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de aguas lluvias se realizó considerando un período de retorno de 10 años y un tiempo de concentración de 10 minutos. Esta elección se fundamenta en lo establecido en el capítulo 12.6.1 de la normativa, referente al dimensionamiento de conductores, bajantes y desagües para aguas lluvias, el cual establece: "La dimensión de los conductores verticales y bajantes, desagües de la edificación y alcantarillado de aguas lluvias de la edificación y cualquier ramal horizontal de dichos desagües o alcantarillas debe basarse en el caudal de precipitación por 10 minutos de un intervalo de 10 años o de la información meteorológica local representativa estadísticamente existente a la fecha suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) o en otras tasas de precipitación determinadas por información meteorológica local aprobada". Este criterio permite garantizar que el sistema de drenaje y almacenamiento diseñado sea capaz de manejar de manera eficiente los volúmenes de agua lluvia esperados, minimizando el riesgo de desbordamientos y optimizando el aprovechamiento del recurso hídrico dentro del proyecto.



TR (años)	C1	X0	C2
2	6343.361	33.417	1.176
3	7077.232	33.889	1.175
5	7913.103	34.348	1.174
10	8984.033	34.840	1.173
25	10361.209	35.358	1.173
50	11395.816	35.682	1.173
100	12431.185	35.964	1.173

D (min)	I TR=2	I TR=3	I TR=5	I TR=10	I TR=25	I TR=50	I TR=100
15	66.2	73.4	81.5	91.7	104.6	114.1	123.6
30	48.2	53.5	59.5	67.0	76.4	83.4	90.4
60	30.7	34.3	38.4	43.4	49.8	54.6	59.3
120	16.8	18.9	21.2	24.1	27.8	30.6	33.3
360	5.8	6.4	7.1	8.0	9.1	9.9	10.7

Datos Técnicos

Ventana de información: 1962 a 1993 # Años empleados 31
Datos de intensidades ajustados a: Distribución de probabilidad Gumbel
Parámetros estimados con el método de: L-Momentos
Fecha de Actualización: Diciembre de 2016

Abreviaturas y Unidades

TR: Periodo de retorno (años)
D: Duración (minutos)
I: Intensidad de Precipitación (mm/h)
Fecha de reporte: Marzo 15 de 2017

Actualizado por: Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá. Contrato 113 de 2016.

Ilustración 2. Curva intensidad frecuencia, duración: OBS MET NACIONAL [2120523] (fuente IDEAM)

2 MODELO PREDICTIVO 3D

2.1 Modelado geométrico inicial (3d cad)

Se elaboró un modelo tridimensional base en AutoCAD 3D, generado a partir de un levantamiento LiDAR realizado sobre la infraestructura del Archivo General de la Nación. Este modelo incluyó los elementos principales del sistema de drenaje pluvial: cubiertas, canales, rejillas, bajantes y patios internos. En esta etapa inicial, se excluyeron detalles arquitectónicos menores, dado que su influencia en el comportamiento del escurrimiento superficial era insignificante para los fines de simulación hidrodinámica.

La geometría mostrada en la Ilustración 3.1 fue posteriormente exportada al entorno de Ansys Fluent con el objetivo de realizar una validación preliminar del modelo. Este proceso permitió identificar y corregir errores geométricos críticos como aristas inconexas (edges), polígonos abiertos y zonas traslapadas, asegurando así la consistencia geométrica necesaria para el mallado y posterior simulación bajo un enfoque computacional Lagrangiano.

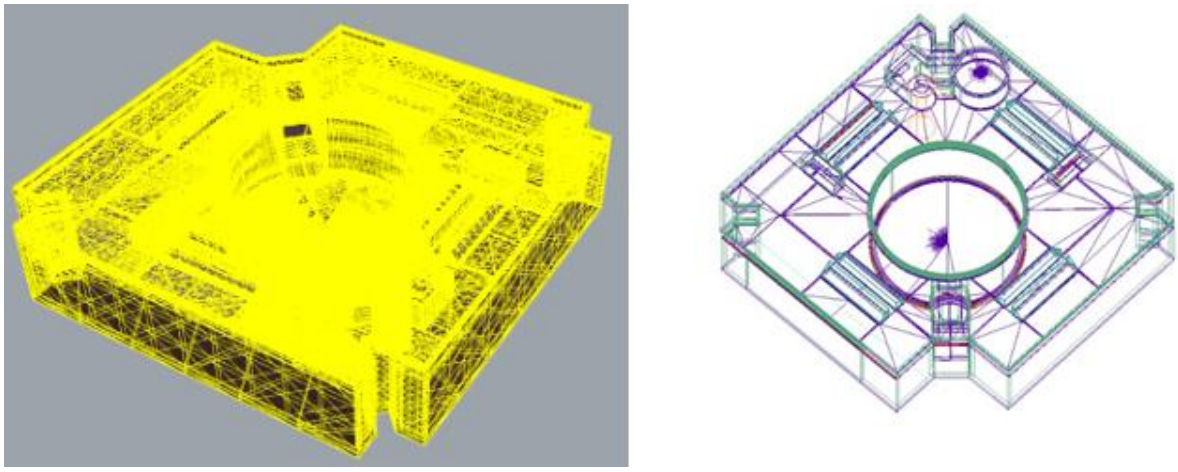


Ilustración 3.1 Geometría CAD y mallado 3D de la Rosa de los Vientos.

2.2 Depuración y verificación de la geometría

Como parte del proceso de preparación del modelo 3D para su exportación a Ansys Fluent, se llevó a cabo una depuración inicial en AutoCAD enfocada en garantizar la consistencia geométrica y la viabilidad del mallado posterior. En primer lugar, se eliminaron líneas sueltas, bloques y entidades bidimensionales, dejando exclusivamente sólidos cerrados (solid bodies), requeridos para una interpretación adecuada por parte del software de simulación.

Posteriormente, se verificó y unificó el sistema de unidades de trabajo, estableciendo como referencia metros (m) para mantener la coherencia dimensional en el entorno de Ansys. Asimismo, se procedió a simplificar la geometría mediante la eliminación de detalles irrelevantes para la dinámica del flujo, tales como pequeños orificios, anclajes, textos y elementos decorativos. Finalmente, se validó que todos los cuerpos sólidos cumplieran con la condición de ser manifold (Ilustración 3.2), es decir, sin caras abiertas ni bordes libres, garantizando su correcta interpretación como volúmenes cerrados durante el proceso de mallado y simulación.



Ilustración 3.2 Verificación topológica en SpaceClaim: detección de superficies no manifold.

Durante la revisión del modelo inicial, generado a partir del levantamiento LiDAR en Revit y posteriormente exportado a AutoCAD, se identificaron diversas inconsistencias geométricas, tales como aristas libres (edges), polígonos superpuestos y caras abiertas. Estas irregularidades comprometían la integridad del modelo para su uso en simulaciones numéricas, por lo que se procedió a realizar un ajuste geométrico inicial, orientado a corregir dichas deficiencias y garantizar la continuidad y sellado de los sólidos en la geometría de trabajo. Para garantizar la calidad geométrica del modelo previo a la generación del mallado, se realizó un proceso de verificación topológica utilizando las herramientas de SpaceClaim. Inicialmente, se aplicó el comando Repair → Check Geometry (acceso: Prepare → Repair → Check Geometry), el cual permitió identificar bordes libres, caras malformadas, pequeños huecos (gaps), solapamientos de superficies (overlapping faces) y cuerpos no sólidos (Ilustración 3.3).

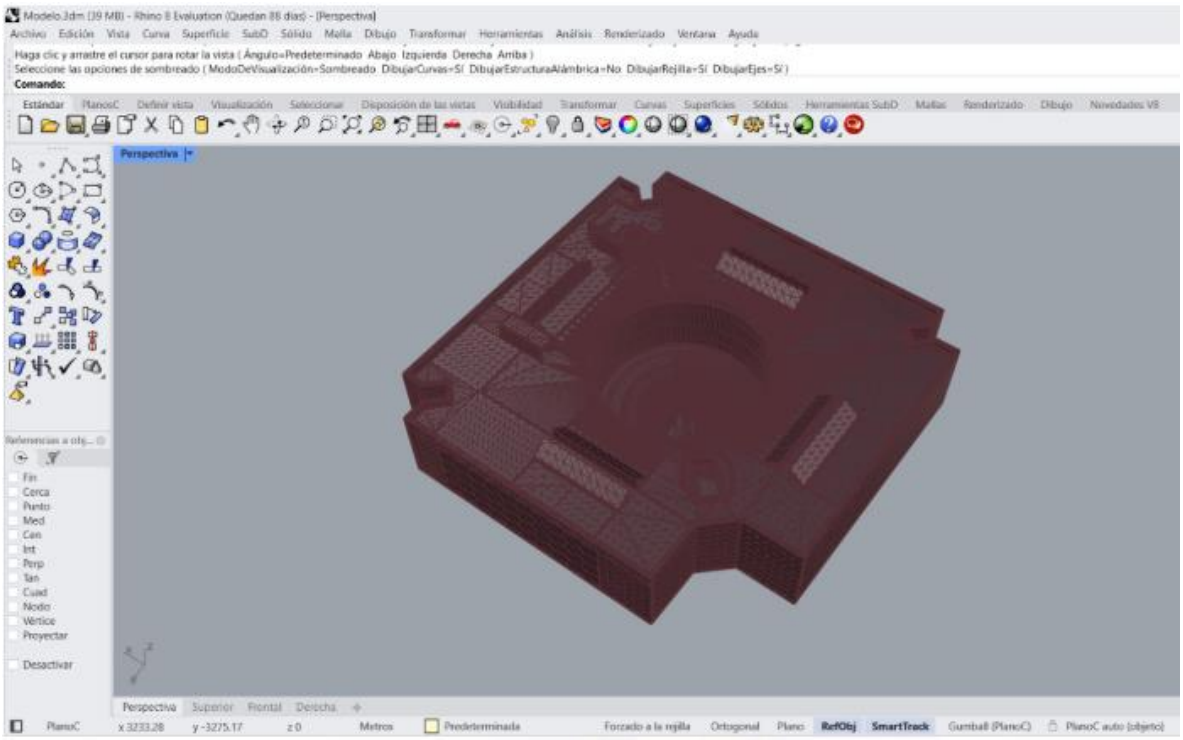


Ilustración 3.3 Check Geometry" en SpaceClaim (Rhino)

Posteriormente, se empleó el comando Repair → Stitch para unificar ("coser") automáticamente pequeños huecos entre superficies cercanas, prestando especial atención a las zonas de escurrimiento donde el levantamiento LiDAR evidenció quiebres abruptos en la superficie, asociados al estado físico actual de la estructura del Archivo General de la Nación. Para una depuración geométrica complementaria, se aplicaron los comandos Repair → Fix Gaps, Fix Faces y Simplify, permitiendo corregir bordes irregulares, reparar discontinuidades y eliminar detalles geométricos innecesarios. Finalmente, se utilizó la función Solidify para reconstruir sólidos a partir de superficies sueltas, asegurando la creación de volúmenes cerrados (watertight) compatibles con el proceso de mallado y simulación en Ansys Fluent (Ilustración 3.4).

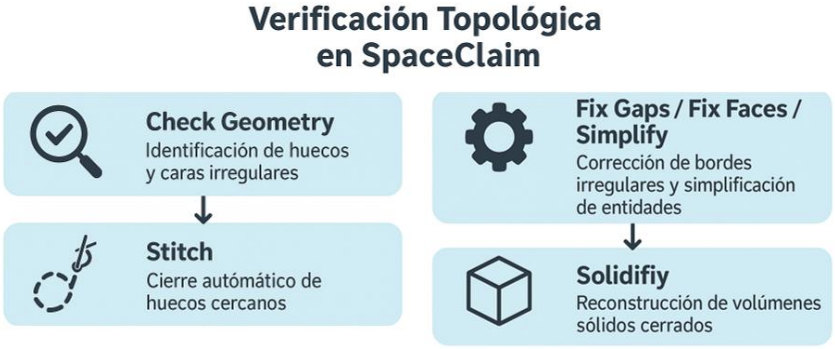


Ilustración 3.4 Diagrama de flujo para la verificación topológica en SpaceClaim

2.3 Generación de la malla Rosa de los Vientos

Una vez completada la depuración geométrica, se procedió a la generación del mallado, iniciando con una malla de baja resolución (mallado grueso) con el fin de reducir los tiempos computacionales en la fase preliminar de simulación. Para este propósito, se construyó un único volumen cerrado en caso de flujo interno, o una superficie completamente cerrada para escenarios de flujo externo. Durante este proceso, se eliminaron superficies no conectadas (non-manifold), así como aristas libres (edges), lo que permitió definir cuerpos sólidos claramente delimitados y garantizar la existencia de volúmenes consistentes, sin cavidades internas no deseadas ni discontinuidades topológicas que afectaran el cálculo numérico.

Durante el proceso de mallado en ANSYS Meshing, se presentó el mensaje de advertencia "Holes detected", lo cual impidió la correcta generación de la malla en el primer intento. Este inconveniente requirió una revisión detallada de la geometría utilizando las herramientas de diagnóstico "Repair" → "Show Gaps" y "Repair Geometry", con el fin de localizar discontinuidades. Se identificaron huecos de aproximadamente 1 mm en la región cercana a las cunetas ubicadas en el borde perimetral del patio denominado Rosa de los Vientos. Estas discontinuidades superaban la tolerancia geométrica definida (< 1 mm), comprometiendo la integridad del modelo como volumen cerrado para simulación CFD, por lo que fue necesario realizar ajustes adicionales en la topología antes de continuar con el mallado.

Tabla 3.1 Parámetros de mallado adoptados para la simulación CFD

Categoría	Parámetro	Valor
Tamaño global	Global Element Size	2 mm
Tamaño local	Face/Edge/Body Sizing	2 mm
Método de mallado	Tetrahedrons	Sweep
Inflación (capas límite)	First Layer Thickness	First Layer = Y+, Growth Rate = 1.3, 12 capas
Control de calidad	Skewness	< 0.5
Calidad - Orthogonal quality	Orthogonal quality	> 0.3

Los parámetros de mallado adoptados mostrados en la Tabla 3.1 fueron seleccionados estratégicamente para garantizar la adecuada resolución del fenómeno de escurrimiento superficial y la verificación hidráulica de capacidad en canales, cunetas y colectores, considerando las condiciones geométricas de pendiente presentes en la infraestructura. Se definió un tamaño global y local de elemento de 2 mm, permitiendo capturar con precisión los detalles geométricos relevantes sin incurrir en costos computacionales excesivos. Para abordar regiones de geometría compleja, se empleó una combinación de métodos de mallado tipo Tetrahedrons y Sweep, optimizando la calidad en zonas curvas y extruibles, respectivamente. En las zonas cercanas a las paredes y a los límites de contacto fluido-estructura, se implementó un esquema de inflación de 12 capas, con un crecimiento progresivo controlado (Growth Rate = 1.3) y un espesor inicial dependiente del número adimensional Y+, a fin de capturar con fidelidad los gradientes de velocidad cercanos a los bordes, fundamentales en la evaluación del régimen de escurrimiento.

La Ilustración 3.5 muestra el bloque 3D previamente procesado, exportado a Rhino y visualizado en la vista “Perspectiva”. El sólido, resaltado en amarillo, corresponde al volumen de la cubierta y patios internos tras la depuración topológica, en la cual se corrigieron todas las aristas inconexas (edges), caras abiertas y polígonos superpuestos. La geometría se encuentra completamente manifold, garantizando la conectividad completa entre superficies y bordes, y está lista para la generación de la malla y su posterior simulación CFD sin incidencias numéricas derivadas de defectos geométricos.

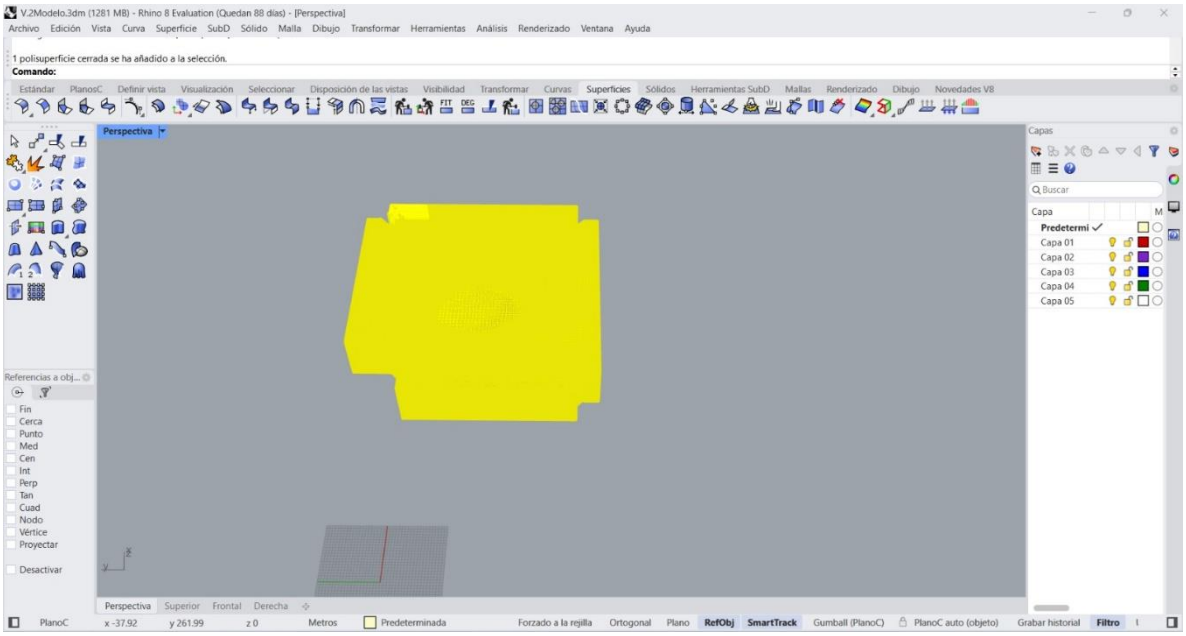


Ilustración 3.5 Visualización en Rhino del modelo 3D depurado sin errores topológicos

La metodología desarrollada para el modelo predictivo 3D se estructura en tres bloques secuenciales que integran procesos geométricos, numéricos y de simulación. El primer bloque comprende la generación del modelo geométrico en 3D CAD, seguido de la depuración topológica y verificación de continuidad para garantizar la consistencia del dominio. Posteriormente, se procede con la generación del mallado, etapa crítica que define la calidad del cálculo en las zonas clave de escurrimiento. En el segundo bloque, se establecen las condiciones de frontera y multifase, representando el ingreso del agua de lluvia, su propagación superficial y la dinámica de captación en canales y cunetas.

Para la generación del mallado del modelo geométrico, se aisló la zona correspondiente a la Rosa de los Vientos, considerando las pendientes radiales y la orientación del drenaje superficial. En la Ilustración 3.6 se observa el cono invertido que agrupa el área de escurrimiento principal, sobre el cual se dispusieron ocho puntos negros perimetrales que representan los sifones de drenaje, encargados de evacuar el agua acumulada. Esta estrategia de partición permitió refinar la malla en las trayectorias de flujo críticas y asegurar que cada región de captación, definida por la dirección de la pendiente, la cual contara con un volumen de control propio e independiente, optimizando la calidad de los elementos (skewness < 0,5 y aspecto controlado) y garantizando la correcta resolución de las condiciones de frontera en ANSYS Meshing.

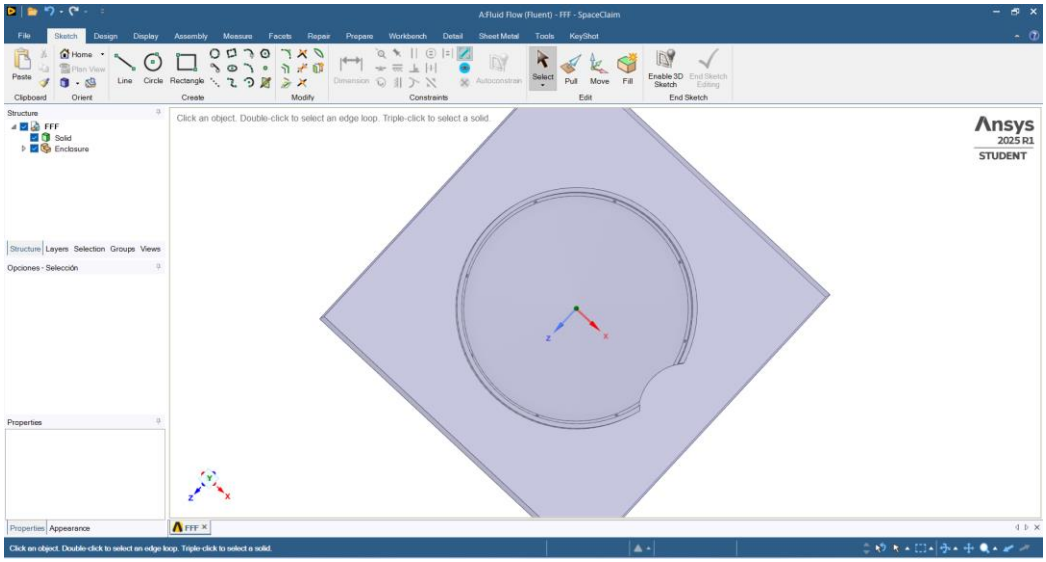


Ilustración 3.6 Vista en SpaceClaim del volumen depurado listo para mallado

La vista de ANSYS Meshing presentada en la Ilustración 3.7, muestra un dominio cúbico con un mallado de tetraedros no estructurados, donde el cono invertido de la Rosa de los Vientos aparece claramente refinado para capturar la geometría circular y las pendientes radiales. Se ha utilizado el método “Standard” de generación automática, con un tamaño global de elemento que garantiza un compromiso entre precisión y tiempos de cálculo, y un refinamiento local en la región de escurrimiento crítico.

En la sección de detalles del mallado destaca el uso de la preferencia CFD / Fluent, lo que implica un control de calidad orientado a skewness bajo 0.5 y orthogonal quality superior a 0.3, asegura la estabilidad numérica en la simulación. La densidad de la malla en torno al cono invertido, en la cual las líneas de flujo convergen hacia los ocho sifones, está suficientemente fina para resolver gradientes de velocidad y presión. No se aprecian elementos non-manifold ni discontinuidades topológicas, lo cual valida la consistencia del volumen antes de la exportación a Fluent. En conjunto, esta configuración de mallado es adecuada para reproducir una aproximación al escurrimiento superficial y la interacción aire-agua en la zona central del patio.

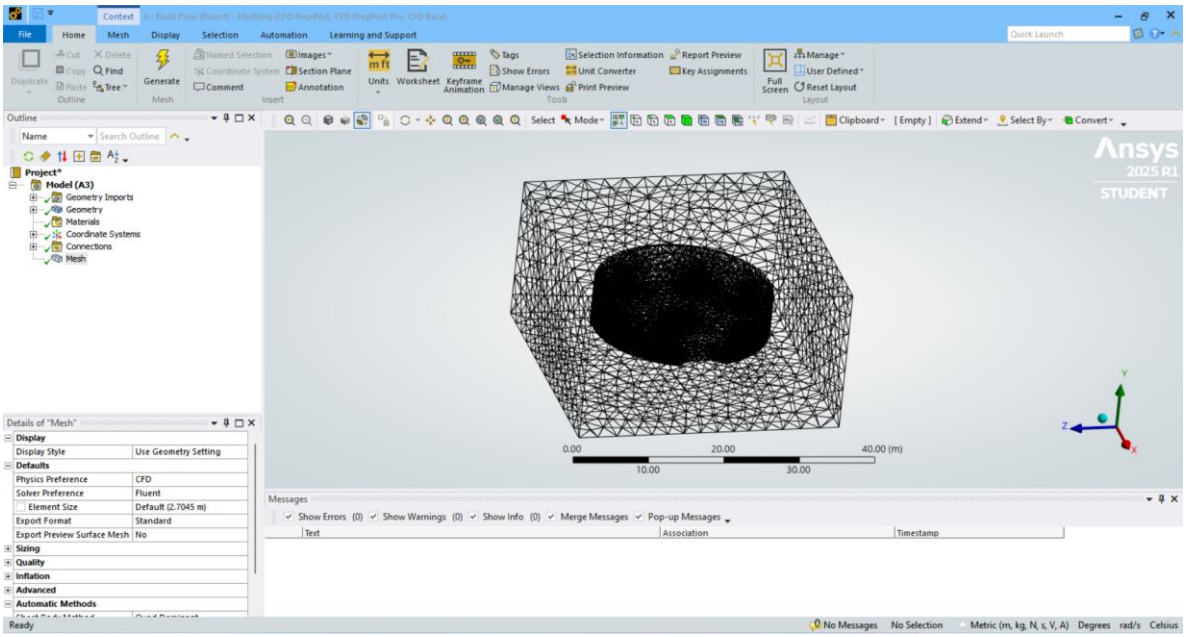


Ilustración 3.7 Mallado no estructurado en ANSYS Meshing con refinamiento local en la Rosa de los Vientos

Estas condiciones se complementan con un proceso de discretización, asegurando estabilidad y precisión numérica en el análisis transitorio. Finalmente, el tercer bloque introduce el enfoque Lagrangiano, que permite rastrear partículas y evaluar trayectorias individuales, seguido del postprocesamiento, donde se visualizan trayectorias de escurrimiento, acumulaciones y caudales evacuados.

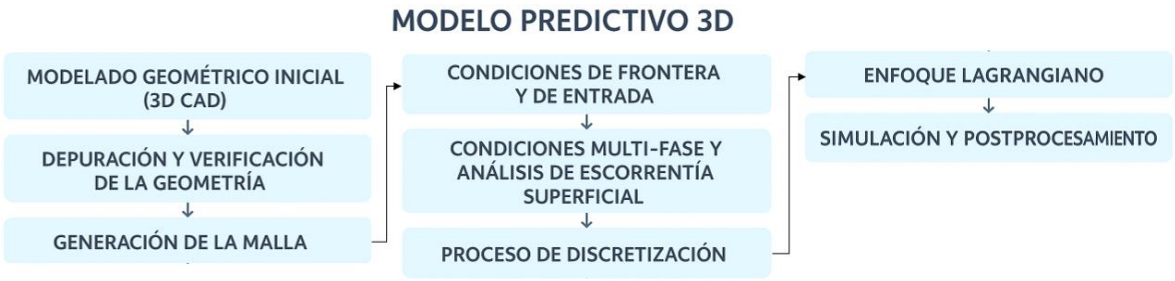


Ilustración 3.8 Esquema metodológico del Modelo Predictivo 3D

El levantamiento geométrico *in situ* de la cubierta norte arrojó un área efectiva de captación de 578,82 m², constituida por losas de concreto reforzado con una pendiente uniforme del 1 % para asegurar el escurrimiento hacia los canales principales. Estos canales, igualmente construidos en concreto, mantienen la misma pendiente del 1 % y se dimensionan según la longitud de cada tramo drenante. Las cunetas perimetrales, integradas directamente al sistema de escurrimiento de la cubierta, presentan pendientes mínimas iguales o superiores al 1 % y también están revestidas de concreto para resistir la abrasión del flujo. El patio circular “Rosa de los Vientos”, cuyos adoquines forman un patrón de anillos concéntricos, exhibe pendientes variables entre 0,50 % y 2,00 %, generando el drenaje radial hacia las bocas de captura. Para el pretratamiento, el sedimentador, de 2,4 m² de superficie de fondo, y el tanque de almacenamiento, con 4 m² de base, se proyectaron en concreto armado; en ambos casos, la pendiente interna no aplica (N/A) pues operan como volúmenes de retención de agua. Estos parámetros garantizan condiciones topográficas y estructurales adecuadas para la simulación CFD y el correcto diseño hidráulico del sistema de drenaje.

Tabla 3.2 Parámetros geométricos de la estructura física

Parámetros geométricos			
Elemento	Área (m²)	Pendiente (%)	Material dominante
Cubierta Norte	578.82	1	Concreto reforzado
Canales principales	Variable según tramo	1	Concreto
Cunetas perimetrales	Incorporadas en escurrimiento	≥ 1.00	Concreto
Zona Rosa de los Vientos	Incluida en cubierta	0.50-2.00	Piso de adoquín
Tanque de almacenamiento	4	N/A	Concreto armado
Sedimentador	2.4	N/A	Concreto armado

Para la configuración del solver y definición de la gravedad en la simulación de la Rosa de los Vientos se llevó a cabo con un solver pressure-based en modo transitorio, lo que permite resolver de forma estable las variaciones temporales del frente de escorrentía. Se activó el modelo multifase VOF (Volume of Fluid) para capturar con máxima fidelidad la interfaz aire-agua, esencial en un fenómeno de superficie libre. La gravedad se orientó en sentido negativo del eje Z (–9.81 m/s²), reproduciendo correctamente el flujo descendente radial que siguen las láminas de agua sobre la superficie inclinada del patio.

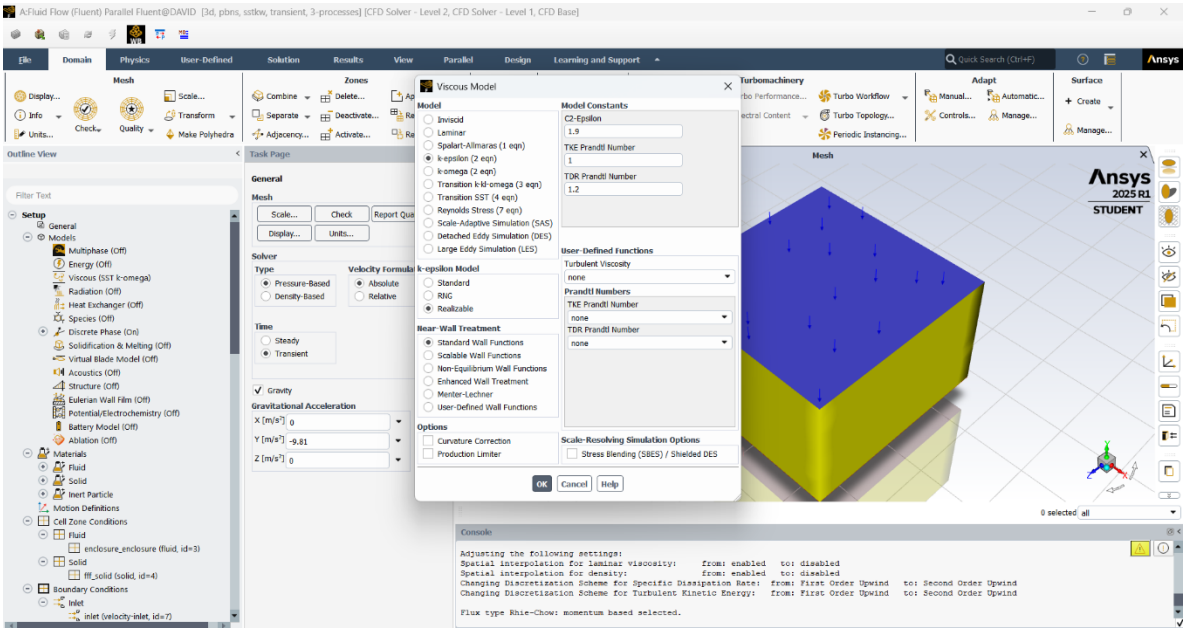


Ilustración 3.9 Configuración del modelo viscoso en ANSYS Fluent (k-ω SST)

La Ilustración 3.9, presenta el modelo seleccionado para la viscosidad, el cual corresponde al modelo k-ω SST (Shear Stress Transport), óptimo para flujos con gradientes de velocidad pronunciados y recirculaciones locales. Las constantes de producción y disipación se mantuvieron en sus valores por defecto, lo que garantiza un equilibrio entre sensibilidad cerca de las paredes (región k-ω) y robustez en el dominio exterior (comportamiento k-ε). Esta configuración maximiza la resolución de la capa límite adyacente a las superficies de adoquín y concreto, sin comprometer la estabilidad numérica en las transiciones turbulentas.

En términos de control de la calidad de mallado e interacción aire-superficie, para establecer la captura de la dinámica multidireccional del escurrimiento, se verificó el aspect ratio de las celdas infladas, manteniendo un crecimiento progresivo constante entre capas (sin cambios abruptos) y garantizando skewness < 0.5. Se detectaron irregularidades puntuales en la Rosa de los Vientos, asociadas a cambios bruscos de pendiente, que se mitigaron mediante la generalización de la pendiente en esa región para preservar la consistencia topológica. Finalmente, se validó que el mallado resolviera adecuadamente la zona de interacción aire-superficie, condición crítica para la fidelidad del modelo VOF en simulaciones de escorrentía superficial.

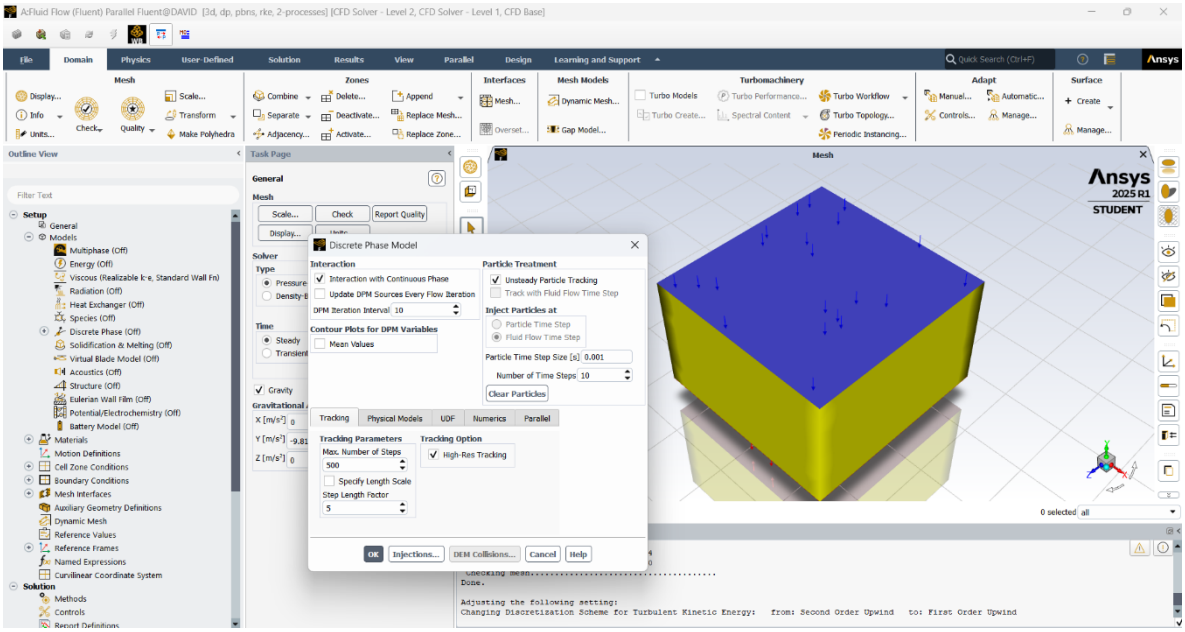


Ilustración 3.10 Configuración del Discrete Phase Model (DPM) en ANSYS Fluent

En la configuración del Discrete Phase Model (DPM) mostrada en la Ilustración 3.10, se habilitó el seguimiento unsteady de partículas representativas de gotas de lluvia, integrando la fase discreta con la continua del VOF. En la solapa “Injection” se definió una inyección de flujo de gotas distribuidas uniformemente sobre la cara superior (inlet de lluvia), con un tamaño de partícula acorde al espectro de lluvia local y densidad de agua.

El paso de tiempo de inyección se fijó en cada 0.1·Δt de la simulación, con 10 pasos de integración por inyección, garantizando una resolución temporal suficiente para capturar la trayectoria de las partículas en el flujo transitorio. Se activó el modelo de Interacción partícula-fluido (Two-Way Coupling), de modo que las partículas puedan transferir momento y masa a la fase continua cuando correspondiera. De igual forma, para el apartado "Tracking" se seleccionó la opción High-Res Tracking, optimizada para flujos multifásicos con fuertes gradientes de velocidad, lo que reduce la dispersión numérica de las trayectorias. Para la estimación de fuerzas, se empleó el modelo de arrastre estándar de ANSYS Fluent, junto con la tensión superficial previamente definida en el VOF, permitiendo evaluar fenómenos como coalescencia y fragmentación en las proximidades de la interfaz aire-agua. Finalmente, en "Scale-Resolving Simulation Options" se marcó la casilla Enable DPM with Continuous Phase, asegurando la sincronización con los esquemas de discretización Second Order Upwind y PISO. Este enfoque integral del DPM permite caracterizar con detalle el transporte y deposición de gotas sobre la superficie inclinada de la Rosa de los Vientos, aportando datos de trayectoria y puntos de impacto indispensables para el análisis de eficiencia de los sifones de drenaje.

2.4 Condiciones de frontera y de entrada

El caudal de diseño adoptado para la simulación hidrodinámica en ANSYS Fluent es de 16.70 L/s, correspondiente al flujo máximo generado por las áreas de captación durante un evento de lluvia crítico. Esta magnitud se obtuvo a partir de una intensidad de precipitación de 103.77 mm/h, calculada con la curva IDF para un período de retorno de 10 años y un tiempo de concentración de 10 minutos, según RAS y NTC 1500, sobre un área aportante acumulada de 578.82 m². Este caudal sirvió para validar el dimensionamiento hidráulico de los colectores pluviales, estimar el volumen de almacenamiento necesario (10 m³) en el tanque del sótano norte y dimensionar el régimen de bombeo, el sedimentador y la caja disipadora de energía.

En Fluent, la cara superior del dominio se configuró como Mass-Flow Inlet, inyectando 16.7 kg/s de gotas de 2 mm de diámetro (densidad 1 000 kg/m³) con velocidad inicial de 6 m/s, repartidas uniformemente y con turbulencia del 5–10 %, para reproducir la lluvia intensa.

La inyección se activó desde t = 0 s hasta t = 15 s, con 10 sub-pasos de disparo, garantizando un muestreo temporal fino y permitiendo la transferencia bidireccional de momento (Two-Way Coupling) entre las gotas y la fase continua VOF. Cada gota se rastrea mediante el Discrete Phase Model (DPM) con High-Res Tracking y el método estándar de arrastre, integrándose al solver Second Order Upwind y PISO para minimizar la difusión numérica en la interfaz aire-agua. En el extremo opuesto, los ocho sifones perimetrales se definieron como Pressure-Outlet, evacuando el agua acumulada, mientras que las paredes de cubierta, canales y cunetas se establecieron como Wall. No Slip para reflejar la rugosidad del concreto. Esta combinación de condiciones de frontera, inlet de lluvia, outlets en colectores y paredes no-deslizantes, junto con la inyección de gotas y el mallado refinado en la Rosa de los Vientos, asegura la fidelidad en la reproducción de los gradientes de velocidad, las trayectorias de escurrimiento y la formación de la capa límite, permitiendo evaluar con precisión la capacidad hidráulica y los puntos críticos de acumulación en todo el sistema de drenaje. En la sección de “Set Injection Properties” se configuró la simulación de la lluvia como sigue:

- Superficie de inyección: se seleccionó la cara superior del dominio (patch “top”), que representa la cubierta expuesta a la precipitación.
- Tipo de inyección: Mass-Flow Inlet, con un caudal total de 16.7 kg/s, equivalente al caudal de diseño de 16.70 L/s de agua, distribuido uniformemente sobre toda el área de captación.
- Propiedades de las gotas: diámetro uniforme de 2 mm, densidad de 1 000 kg/m³ (agua pura) y velocidad inicial normal a la superficie de 6 m/s, valores que reproducen las características dinámicas de una tormenta intensa.
- Temporalización: la inyección se activó desde t = 0 s hasta t = 15 s, con 10 sub-pasos de disparo entre el inicio y el fin del evento, asegurando un muestreo temporal fino del transporte de gotas.
- Reinyección y acoplamiento: se activó la Two-Way Coupling, de modo que las gotas intercambian momento con la fase continua, y se habilitó la reinyección de partículas tras impacto para modelar correctamente la formación de láminas de agua o “film” en la superficie.

Con esta configuración, Fluent reproduce con detalle el impacto de las gotas, su transporte y transferencia de momento al flujo continuo, esencial para predecir la distribución del agua de lluvia y el rendimiento de los sifones de drenaje en la Rosa de los Vientos.

Tabla 3.3 Condiciones de frontera para la simulación de la Rosa de los Vientos

Condiciones de frontera	
Condición de frontera - Inlet	Lluvia
Tipo de Inlet	Lluvia (Q=16.70 L/s)
Perfil de Inlet	IDF Bogotá: 103.77 mm/h para T=10 años
Turbulence intensity	5%
Condición de frontera - Outlet	Canales - colectores
Tipo de Outlet	Caudal
Condición de frontera - Paredes	Cubierta, canales, cunetas
Tipo de Paredes	Wall – No slip (Muro, el fluido no se desliza)
Material de Paredes	Concreto

2.5 Configuración en fluent

Para el desarrollo del modelo predictivo del comportamiento hidrodinámico en las estructuras de drenaje del edificio del Archivo General de la Nación, se proponen las siguientes características físicas que definen el comportamiento del flujo sobre superficie libre. Estas especificaciones permiten simular con precisión el fenómeno de escurrimiento superficial considerando la interacción agua-aire, la geometría real de las cubiertas, canales, cunetas y demás elementos de captación, así como las condiciones de pendiente presentes en la infraestructura. Así, se estableció una configuración numérica orientada a reproducir con precisión los fenómenos asociados al escurrimiento superficial bajo condiciones reales de lluvia (Tabla. 3.2). Se definió una simulación transitoria (unsteady) con el objetivo de capturar la evolución temporal del flujo sobre las cubiertas, canales y cunetas del edificio, permitiendo identificar acumulaciones, tiempos de concentración y respuesta hidráulica de los sistemas de drenaje. Se seleccionó un solver tipo Pressure-Based, adecuado para flujos incompresibles con superficie libre, lo cual se ajusta a las condiciones propias del escurrimiento urbano.

2.6 Condiciones Multi-Fase y análisis de escorrentía superficial

Esta metodología permite capturar con alta precisión la interfaz aire-agua, fundamental en simulaciones de escurrimiento libre donde se presentan fenómenos transitorios de acumulación, desplazamiento y caída del agua en canales y sistemas de captación. De igual forma, se definió un sistema de dos fases (aire y agua) con seguimiento implícito del frente de interfaz, lo cual mejora la estabilidad numérica en simulaciones transitorias. Para una adecuada reconstrucción de la interfaz, se utilizó el método Geo-Reconstruct, recomendado en ANSYS Fluent para representar la forma de la superficie libre. Asimismo, se activó la tensión superficial, ya que se consideró relevante su influencia en zonas de transición entre pendiente y captación, especialmente bajo intensidades de lluvia media-alta, para la zona de estudio (Latitud: 4.5939004, Longitud: -74.0795328). Para el tratamiento de la interacción pared-líquido, se estableció una condición de contacto con ángulo de adhesión (wall adhesion angle) ajustado para superficies de concreto, con el fin de reflejar adecuadamente el comportamiento de humectación y escurrimiento en las cubiertas y canales del edificio.

Tabla 3.4 Configuración del modelo multifase VOF para la simulación

Modelo multifase	
Modelo multifase	VOF (Volume of Fluid)
Número de fases	2 (aire - agua)
Método de discretización	Geo-Reconstruct
Tracking	Implícito
Superficie de tensión	Activado (se evalúa interfase)
Interacción pared-líquido	Wall (ángulo de adhesión para concreto)

En consecuencia, el método de reconstrucción de interfaz Geo-Reconstruct fue seleccionado por su alta precisión en la representación de la superficie libre entre fases (agua-aire). Este método geométrico permite definir de manera más exacta la ubicación y forma de la interfaz, evitando difusiones numéricas que son comunes en otros esquemas menos robustos como el "First Order Upwind".

La aplicación de Geo-Reconstruct es especialmente importante en dominios donde se espera una dinámica activa de la interfase, como en zonas con pendientes variables, captación superficial, canales con saltos hidráulicos locales o cambios abruptos de geometría. Al preservar la separación entre fases, este método mejora la estabilidad del cálculo transitorio y permite una mejor predicción del volumen de agua acumulado, las velocidades locales y las zonas de contacto fluido-estructura. Proceso de discretización En la configuración del modelo multifase para la simulación del escurrimiento superficial sobre la estructura del Archivo General, se definieron dos fases dentro del enfoque VOF (Volume of Fluid) (Tabla 3.4). La Fase 1 (aire) fue asignada a todo el dominio inicial, representando el estado previo al evento de precipitación y permitiendo una evolución natural del flujo al momento de la entrada del agua. Por su parte, la Fase 2 (agua) fue configurada para ingresar exclusivamente a través del inlet de lluvia, lo que refleja el inicio y desarrollo del escurrimiento superficial como consecuencia directa de un evento pluvial. Esta asignación de condiciones iniciales permite observar con precisión el avance del frente de agua sobre la superficie sólida, analizar los tiempos de respuesta del sistema de drenaje y evaluar zonas de acumulación, velocidad superficial y eficiencia de captación en condiciones de lluvia intensa (Tabla 3.5).

Tabla 3.5 Asignación de condiciones iniciales para cada fase

Fases	
Condición Inicial - Fase 1	Fase 1 (aire): todo el dominio inicial
Condición Inicial - Fase 2	Fase 2 (agua): se introduce a través del inlet de lluvia

2.7 Proceso de discretización

Por lo anterior, la gravedad se activó con dirección en el eje Z negativa, reproduciendo el efecto del peso del agua en su trayectoria descendente por superficies inclinadas. Adicionalmente, se definió un dominio tridimensional (3D) para representar con fidelidad la geometría arquitectónica y topográfica del edificio, lo cual resulta fundamental para evaluar el comportamiento del flujo en zonas de captación, quiebres estructurales y pendientes variables. Esta configuración inicial constituye la base para la implementación de modelos multifásicos y de interacción fluido-estructura en fases posteriores del análisis.

Tabla 3.6 Configuración numérica del modelo en ANSYS Fluent

Configuración	
Tipo de simulación	Simulación transitoria
Solver	Pressure-Based
Tiempo	Transitorio (Unsteady)
Gravedad	Activada (Z negativa)
Dominio	3D

Para el modelado del escurrimiento superficial sobre las cubiertas y sistemas de drenaje del edificio, se adoptó un modelo de turbulencia k-ω SST (Shear Stress Transport) (Tabla. 3.6), debido a su capacidad de ofrecer una representación robusta y precisa en flujos con gradientes de velocidad pronunciados, presencia de zonas de recirculación y transiciones entre capas límite laminar y turbulenta, condiciones típicas en pendientes, como en el caso de la zona de la rosa de los vientos. El modelo k-ω SST combina las ventajas del modelo k-ω en la proximidad de las paredes (mayor sensibilidad al comportamiento de la capa límite) con la robustez del modelo k-ε en la región alejada de la superficie, permitiendo así una mejor predicción del transporte de esfuerzos cortantes y de la dinámica del flujo en geometrías complejas. Esta selección es especialmente pertinente para capturar los efectos del escurrimiento sobre superficies inclinadas, quiebres arquitectónicos y estructuras de captación con condiciones transitorias.

Tabla 3.7 Modelo de turbulencia

Tipo de flujo	
Modelo de flujo	Turbulento (k-ω SST)

En la configuración del modelo multifase (Tabla. 3.5), con el objetivo de representar el comportamiento del flujo superficial sobre las cubiertas y canales del edificio del Archivo General de la Nación, se implementó un enfoque multifase utilizando el modelo VOF. Para garantizar la precisión en la simulación del escurrimiento superficial sobre las superficies inclinadas y drenajes del Archivo General de la Nación, se adoptó el esquema de discretización Second Order Upwind para las ecuaciones de momentum, turbulencia y el modelo VOF.

Este enfoque permite una mayor aproximación en la representación de los gradientes de velocidad y de la interfaz aire-agua, reduciendo la difusión numérica asociada a métodos de primer orden. El acoplamiento entre presión y velocidad se manejó mediante el algoritmo PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators), el cual es especialmente adecuado para simulaciones transitorias con dominio multifase y condiciones variables en el tiempo, como es el caso del flujo generado por eventos de lluvia. Debido al carácter transitorio del fenómeno de escurrimiento superficial, se implementó un esquema de Time Stepping adaptativo, con un paso de tiempo inicial (Δt) comprendido entre 0.001 y 0.01 s, ajustado dinámicamente en función de la evolución del frente de escurrimiento. En el panel Solution Methods se empleó un esquema de Pressure-Velocity Coupling “Coupled”, que resuelve simultáneamente las ecuaciones de presión y velocidad para mejorar la estabilidad en flujos multifásicos transitorios. La discretización espacial mostrada en la Ilustración 3.11 se utilizó Least Squares Cell Based para el cálculo de gradientes, y el método PRESTO! (Pressure Staggering Option) para la interpolación de presión en las caras de los volúmenes de control, optimizando la captura de gradientes en geometrías curvadas. Los términos convectivos de momentum, VOF y turbulencia (k y ω) se resolvieron con Second Order Upwind, mientras que la ecuación de turbulent kinetic energy utiliza el modelo Standard k-ε y la de specific dissipation rate también se discretiza con Second Order Upwind, garantizando alta precisión en la predicción de esfuerzos cortantes y dinámica de la interfase aire-agua.

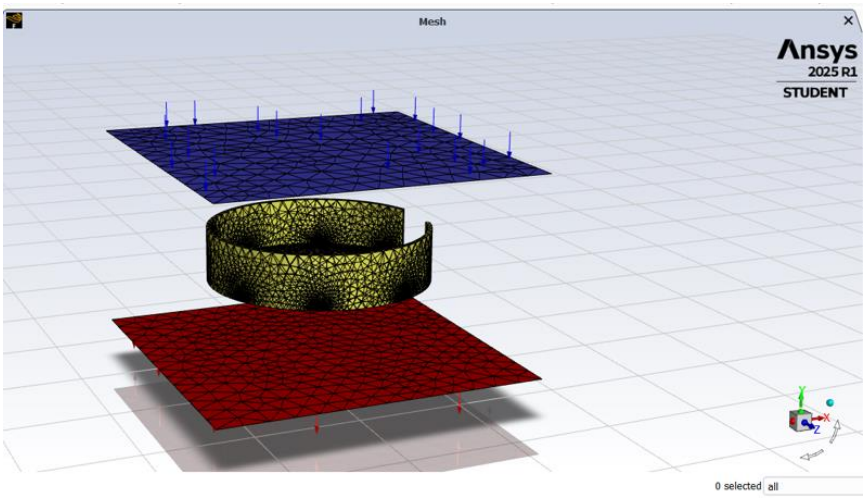


Ilustración 3.11 Vissta de los niveles de refinamiento del mallado en ANSYS Meshing.

Para garantizar la estabilidad numérica y la precisión en la simulación transitoria de la Rosa de los Vientos, se adoptó un esquema de discretización Second Order Upwind en los términos convectivos de momentum, turbulencia y VOF, junto con el acoplamiento presión-velocidad PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators). El Time Stepping adaptativo permite ajustar dinámicamente el paso de tiempo, partiendo de un Δt inicial entre 0.001 y 0.01 s, escogido para capturar con detalle la rápida evolución del frente de escorrentía sin sacrificar el rendimiento computacional. Además, se impuso un Courant Number < 1, condición clave en simulaciones de superficie libre que asegura que las ondas de información física no crucen más de una celda por paso de tiempo, evitando la aparición de inestabilidades y errores de propagación. Los criterios de convergencia se establecieron en un residual de continuidad $< 1\times10^{-3}$ y residuals de momentum, VOF y turbulencia $< 1\times10^{-4}$ (Tabla. 3.8), mientras que el monitoreo continuo del flujo saliente y del volumen acumulado aporta un control adicional sobre la calidad de los resultados.

Tabla 3.8 Discretización

Proceso de discretización	
Discretización - Momentum, Turbulencia, VOF	Second Order Upwind
Discretización - Acoplamiento presión-velocidad	PISO (Transitorio)
Time Stepping - Tipo	Adaptive
Time Stepping - Δt inicial	0.001 – 0.01 s
Time Stepping - Courant Number	< 1
Convergencia - Residual Continuity	< 1e-3
Convergencia - Residuales Momentum, VOF, Turbulence	< 1e-4
Convergencia - Monitoreo	Flujo saliente, volumen acumulado

Así, en ANSYS Fluent, el esquema Second Order Upwind discretiza los términos convectivos de cada ecuación transportada (momentum, turbulencia y VOF) siguiendo la formulación general del método de volúmenes finitos:

$$\nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \tag{1}$$

Donde ϕ es la variable transportada, ρ la densidad, u el vector velocidad, Γ la difusividad y S_ϕ la fuente. Para cada cara f del volumen de control se calcula el valor de la variable ϕf a partir del nodo “upwind” U y del vecino inmediato D:

$$\phi_f = \phi_U + (\nabla\phi)U \cdot (x_f - x_U) \tag{2}$$

ϕ_U es el valor de la celda que alimenta la cara según el sentido del flujo, $(\nabla\phi)U$ es el gradiente de ϕ evaluado en esa celda, x_f y x_U son las posiciones del centro de la cara y de la celda upwind. El término convectivo $\nabla\cdot(\rho uu)$ se discretiza componente a componente con la fórmula anterior, asegurando $O(\Delta x^2)$ de precisión espacial. De igual forma los términos convectivos de k y ω siguen la misma discretización Second Order Upwind. Adicionalmente, los términos de producción y disipación se tratan como fuentes Sk, $S\omega$. Por lo tanto, la ecuación de fracción de volumen α, está dada por:

$$\frac{\partial\alpha}{\partial t} = \nabla \cdot (\phi_U) = 0 \tag{3}$$

La resolución de la parte convectiva de la ecuación de fracción de volumen se realiza mediante el esquema Second Order Upwind, lo que permite conservar de forma más nítida la interfaz aire-agua, al reducir considerablemente la difusión numérica que introducen los métodos de primer orden. Por lo tanto, al resolver estos sistemas de ecuaciones diferenciales es posible la captura de gradientes de velocidad y la localización de la superficie libre, fundamental para simular el escurrimiento superficial sobre las cubiertas inclinadas y los sistemas de drenaje de la estructura en estudio.Estos esquemas permiten capturar con mayor detalle el comportamiento del flujo durante la fase inicial del evento pluvial, evitando errores de integración en zonas donde se presentan cambios bruscos de velocidad o acumulación localizada. Para garantizar la estabilidad del cálculo, se controló estrictamente el número de Courant, manteniéndolo por debajo de 1 en todo el dominio. Este valor es esencial en simulaciones con superficie libre, ya que asegura que la información física no se propague más allá de una celda por paso de tiempo.

2.8 Enfoque Lagrangiano

En el desarrollo del modelo predictivo para el análisis del escurrimiento superficial y el comportamiento hidrodinámico de las estructuras de drenaje del edificio del Archivo General de la Nación, se implementó un enfoque Lagrangiano. Este enfoque permite rastrear individualmente partículas fluidas dentro del dominio, facilitando la evaluación de la trayectoria del agua de lluvia sobre superficies inclinadas, el tiempo de tránsito en canales, y los puntos de impacto o concentración dentro de las zonas de captación.

El enfoque Lagrangiano resulta especialmente útil en este contexto para simular procesos de transporte, acumulación localizada y tiempos de residencia del flujo. Al representar el movimiento de masas discretas de fluido, el modelo mejora la interpretación espacial del escurrimiento en superficies complejas como la Rosa de los Vientos, caracterizada por pendientes variables, quiebres topográficos y geometría circular, optimizando así el diseño de soluciones de captación y evacuación.

2.9 Simulación y postprocesamiento

La simulación se inició definiendo la cara superior como Mass-Flow Inlet con un caudal de masa de 16.7 kg/s (equivalente a 16.70 L/s), dirección normal al plano de inyección y presión de referencia cero. Para modelar la turbulencia inherente al impacto de la lluvia, se empleó el método “Intensity and Viscosity Ratio”, asignando una intensidad turbulenta del 5 % y una relación de viscosidad turbulenta de 10, valores característicos de flujos atmosféricos no confinados. El solver se ejecutó en modo transitorio, con Time Stepping adaptativo (Δt inicial de 0.001–0.01 s) y el acoplamiento PISO, garantizando una resolución fiel de la evolución temporal del frente de agua y de la formación de películas superficiales.

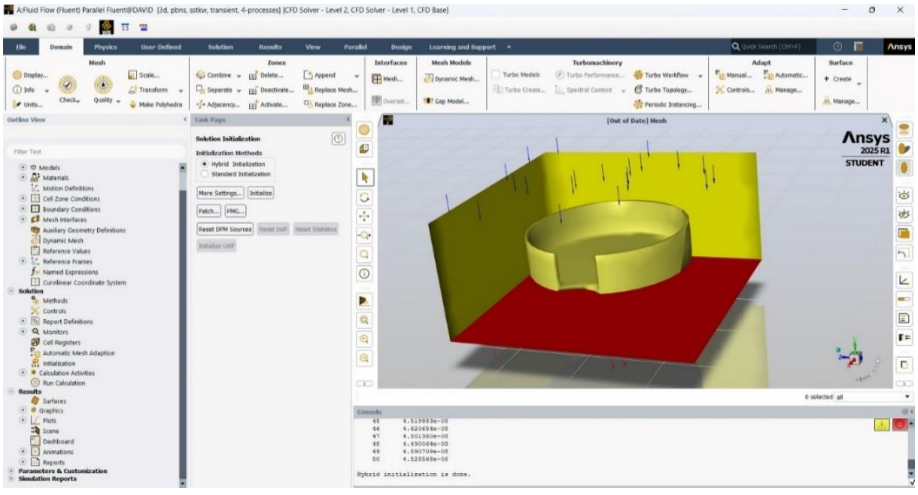


Ilustración 3.12 Configuración de la inicialización híbrida en ANSYS Fluent

Durante el postprocesamiento, se monitorizaron de forma continua los residuales (continuity $< 1\times10^{-3}$, momentum/turbulence/VOF $< 1\times10^{-4}$) y se recogieron sondenos virtuales para registrar el caudal evacuado en cada sifón y el volumen acumulado en la cavidad central. Se generaron cortes seccionales del campo de velocidad y presión, así como trayectorias de partículas y mapas de fracción de volumen, para evaluar la distribución del escurrimiento y la eficiencia de drenaje. Finalmente, se produjeron animaciones transitorias que muestran la progresión del escurrimiento radial y la interacción aire-agua, permitiendo validar gráficamente el comportamiento bajo condiciones de diseño (Ilustración 3.12).

2.9.1 Inicialización, ramp-up de condiciones de lluvia

La secuencia mostrada en la Ilustración 3.13, exhibe la evolución temporal del frente de escorrentía en la Rosa de los Vientos, visualizada mediante un mapa de fracción de volumen VOF (colores rojo para agua, azul para aire) y vectores de velocidad. En los primeros instantes (fila superior), se aprecia la formación inicial de la lámina de agua en la cara superior y su caída vertical hacia el cono invertido. En la segunda fila, la película líquida comienza a expandirse radialmente, con mayores intensidades de flujo (zonas rojas) que convergen hacia los sifones.

Finalmente, en la tercera fila, el escurrimiento alcanza un régimen casi estacionario: la capa de agua se estabiliza sobre la superficie inclinada y las trayectorias de las partículas (puntos negros) delinean claramente las rutas de evacuación hacia los ocho puntos de drenaje. Esta simulación transitoria ilustra cómo la combinación del modelo VOF y el enfoque Lagrangiano permite capturar con fidelidad tanto la distribución de la interfase aire-agua como las trayectorias de flujo que determinan la eficiencia del sistema de drenaje. En la ventana de “Surface Plane” se definieron planos de muestreo ortogonales a la dirección de flujo en cada uno de los ocho sifones perimetrales, utilizando el método de “Three Points” para ubicar con precisión la superficie de control en la proximidad inmediata al canal de descarga. Cada plano se creó mediante tres coordenadas (X, Y, Z) tomadas directamente en el mallado refinado alrededor de la boca del sifón, garantizando que la superficie cuadre perfectamente con la malla triangular de tetraedros.

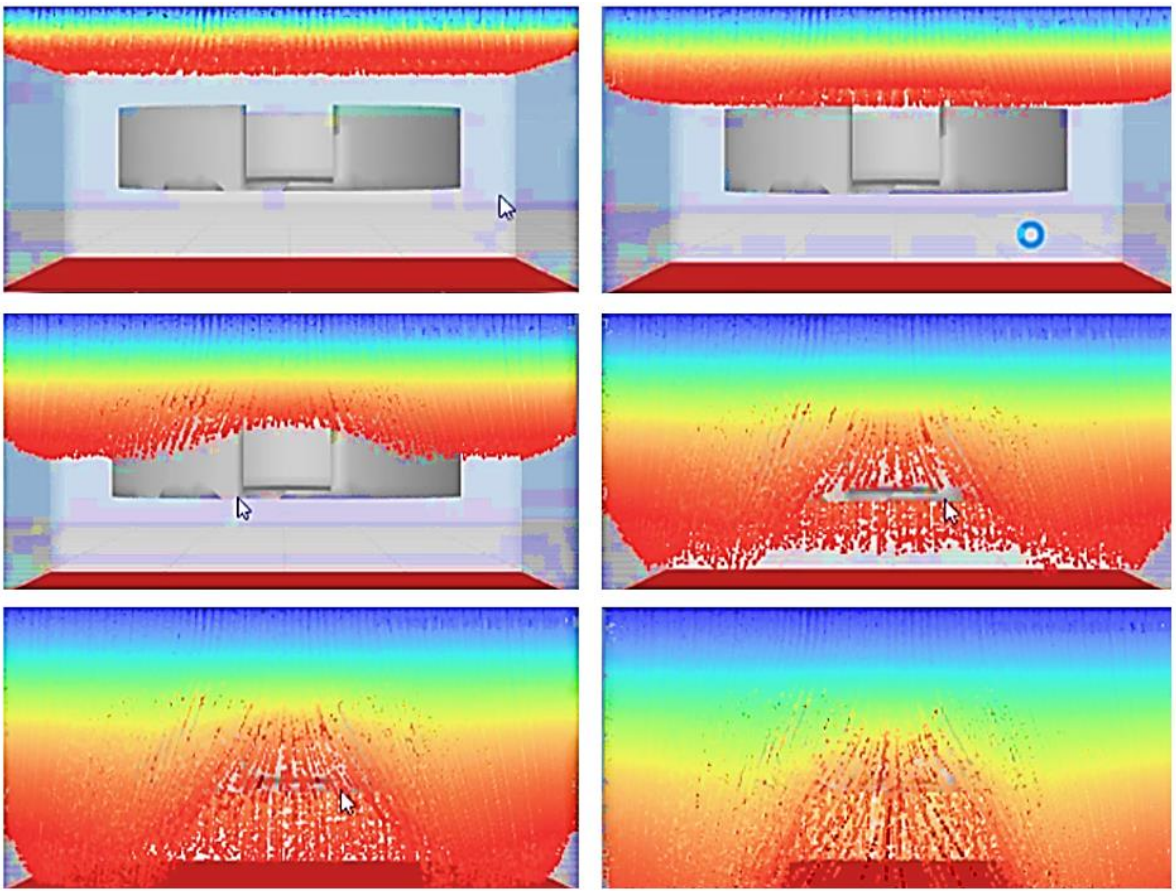


Ilustración 3.13 Evolución temporal del frente de escorrentía VOF en la Rosa de los Vientos

Estas superficies actúan como zonas de reporte en Fluent, permitiendo extraer de forma directa y continua el caudal instantáneo y las distribuciones de presión y velocidad justo antes de la evacuación. La densidad de puntos de muestreo se ajustó para capturar los gradientes resultantes de la convergencia radial del flujo, asegurando una resolución suficiente sin penalizar el rendimiento computacional.

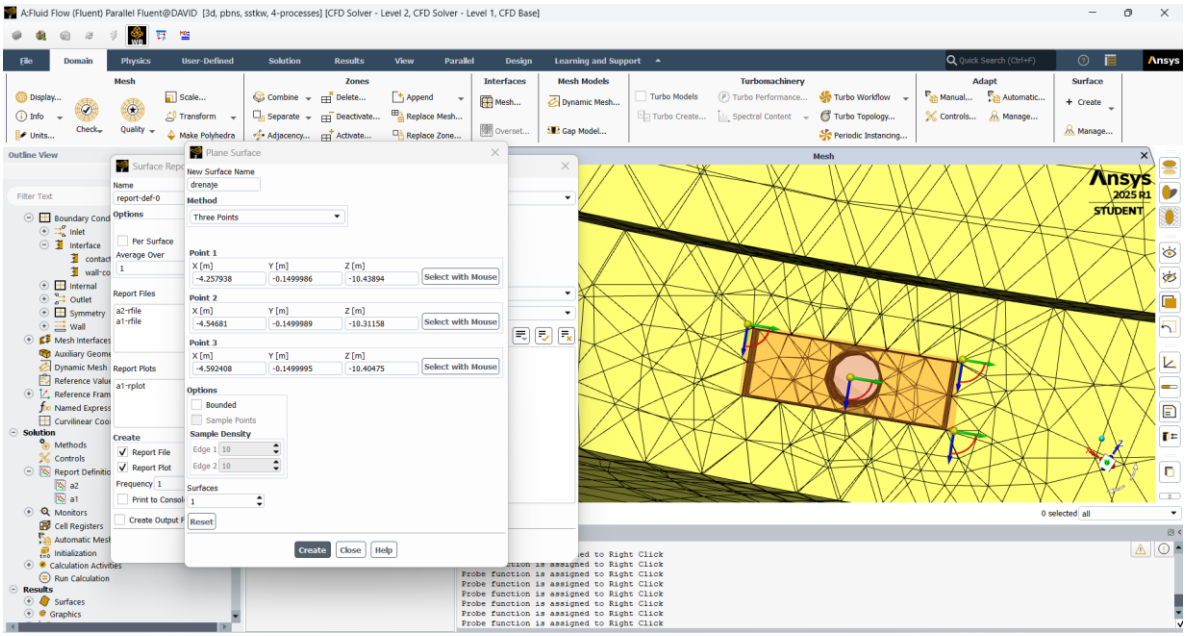


Ilustración 3.14 Definición de planos de muestreo en los sifones mediante el método “Three Points”

Debido a este enfoque, es posible cuantificar con exactitud la capacidad de evacuación de cada sifón, comparar el caudal evacuado con el caudal de diseño y detectar posibles asimetrías o zonas de baja eficiencia. Esto contribuye a la validación del sistema de drenaje y la identificación de puntos críticos que podrían requerir ajustes geométricos o mejoras en la instalación real.

2.10 Validación y optimización

Para evaluar el caudal evacuado y los perfiles de flujo en la Rosa de los Vientos, se empleó la herramienta “Plane Surface” con el método Three Points, que define un plano exactamente ajustado al contorno interior de la geometría circular. En la vista superior, los tres puntos (X, Y, Z) se seleccionaron sobre la corona interna adyacente a la boca de los sifones, creando una superficie plana y circular que coincide con la capa más alta de elementos del mallado refinado. Este procedimiento asegura que la superficie de reporte se alinee con el plano real de descarga, minimizando errores de interceptación de celdas y preservando la calidad de los datos de muestreo.

Una vez creada la superficie, se configuraron reportes de flujo para cuantificar el caudal volumétrico y los perfiles de velocidad normal en cada instante de la simulación. La densidad de la malla local, con elementos de tamaño controlado (skewness < 0.5, orthogonal quality > 0.3), garantiza que los resultados numéricos capten con fidelidad las variaciones radiales de velocidad y la formación de remansos cerca de las paredes. Estos datos se utilizan para validar que el caudal total evacuado por los ocho sifones coincide con el caudal de diseño (16.70 L/s), y para detectar desequilibrios o áreas de congestión antes de la implementación constructiva.

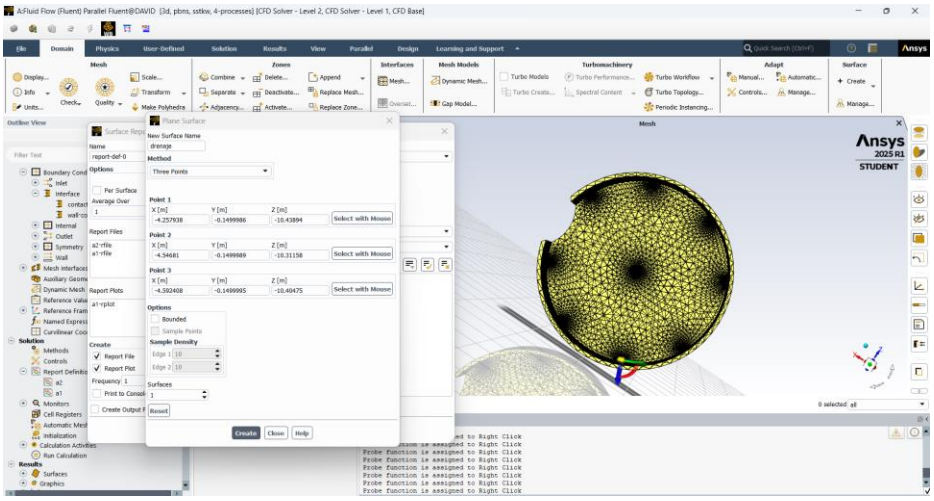


Ilustración 3.15 Definición de superficie de muestreo circular en la Rosa de los Vientos mediante

2.10.1 Monitoreo de convergencia

En la ilustración 3.15 presenta los residuales se observa la evolución de continuidad, velocidades en las tres direcciones (x, y, z) y la turbulencia (k y ω) a lo largo de las iteraciones dentro de cada paso de tiempo transitorio. Todos los residuales se mantienen por debajo de los umbrales establecidos (continuidad $< 1\times10^{-3}$, momentum/turbulence $< 1\times10^{-4}$), lo que garantiza que la solución numérica haya alcanzado un equilibrio entre las ecuaciones de conservación de masa y cantidad de movimiento, así como la fidelidad en la predicción de la energía turbulenta. La línea de continuidad, en particular, presenta la caída más pronunciada, confirmando la buena compenetración del acoplamiento PISO y la estabilidad del solver pressure-based en la simulación de la interfase aire-agua. En la sección de "Run Calculation" se configuró un Time Stepping adaptativo con un rango de Δt inicial entre 0.001 y 0.01 s, ajustándose automáticamente según el Courant Number y la evolución del flujo. Se especificaron 30 iteraciones por paso de tiempo, un intervalo de reporte de residuales cada iteración y la actualización de perfil de inyección en cada sub-paso, asegurando que el frente de escorrentía y la distribución de fases se recalcularan con precisión. Además, se habilitó el registro continuo del estado de la simulación para activar alertas si algún residual superaba el umbral, facilitando la intervención temprana y la validación de la calidad numérica durante todo el transitorio.

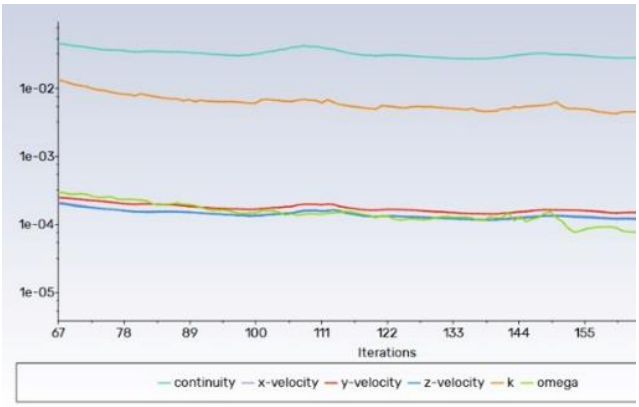


Ilustración 3.16 Gráficos de convergencia de residuales para continuidad, velocidad y turbulencia

2.10.2 Extracción de resultados

La simulación presentada en la Ilustración 3.16 describe la dispersión de gotas de lluvia modeladas mediante el Discrete Phase Model (DPM) acoplado bidireccionalmente con el esquema VOF en un dominio tridimensional que representa la “Rosa de los Vientos”. El volumen se malló con tetraedros de 2 mm de arista global y local, complementados con 12 capas de inflación (espesor inicial según Y+ y tasa de crecimiento 1.3), lo cual garantiza skewness < 0.5 y orthogonal quality > 0.3 para resolver con fidelidad los gradientes de velocidad cercanos a la pared. La cara superior se definió como Mass Flow Inlet de 16.70 L/s con intensidad de turbulencia del 5 % y relación de viscosidad turbulenta de 10 %, reproduciendo un espectro de lluvia con IDF de Bogotá (103.77 mm/h, T=10 años). El solver pressure-based se ejecutó en modo transitorio con acoplamiento PISO y discretización Second Order Upwind en momentum, turbulencia y VOF, empleando time stepping adaptativo (Δt inicial entre 0.001 s y 0.01 s, Courant < 1) y criterios de convergencia de continuidad < 1×10^{-3} y residuals de momentum/VOF/turbulencia < 1×10^{-4}. El modelo k-ω SST capturó las recirculaciones en quiebres topográficos, mientras que el método Geo-Reconstruct preservó la interfaz aire–agua. Finalmente, las trayectorias Lagrangianas evidencian la convergencia radial del flujo superficial hacia los ocho sifones perimetrales, validando la eficiencia del sistema de drenaje diseñado. Es importante indicar que, si bien el levantamiento LiDAR proporcionó una densa nube de puntos (x, y, z), resultó necesario aplicar un proceso de generalización para reducir su tamaño y complejidad antes de cualquier modelado. A partir de este subconjunto simplificado de puntos se procedió a reconstruir las superficies y definir los volúmenes del modelo. Dado que cada punto carece de información sobre conectividad o mallas predefinidas, se utilizaron las coordenadas LiDAR filtradas como referencia para posicionar vértices y generar manualmente las caras que cierran superficies, garantizando así la creación de volúmenes coherentes y sin solapamientos para su posterior importación en Fluent.

2.10.3 Extraextraccion de cotas rosa de los vientos

En la Ilustración 3.17a se aprecia el resultado del proceso de generalización y extracción de cotas a partir de la nube de puntos LiDAR. Primero, se definió una línea de corte sobre la nube filtrada para eliminar puntos aislados y atenuar el “ruido” propio del levantamiento original; a continuación, se generó un subconjunto de puntos equidistantes a lo largo del perfil, con el fin de obtener una representación simplificada de la topografía. Sobre esta línea de corte se realizó un muestreo puntual, extrayendo las coordenadas X, Y y Z de cada

vértice, lo que permitió conformar un vector de cotas continuo y regularizado. Finalmente, estos valores de elevación se exportaron como pares coordenados para su posterior uso en la generación de curvas de nivel y en la reconstrucción paramétrica de las superficies en el modelo CAD/CFD.

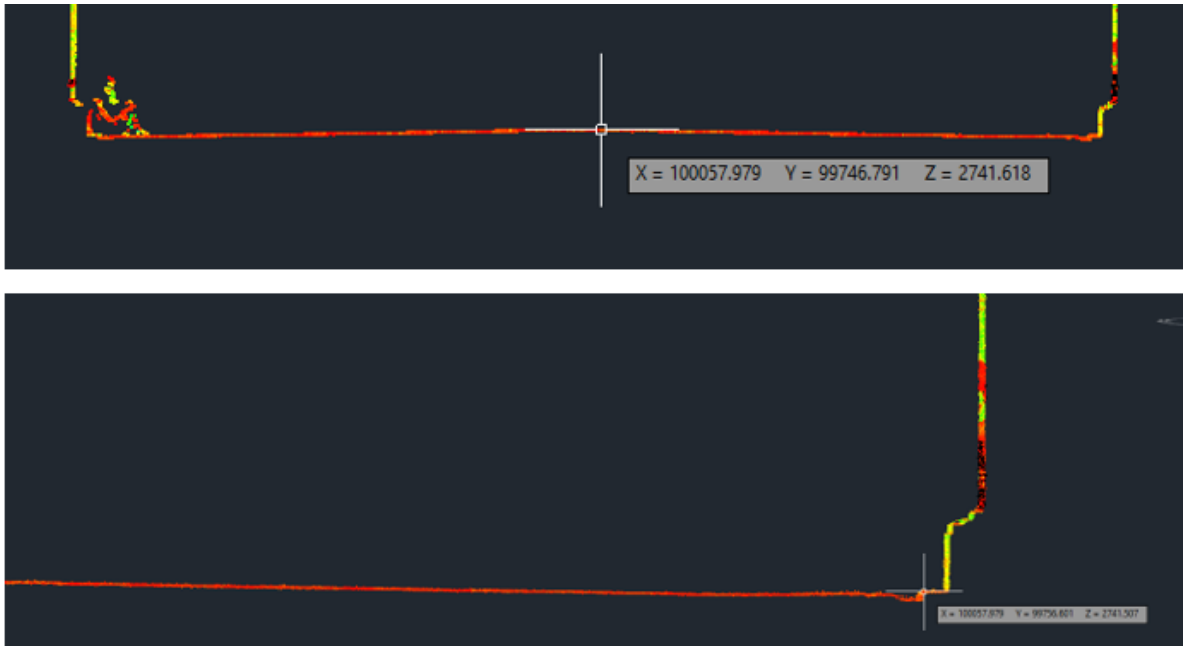


Ilustración 3.17a Perfil de cotas LiDAR generalizado

En esta Ilustración 3.7b se muestra la extracción de cotas a lo largo del perfil de la “Terraza Norte” obtenida de una nube de puntos LiDAR filtrada. En la parte superior, puede observarse el trazado inicial sobre la nube original, donde se seleccionó una línea de muestreo para aislar el terreno y las estructuras relevantes. Bajo este trazado, se presenta el subconjunto de puntos equidistantes resultante, codificado por gradientes de color según la elevación. Las coordenadas X, Y y Z indicadas en el recuadro resaltan los valores de cota en puntos representativos del perfil. Este procedimiento permite obtener un vector de

cotas suavizado y regularizado, indispensable para generar curvas de nivel precisas y para la posterior modelación de superficies en entornos CAD o CFD.

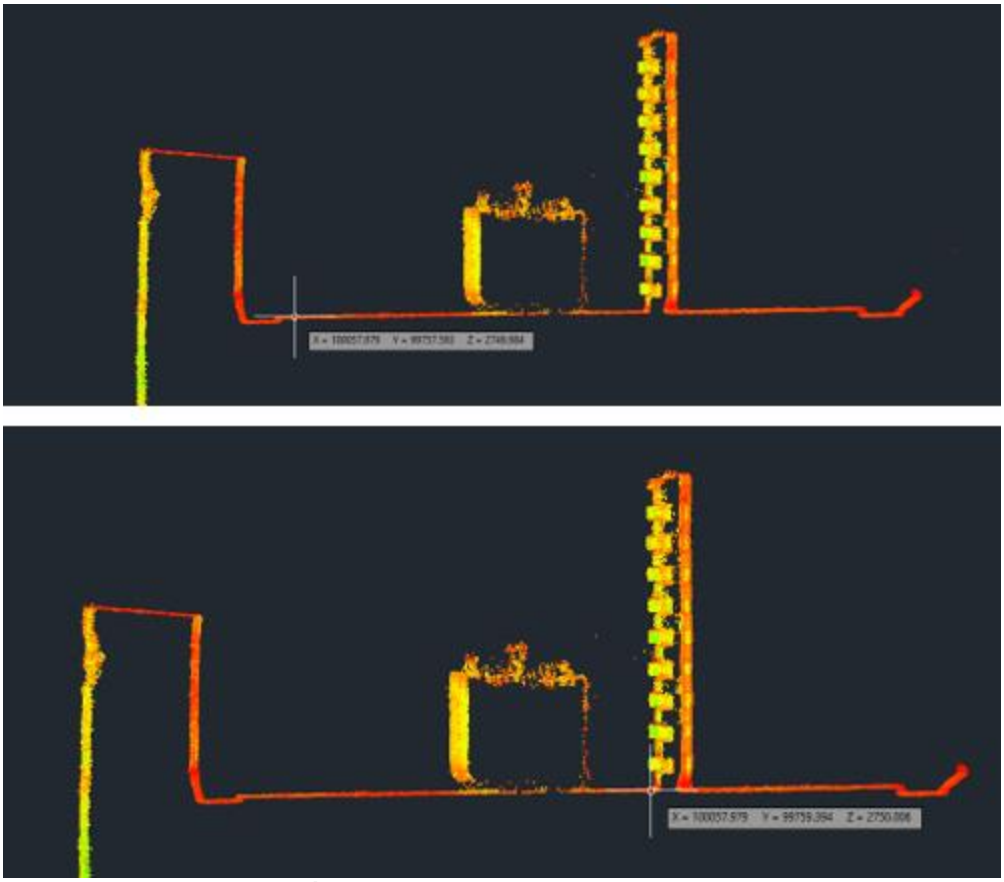


Ilustración 3.17b Perfil de cotas – Terraza Norte

En esta composición de tres perfiles secuenciales (Ilustración 3.17c) se aprecia la uniformidad relativa del plano de estudio, con ligeras oscilaciones de elevación que revelan pequeñas irregularidades del terreno. Cada trazado, representado con degradados de color según la altimetría, mantiene la misma línea de muestreo para facilitar la comparación entre secciones. Las variaciones puntuales en la amplitud vertical, especialmente en los extremos izquierdo y derecho, indican cambios abruptos en el desnivel, mientras que la porción

central se mantiene casi constante, lo que sugiere una plataforma natural o construida de baja pendiente.

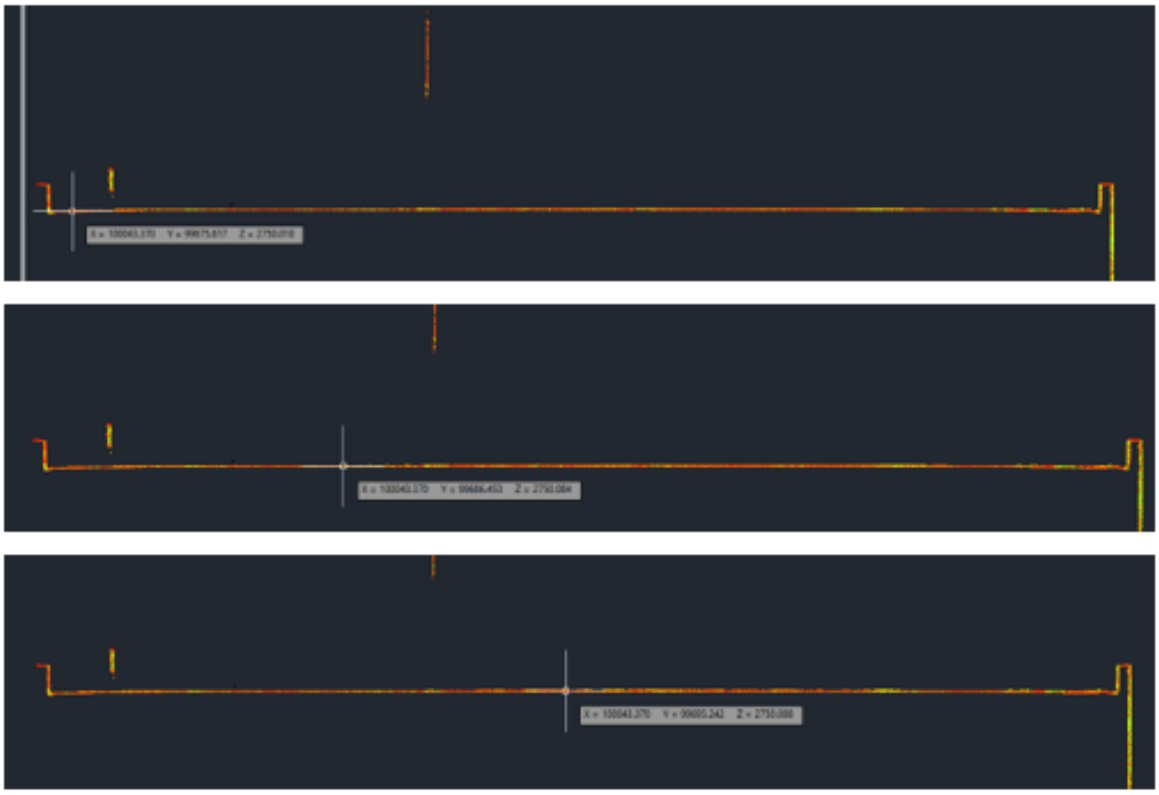


Ilustración 3.17c Perfiles secuenciales LiDAR

La Ilustración 3.17d se presenta el plano topográfico con curvas de nivel a intervalos constantes, generadas a partir de la interpolación de la nube de puntos LiDAR. A la izquierda, las curvas concéntricas delinean la estructura de la rosa de los vientos, revelando su geometría radial y sus distintos radios de alcance. A la derecha, se aprecia una plataforma alargada con pendientes suaves y zonas de transición más abruptas en sus extremos, correspondientes a las terrazas adyacentes. Los tramos lineales de contorno sugieren la presencia de elementos construidos, y el sombreado de las líneas resalta las

variaciones altimétricas. Este plano sirve de base para el análisis espacial de pendientes y la definición de cotas de diseño en el modelado hidráulico y estructural.

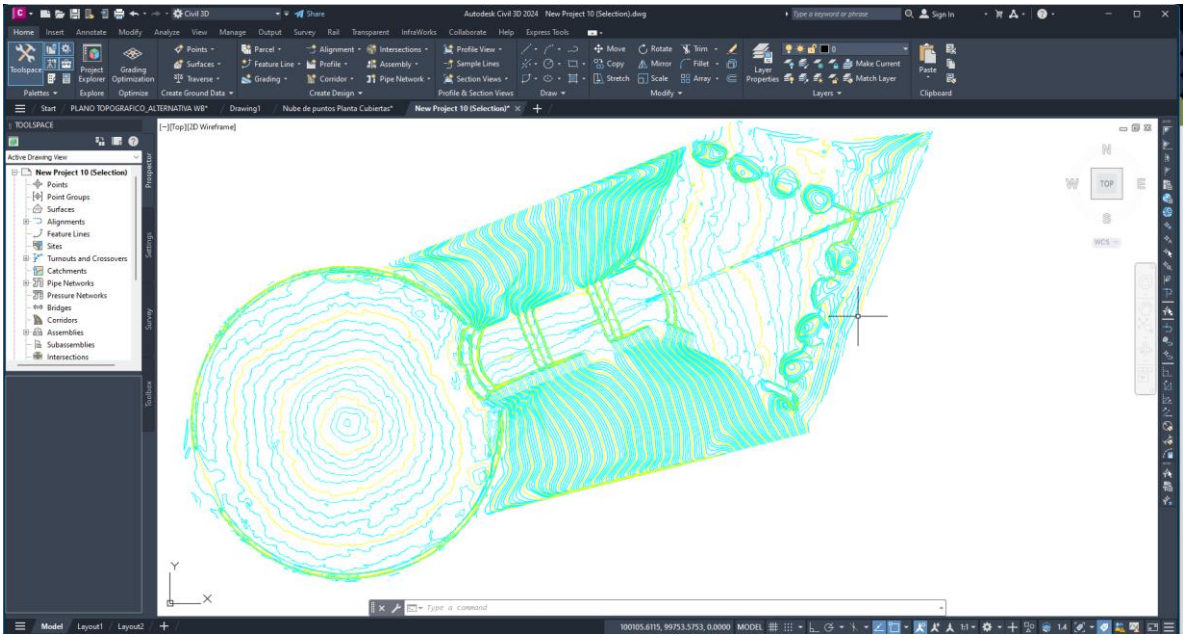


Ilustración 3.17d Curvas de nivel – Rosa de los vientos

Por otro lado, en la configuración de monitores de residuales (Ilustración 3.18) se establecieron criterios absolutos de convergencia de 1×10^{-3} para continuidad y de 1×10^{-3} para los residuos de momentum (componentes x, y, z), así como de k y ω, activando tanto el muestreo (Monitor) como la verificación de convergencia (Check Convergence) en cada iteración. Estos umbrales coinciden con los definidos en la Tabla 3.8 del documento de modelación, donde se especifica que los residuales de continuidad deben permanecer por debajo de 1e-3 y los de momentum, VOF y turbulencia por debajo de 1e-4, garantizando así el equilibrio numérico y la precisión en la solución transitoria.

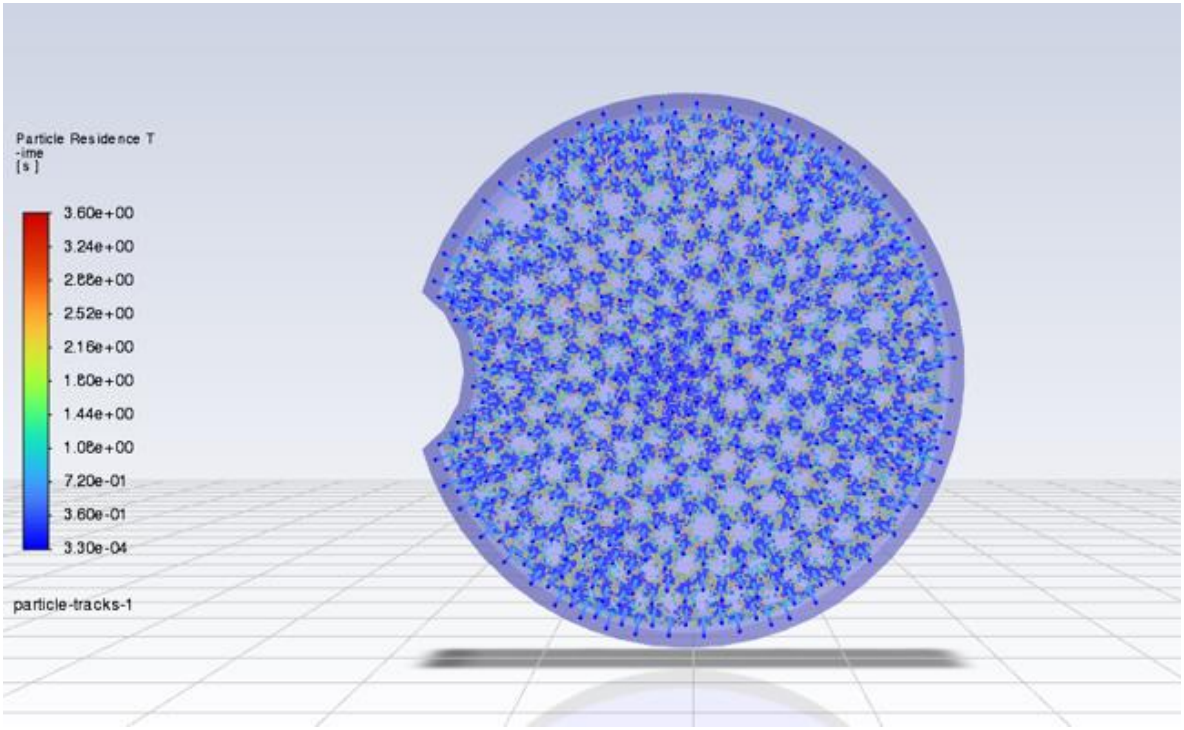


Ilustración 3.17 Trayectorias y tiempo de residencia de partículaspara continuidad, velocidad y turbulencia

El gráfico de residuales escalados muestra que, tras un rápido descenso inicial (primeras ~200 iteraciones), los residuos de velocidad (x, y, z), k y ω se estabilizan en valores cercanos a 1×10^{-3}, mientras que el residual de continuidad converge hacia valores inferiores a 1×10^{-4}, evidenciando la eficacia del acoplamiento PISO y la robustez del solver pressure-based bajo Time Stepping adaptativo (Δt entre 0.001–0.01 s, Courant < 1). Esta respuesta confirma que la simulación alcanzó la convergencia en masa y momentum sin comprometer la fidelidad en la predicción de la energía turbulenta, validando la calidad numérica de la solución multifásica con VOF y DPM.

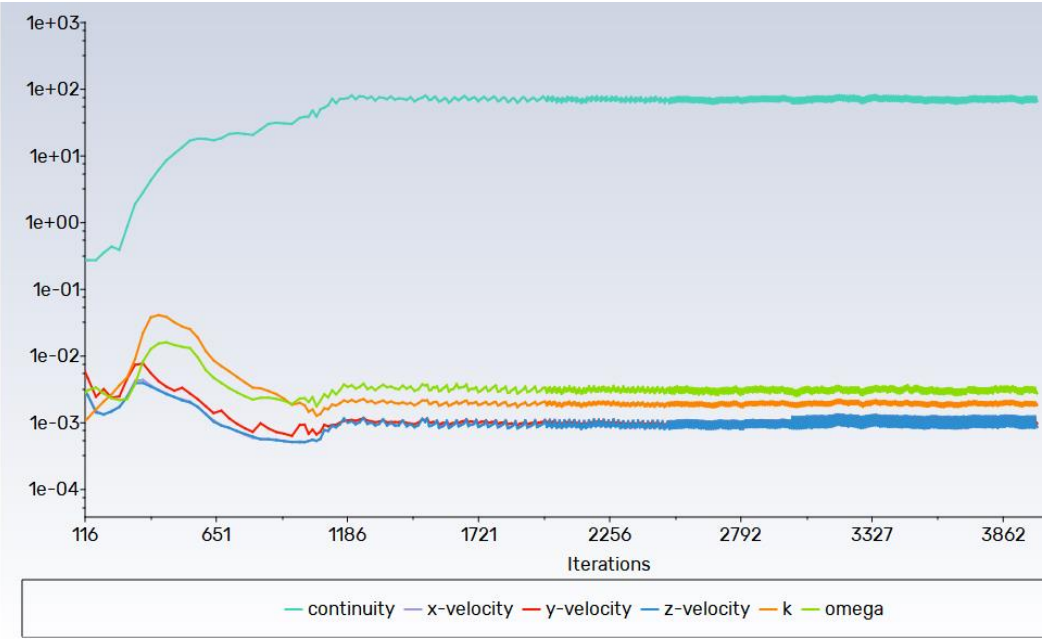


Ilustración 3.18 Convergencia de residuales escalados vs. iteraciones

De igual forma, el contorno de masa de película líquida mostrado en la Ilustración 3.19, describe una distribución claramente no uniforme: las zonas rojizas (≈6 ×10^{-2} kg) indican acumulaciones más espesas de film, especialmente alrededor de los sectores angulares donde cambia la geometría del conducto, mientras que las áreas azuladas (<1 ×10^{-2} kg) señalan regiones casi secas.

El patrón radial con “manchas” alternantes sugiere la influencia de remolinos o recirculaciones locales, probablemente generadas por la entrada excéntrica y la forma cóncava del borde. En conjunto, estas variaciones ayudan a identificar puntos críticos de desgaste.

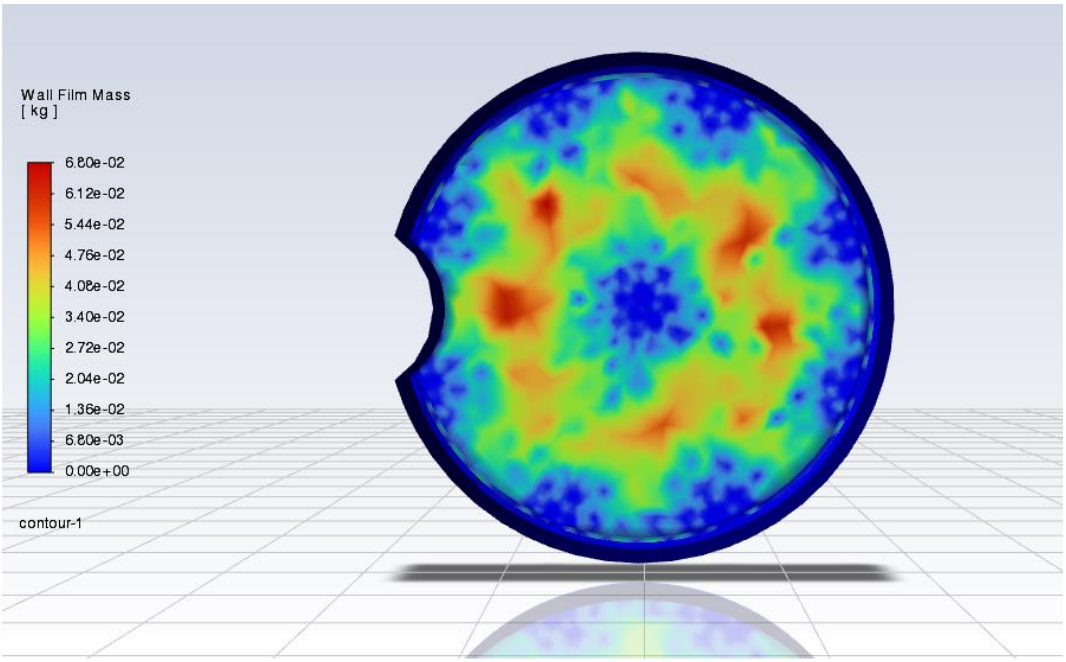


Ilustración 3.19 Contornos de masa de película en pared

La visualización de los contornos de viscosidad de la película adherida a la pared (Ilustración 3.20) revela un núcleo central con valores cercanos a 1×10^{-3} kg/(m·s), correspondiente a las zonas donde el agua filmada presenta mayor espesor y menor gradiente de velocidad tangencial; hacia el perímetro y especialmente cerca de los sifones, la viscosidad disminuye hasta aproximadamente 2×10^{-4} kg/(m·s) debido al adelgazamiento de la capa límite y al incremento local de corte tangencial. Este patrón coincide con la resolución proporcionada por el mallado tetraédrico de 2 mm y las 12 capas de inflación (Y+ controlado y factor de crecimiento 1.3), que permite capturar con detalle las variaciones de espesor de película en todo el dominio.

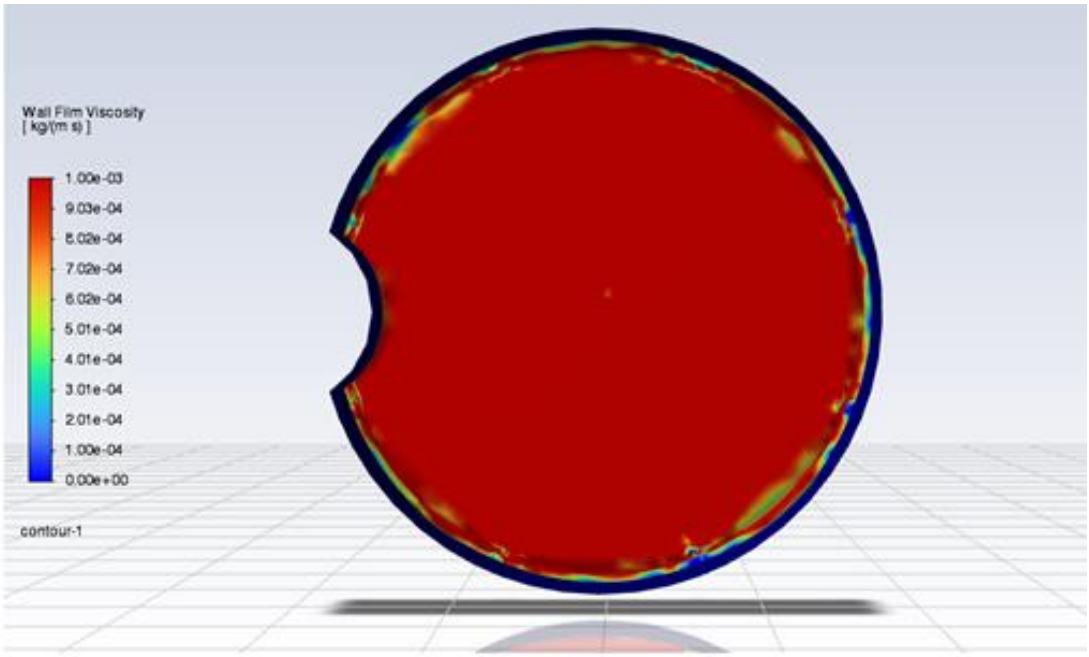


Ilustración 3.20 Contornos de viscosidad de la película en pared

El campo de vectores de velocidad presentado en la Ilustración 3.21, coloreado según su magnitud, evidencia tanto el flujo descendente uniforme desde el inlet superior (≈2.1 m/s) como las recirculaciones locales en torno a cada sifón perimetral, donde las magnitudes caen por debajo de 0.05 m/s. La representación se obtuvo tras interpolar los resultados del VOF y el DPM sobre un mallado tetraédrico de 2 mm con 12 capas de inflación (Y+ controlado, factor de crecimiento 1.3), lo que permite resoluciones detalladas de la capa límite y de los remolinos inducidos por los quiebres topográficos. El solver pressure-based en modo transitorio, con acoplamiento PISO y discretización Second Order Upwind, garantizó la captura de gradientes de velocidad sin oscilaciones numéricas, empleando time stepping adaptativo ($\Delta t \in [0.001–0.01\ s]$, Courant < 1) y residuals de momentum < 1×10^{-3}. Este análisis vectorial confirma la coherencia del diseño hidráulico al mostrar trayectorias predominantes hacia los desagües y zonas de baja velocidad que favorecen la sedimentación localizada.

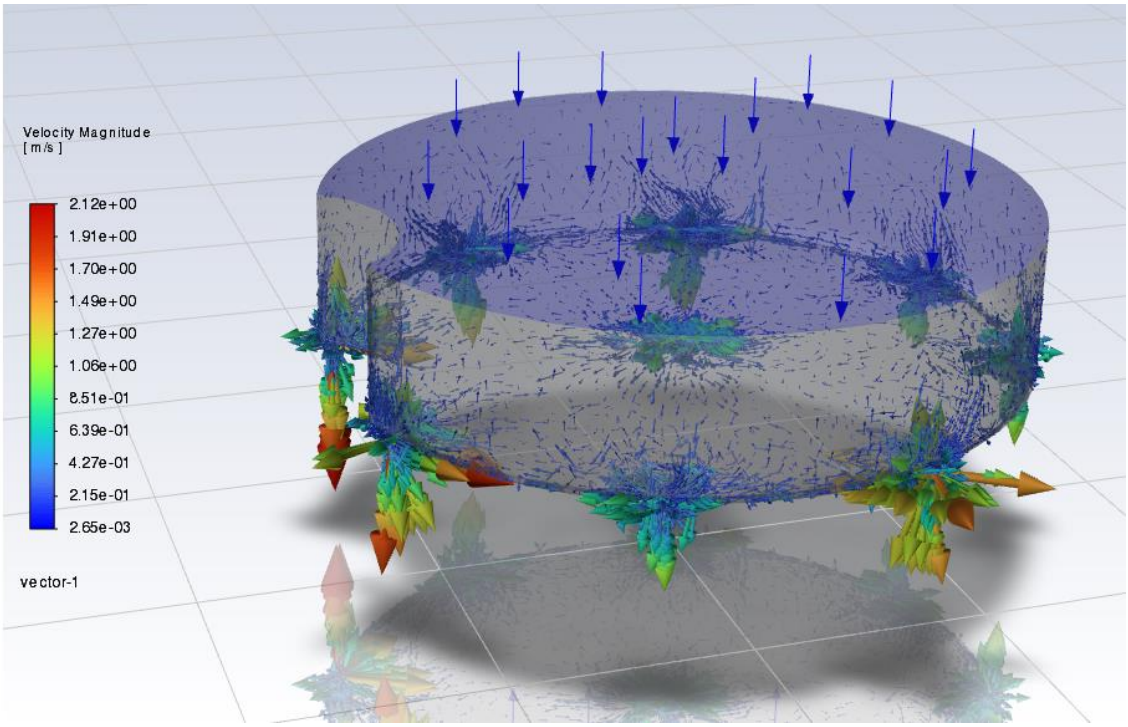


Ilustración 3.21 Vectores de velocidad sistema de drenaje

El diagrama de vectores de velocidad, coloreados según la tasa de disipación específica ω, revela regiones de alta disipación (hasta ~780 s^{-1}) en la zona de inyección superior y en los bordes de cada sifón, donde la interacción del flujo con la topografía induce gradientes de velocidad abruptos. Las zonas centrales muestran valores de ω inferiores a 150 s^{-1}, reflejando un flujo más estable con menores gradientes turbulentos. Dado que el caudal total de diseño (16,70 L/s) se distribuye homogéneamente entre los ocho sifones perimetrales, cada desembocadura debe evacuar aproximadamente 2,09 L/s. Según los cálculos hidráulicos realizados durante la modelación, un diámetro interno de 30 mm por sifón genera una velocidad de flujo cercana a 1,18 m/s, cifra que garantiza número de Reynolds superiores a 5000 y régimen plenamente turbulento, suficiente para evitar sedimentaciones y asegurar un tiempo de vaciado eficaz.

Por tanto, los diámetros seleccionados para los sifones validados en el análisis CFD mediante la captura de velocidades medias y perfiles de trayectoria, resultan adecuados para drenar el caudal de diseño sin riesgo de inundación.

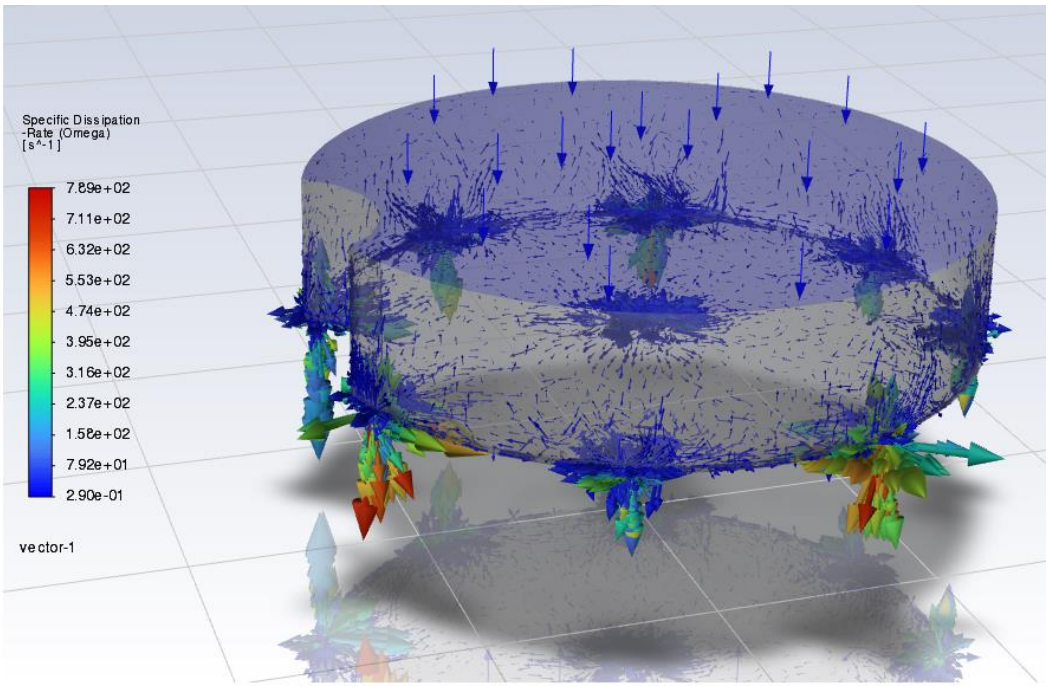


Ilustración 3.22 Diámetros de sifones frente al caudal de diseño

El campo de vectores representados en la Ilustración 3.23 presentan la componente axial de la velocidad, destacando el flujo predominante perpendicular al plano superior del domo. Se observa un perfil casi uniforme de descarga axial en la zona central (≈1.2 m/s), que decrece progresivamente hacia la periferia al ingresar a los sifones, donde las magnitudes llegan a valores negativos de hasta –0.5 m/s indicando retroceso localizado por efecto de recirculaciones. La resolución de la componente axial se logró gracias al mallado con tetraedros de 2 mm y las 12 capas de inflación orientadas en la dirección normal a la pared, asegurando una captura precisa de los gradientes en flujo vertical.

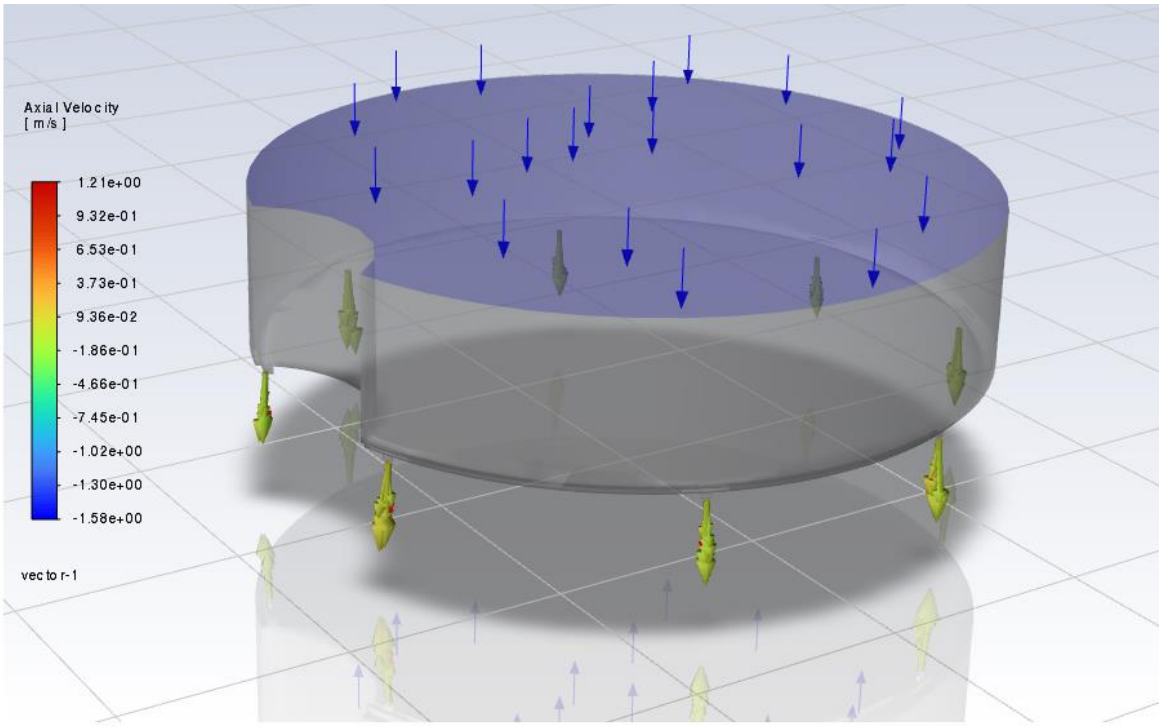


Ilustración 3.23 Vectores de velocidad axial

La Ilustración 3.24 presenta el promedio de la magnitud de velocidad ponderada por área muestra un rápido incremento inicial hasta aproximadamente 0,6 m/s en las primeras 200 iteraciones, seguido de una fase de ajuste donde la velocidad se estabiliza cerca de 0,8 m/s tras ~1 000 iteraciones. Este comportamiento indica que el flujo alcanza un régimen cuasi-estacionario, validando la selección del paso de tiempo adaptativo y los criterios de convergencia empleados.

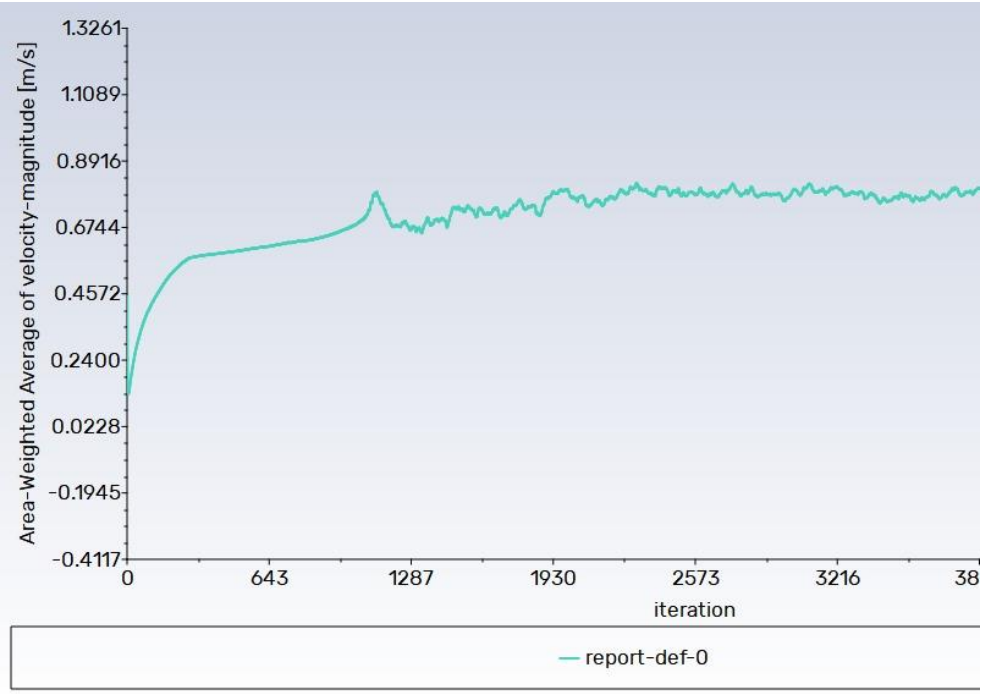


Ilustración 3.24 Evolución del promedio ponderado de la magnitud de velocidad vs. iteraciones

La vista del mallado (Ilustración 3.25) revela un dominio compuesto por elementos tetraédricos no estructurados con tamaño medio de 2 mm, organizado en ocho sectores radiales que reflejan la geometría de la “Rosa de los Vientos”. Se aprecian las 12 capas de inflación en la pared exterior, cuya densificación junto al factor de crecimiento 1.3 asegura un Y+ controlado y captura precisa de la capa límite. La distribución uniforme de celdas y la ausencia de celdas altamente sesgadas (skewness < 0.5)

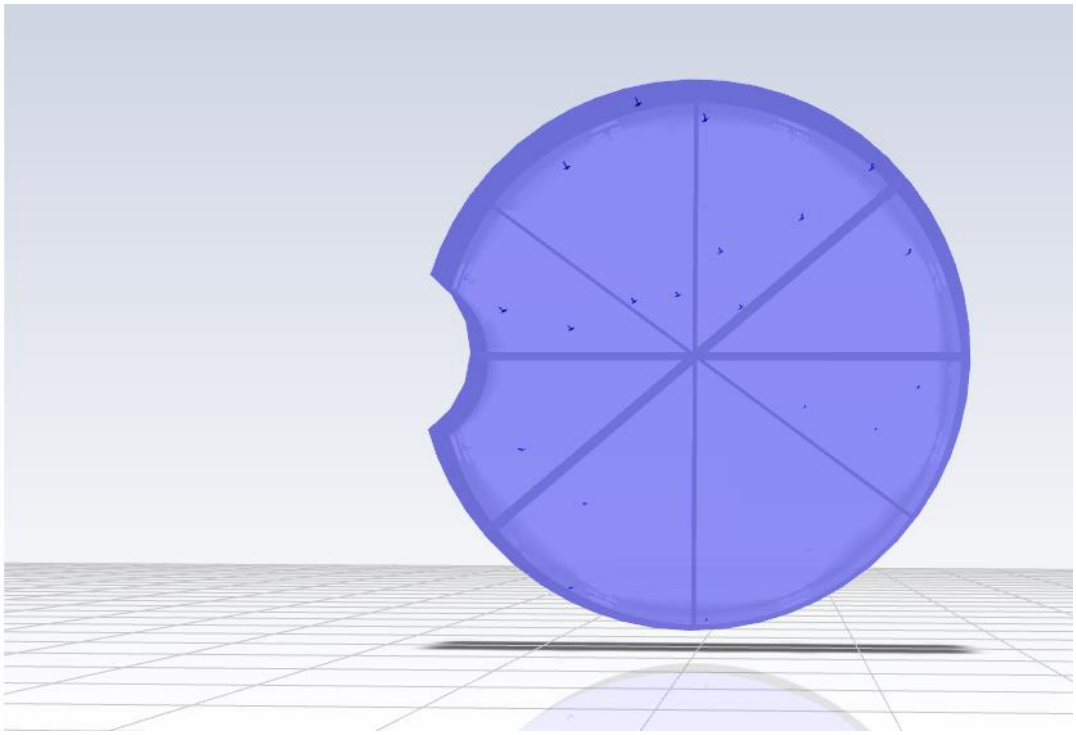
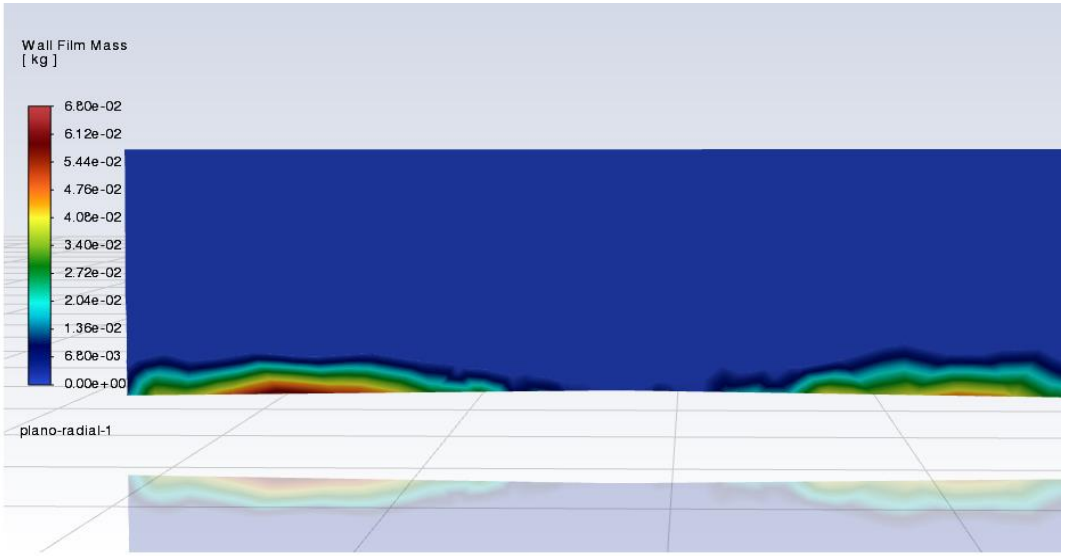
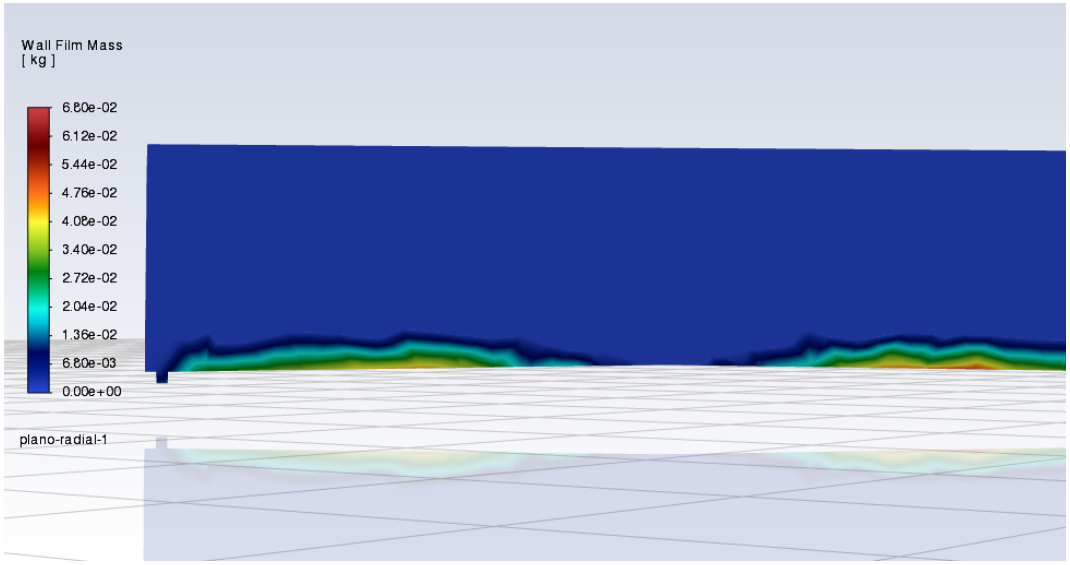


Ilustración 3.25 Plano radiales

Las cuatro vistas de cortes radiales () muestran la distribución de masa de la película líquida adherida a la pared en planos separados 45° entre sí, evidenciando picos de filmación de hasta 6.0×10^{-2} kg en zonas adyacentes a los sifones y valores mínimos ($<1.0\times10^{-3}$ kg) en las regiones de pendiente suave. La resolución de los contornos se obtuvo interpolando los resultados del modelo VOF sobre las 12 capas de inflación con Y+ controlado, lo que permitió capturar con detalle las variaciones de espesor de película en cada sector radial. La consistencia en la forma y magnitud de los picos a lo largo de los cuatro cortes confirma la simetría hidráulica del diseño y la precisión de la simulación en la predicción de la formación de filmaciones localizadas.


Wall Film Mass
[kg]
6.80e-02
6.12e-02
5.44e-02
4.76e-02
4.08e-02
3.40e-02
2.72e-02
2.04e-02
1.36e-02
6.80e-03
0.00e+00
plano-radial-1


Wall Film Mass
[kg]
6.80e-02
6.12e-02
5.44e-02
4.76e-02
4.08e-02
3.40e-02
2.72e-02
2.04e-02
1.36e-02
6.80e-03
0.00e+00
plano-radial-1

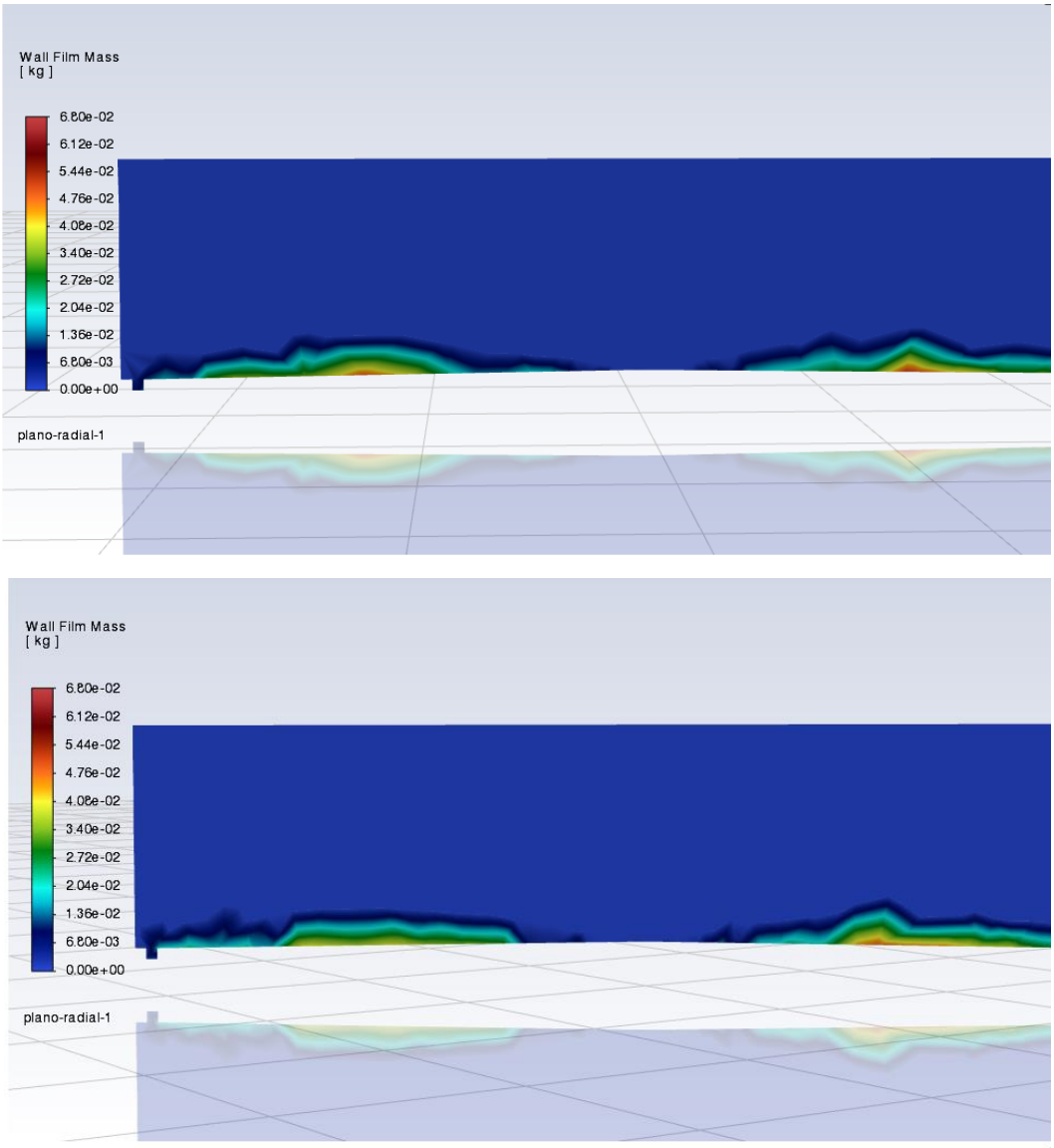


Ilustración 3.26 Cortes de distribución masa liquida

2.11 Modelación e integración Rosa de los vientos con área de las palmeras

Para la modelación de la zona de las palmeras se llevó a cabo la modelación e integración del área correspondiente como un único dominio sólido a partir del modelo BIM generado en Revit (archivo 126-09-BP-JCI-ARCHIVO_NACIONAL.rvt). El proceso de depuración geométrica demandó aproximadamente 12 horas de trabajo intensivo en la plataforma de edición, durante las cuales se aplicaron las siguientes operaciones y criterios técnicos:

Unión de cuerpos y Booleanos

• Se identificaron y fusionaron múltiples familias y subcomponentes mediante operaciones Booleanas de unión (Unión), eliminando la generación de múltiples volúmenes independientes que podrían degradar la calidad del mallado en ANSYS Fluent.

• Se ajustaron las tolerancias de fusión a 0.01 mm para garantizar la continuidad de las superficies y evitar discontinuidades en la transición de elementos.

Limpieza de aristas y vértices

• Se eliminaron aristas finas y “floating edges” sobrantes mediante la función de borrado de entidades no referenciadas (Delete Unreferenced Geometry), reduciendo el riesgo de generar elementos de mala calidad o entidades de dimensión cero en el mallado.

• Se consolidaron vértices coincidentes con una distancia umbral de 0.05 mm para asegurar la correcta conectividad topológica.

Corrección de distorsiones y deformaciones

• Se aplicó la herramienta de “Smooth Face” sobre superficies deformadas para homogeneizar curvaturas y eliminar anomalías de modelado, mejorando la calidad del mallado semiautomático de CFD.

• Se revisaron y ajustaron manualmente las normales de superficie, orientándolas consistentemente hacia el exterior del volumen para evitar inversiones durante la simulación.

Sellado de huecos y geometrías superpuestas

• Se utilizaron operaciones de “Fill Hole” y “Stitch” para cerrar vacíos y áreas abiertas, completando superficies con niveles de precisión de 0.1 mm.

• Se detectaron y resolvieron solapamientos de sólidos mediante la función de “Intersect” para generar geometrías conformes y exentas de volúmenes duplicados.

Validación y exportación para CFD

• Se validó la integridad geométrica del sólido resultante mediante el análisis de “Check Geometry” en Revit, confirmando un único cuerpo “watertight” sin errores de topología.

• Finalmente, se exportó el sólido limpio en formato, preservando la precisión geométrica y la estructura de capas, listo para su importación en ANSYS Fluent y subsecuente mallado de volúmenes con elementos tetraédricos de alta calidad. Este flujo de trabajo garantiza un sólido 100 % compatible con los requisitos de mallado y simulación de ANSYS Fluent, minimizando la presencia de elementos degenerados o distorsionados que puedan afectar la precisión numérica de los resultados.

La Ilustración 3.27 presenta el dominio sólido obtenido tras la integración del área de las palmeras en un único modelo CAD listo para CFD. Se aprecia un cuerpo principal de sección circular conectado mediante un conducto de transición curvado, caracterizado por radios de curvatura uniformes y un espesor constante de que desemboca a un reservorio de forma paralelepipédica. Todos los vértices y aristas internas han sido eliminados o fusionados, garantizando una topología “watertight”.

Las superficies han sido suavizadas y las normales orientadas de manera coherente hacia el exterior, de modo que, por lo cual, el sólido cumple con los requisitos de mallado tetraédrico de ANSYS Fluent, evitando elementos degenerados y discontinuidades geométricas.

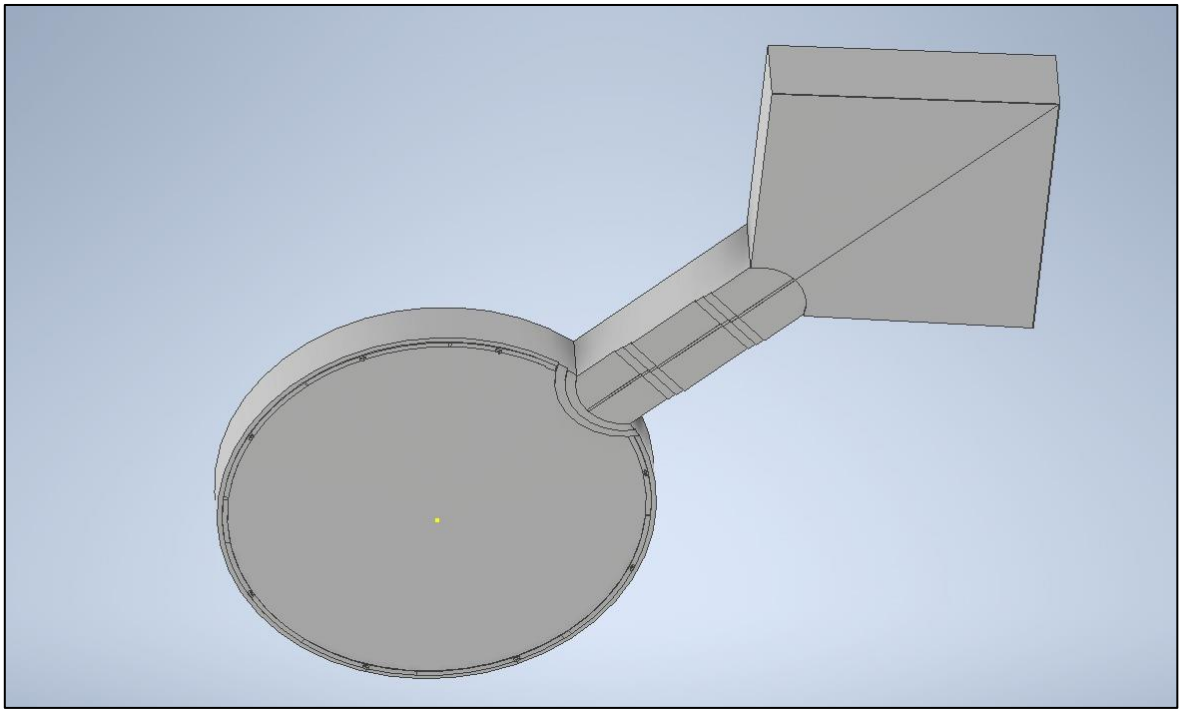


Ilustración 3.27 Modelación e integración del área de las palmeras como un solo sólido

La vista lateral mostrada en la Ilustración 3.28, presenta el perfil de la rosa de los vientos aplicado a la conexión con el bloque de las palmeras. El trazado se ha dividido en cuatro tramos ortogonales, correspondientes a los ejes norte, este, sur y oeste, cuyas longitudes varían según la orientación, generando un escalonado controlado que garantiza un aporte direccional del flujo hacia el volumen circular.

Las superficies planas de cada sección mantienen un espesor constante de 5 mm y están posicionadas con tolerancias de 0.05 mm para asegurar la exactitud geométrica. Los cambios de dirección se producen mediante chaflanes en las esquinas internas, evitando concentraciones de esfuerzo y facilitando un mallado estructurado en ANSYS Fluent.

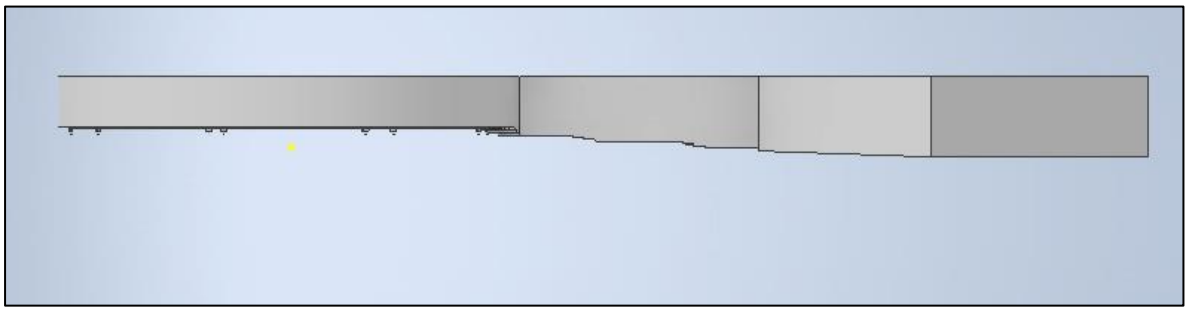


Ilustración 3.28 Perfil lateral de la conexión tipo "rosa de los vientos" al sólido de palmeras

La Ilustración 3.29 muestra la interfaz de ANSYS Fluent con el dominio sólido mallado en volúmenes tetraédricos de tamaño variable: malla más fina (elementos de aproximadamente 1 mm) en la zona de transición curva y alrededor de la conexión circular, y malla progresivamente más gruesa (hasta 10 mm) en el reservorio paralelepipédico. Se aplicó refinamiento local mediante "Inflation Layers" de tres capas con factor de crecimiento 1.2 sobre las superficies internas críticas, asegurando una resolución adecuada de gradientes de velocidad próximos a las paredes (interacción fluido-estructura).

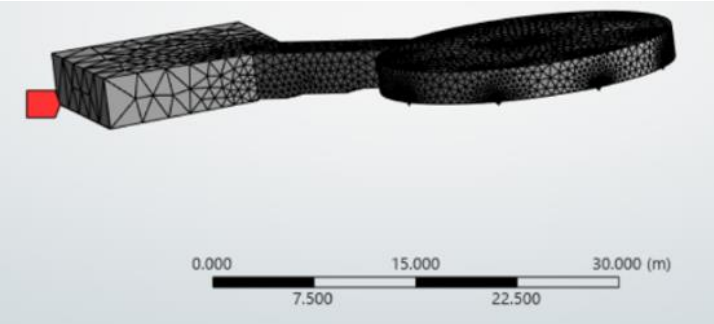


Ilustración 3.29 Mallado tetraédrico del dominio sólido en ANSYS Fluent

La Ilustración 3.30 presenta una vista isométrica del mallado final del dominio, donde se aprecia la gradación de densidad de elementos: la sección circular exhibe una red radial de tetraedros más finos con tamaño mínimo de 0.8 mm en el núcleo para capturar adecuadamente los gradientes de presión, mientras que el conducto de transición muestra una malla intermedia con tamaños entre 1 mm y 3 mm. El cubo recibe una discretización más gruesa (hasta 12 mm), optimizando el conteo de celdas sin sacrificar la precisión global. Todos los elementos cumplen criterios de relación de aspecto (< 5) y skewness (< 0.8), garantizando la estabilidad numérica en la simulación de ANSYS Fluent.

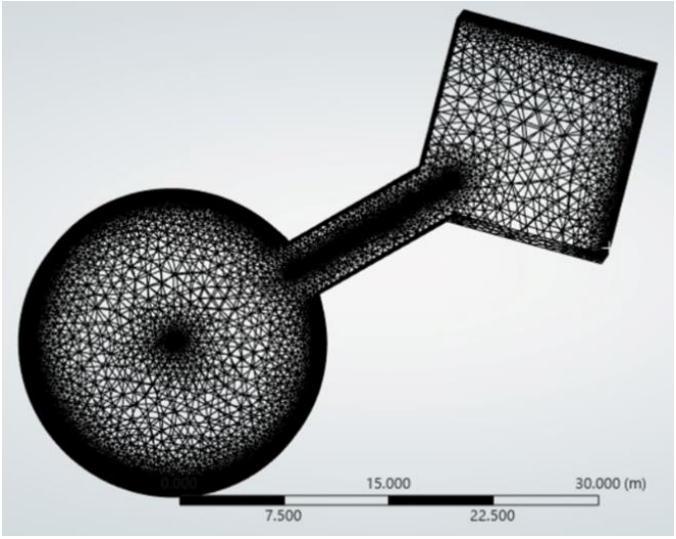


Ilustración 3.30 Mallado tetraédrico del dominio sólido (Vista planta)

La condición de contorno de “Wall” en ANSYS Fluent, donde se han seleccionado un total de 161 caras correspondientes a las superficies internas del conducto de transición y el perímetro del volumen circular. Estas caras se etiquetaron como paredes no deslizantes (“No-Slip Wall”) con tratamiento de capa límite activado, garantizando la generación de capas de inflación adyacentes con un crecimiento controlado.

En el panel de propiedades se observa que todas las superficies han sido reconocidas como “Program Controlled” para el mallado, permitiendo que Fluent gestione el refinamiento local sin intervención manual adicional.

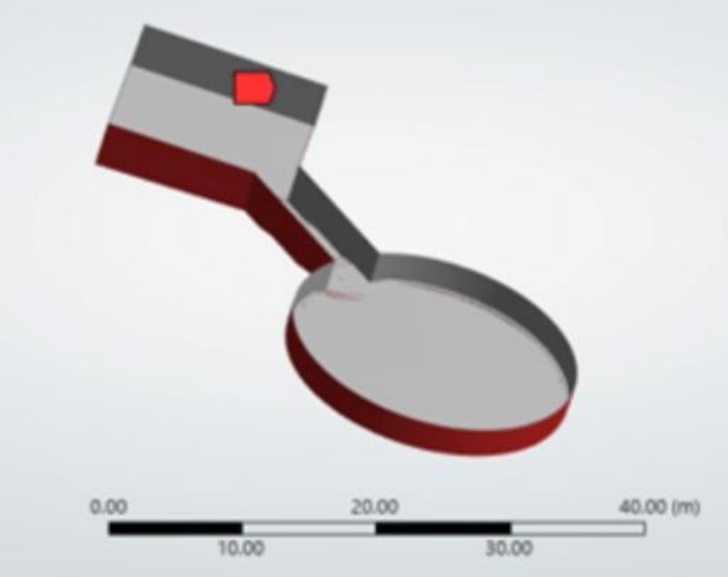


Ilustración 3.31 Selección de superficies “Wall”

La visualización en ANSYS muestra la orientación de las normales de las condiciones de contorno aplicadas: las flechas azules, perpendiculares a la superficie del cilindro principal, indican la ubicación y dirección del flujo entrante (Inlet), mientras que las flechas rojas, insertadas en la base del sólido, señalan las caras asignadas como salida (Outlet). Cada vector está escalado para reflejar la magnitud relativa de la velocidad prescrita en cada zona. La Ilustración exhibe la verificación geométrica de la asignación de los contornos antes de proseguir con la definición de las ecuaciones de Navier–Stokes y el cálculo de gradientes de presión en ANSYS Fluent.

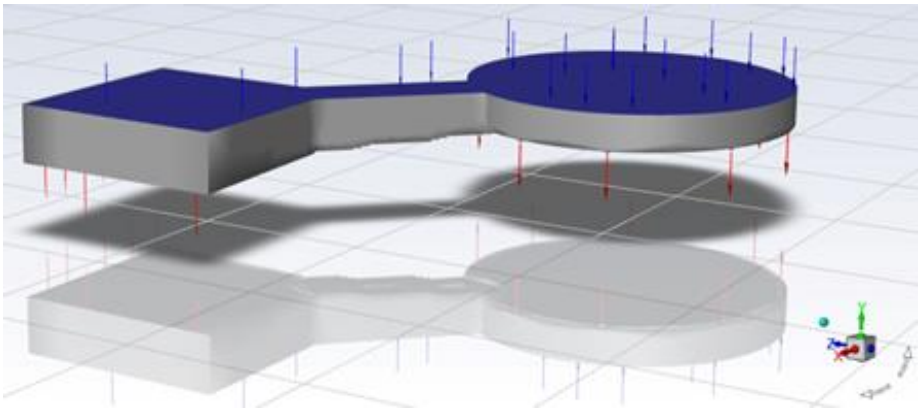


Ilustración 3.32 Normales de contorno

En consecuencia, se ha seleccionado el modelo de turbulencia k–omega SST (2 ecuaciones) para capturar con precisión tanto los flujos cercanos a la pared como las regiones de separación en la conexión curva y en el reservorio. Este esquema híbrido combina la formulación Standard k–omega en la vecindad de las superficies sólidas, garantizando un tratamiento más robusto de la capa límite, con la formulación Standard k–ε en la zona libre mediante una función de mezcla basada en la distancia al muro. Se activó la corrección de producción límite (“Production Limiter”) para evitar el sobrecrecimiento de la turbulencia en regiones con fuertes gradientes de velocidad y se deshabilitaron las correcciones de curvatura y flujo de esquina, priorizando la estabilidad numérica en geometrías complejas.

En el bloque de constantes del modelo se utilizaron los valores $\alpha\infty = 1^*$, $\beta\infty = 0.09^*$, $a_1 = 0.31$, $\beta_i(\text{inner}) = 0.075$ y $\beta_i(\text{outer}) = 0.0828$, con números de Prandtl turbulento diferenciados para la energía cinética: $Pr_t(\text{inner}) = 1.176$ y $Pr_t(\text{outer}) = 1$. Además, se definieron las relaciones de difusión de dispersión turbulenta como SDR(inner) = 2 y SDR(outer) = 1.168. Esta configuración asegura un balance adecuado entre la generación y disipación de turbulencia, optimizando la predicción de perfiles de velocidad y esfuerzos cortantes en las zonas críticas del mallado generados en la interacción entre la rosa de los vientos y la zona de palmeras.

En la primera etapa de configuración se definieron tres tipos de zonas de contorno: Inlet, Outlet y Wall, junto con una zona adicional para la inyección de partículas ("injection-0"). Para el Inlet se empleó el método de especificación "Magnitude, Normal to Boundary" con una velocidad de entrada de 2.88×10^{-5} m/s, un nivel de intensidad turbulenta del 5 % y una relación viscosidad-intensidad igual a 10. La Outlet se configuró como "Gauge Pressure = 0 Pa" con opción "Prevent Reverse Flow" activada para garantizar un flujo unidireccional. La inyección de partículas de agua se definió sobre la superficie de entrada utilizando un diámetro de 0.005 m, flujo másico total de 16.7 kg/s (caudal de diseño) y distribución uniforme, mientras que la zona de Wall se habilitó para la formación de película líquida (wall-film) con modelo "stanol-rutland", dos gotas salpicadas y factor de temperatura crítica ajustado a 2. Para la solución numérica se seleccionó el esquema de acoplamiento Coupled para presión-velocidad, Rhie-Chow basado en momentum y discretización espacial "Least Squares Cell Based" para gradiente, PRESTO! para presión y "Second Order Upwind" para momento, energía cinética turbulenta y tasa de disipación turbulenta. Por lo cual se asignaron factores de relajación explícita de tiempo pseudo–steady de 0.5 para presión y momentum, 1.0 para viscosidad turbulenta y 0.75 para energía cinética y tasa de disipación. El método transitorio se estableció con "Global Time Step" y corrección de gradiente en cara desplazada activa, optimizando la convergencia en cada iteración.

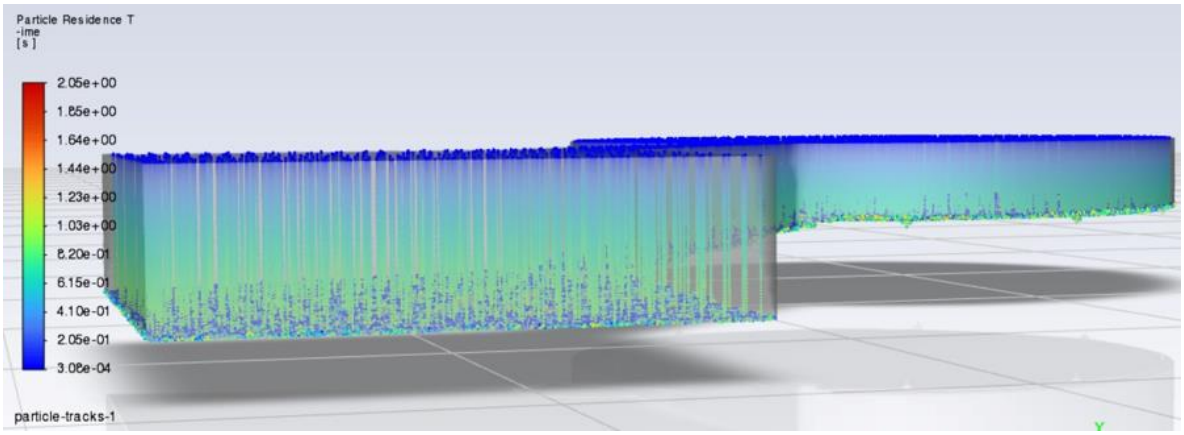


Ilustración 3.33 Normales de contorno

La Ilustración 3.33 muestra las trayectorias de las partículas inyectadas, coloreadas según el tiempo de residencia (escala de 3×10^{-4} s en azul a 2.05 s en rojo). Se observa que, al ingresar por el conducto de transición, las partículas alcanzan rápidamente el volumen circular, donde el tiempo de residencia se incrementa debido a las recirculaciones internas para el caudal de diseño del proyecto. En la zona de reserva paralelepipédica, las partículas presentan una residencia casi constante cercana a 1.5 s, lo que indica un flujo predominantemente laminar con mínimos recirculados. El gradiente de colores a lo largo del eje longitudinal corrobora la adecuada captura de los tiempos de retardo, validando la malla y las condiciones de contorno para estudios de transporte de fase dispersa.

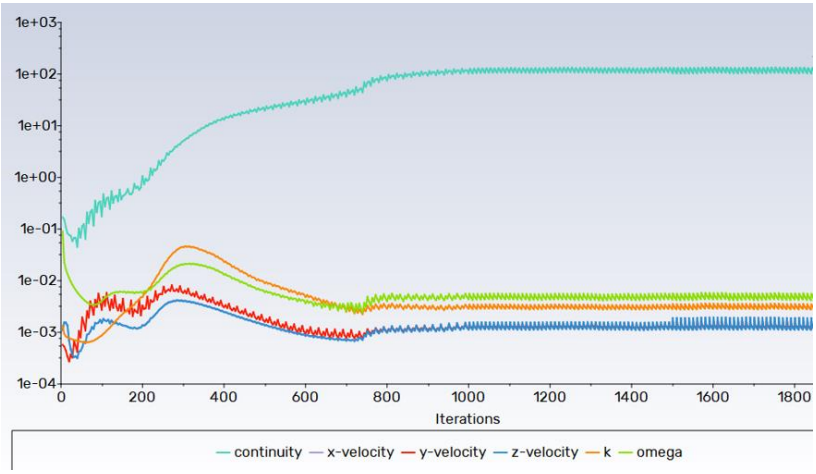


Ilustración 3.34 Monitor convergencia de residuos de continuidad

La gráfica de residuos escalados (Ilustración 3.34) muestra la evolución de la convergencia para las ecuaciones de continuidad (línea turquesa), velocidades en X (azul), Y (rojo) y Z (naranja) y las variables turbulentas k (amarillo) y ω (verde) durante 2000 iteraciones. En las primeras iteraciones, los mayores residuos se concentran en la región de transición curva, correspondiente a la conexión “rosa de los vientos” con la zona de las palmeras, debido a la generación de vorticidad y a los gradientes de presión; después de aproximadamente 800 iteraciones todos los campos caen por debajo de 10^{-3}, lo que confirma la estabilidad numérica y la eficacia del mallado fino y las capas de inflación en esa zona.

Para las variables del modelo relacionadas con la película líquida en ANSYS Fluent, se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: Wall Film Mass (masa total de la película líquida por celda, en kg) evalúa la cantidad de líquido retenido sobre cada superficie; Wall Coverage (porcentaje de superficie cubierta, adimensional) indica la extensión del área húmeda; Wall Film X-Velocity, Y-Velocity y Z-Velocity (componentes de velocidad del film en m/s) describen el movimiento del líquido en cada dirección cartesiana; y Specific Dissipation Rate (ω) (tasa específica de disipación turbulenta en 1/s) refleja la estabilidad del film próximo a las paredes. Cada variable resulta esencial para cuantificar la distribución y la dinámica del agua superficial en geometrías complejas. Al analizar los contornos de Wall Film Mass, la zona circular (estructura denominada rosa de los vientos) presenta una distribución radial de masa con valores máximos en el perímetro interior, lo que revela recirculaciones y acumulaciones de película líquida. Por su parte, el área del rombo (región donde se ubican las palmeras) muestra una cobertura más homogénea, aunque con picos localizados en las esquinas debido a la interacción del flujo incidente con la geometría del sólido (Ilustración 3.5). Estos patrones confirman la influencia de la conexión curva sobre la formación y el transporte de la película líquida.

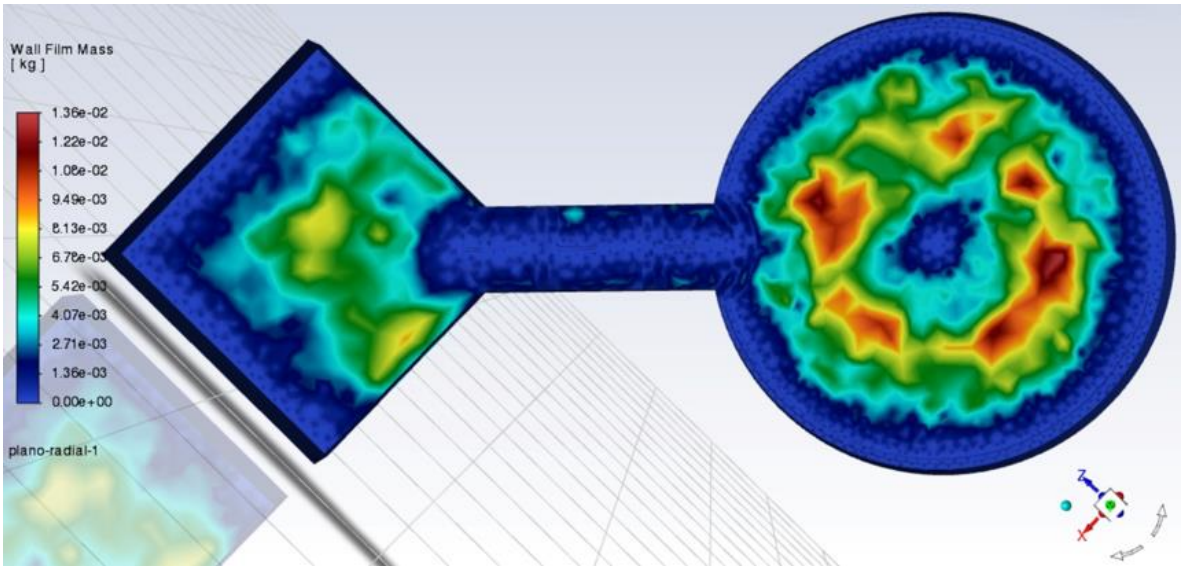


Ilustración 3.35 Distribución de masa de película líquida en las zonas de palmeras y rosa de los vientos

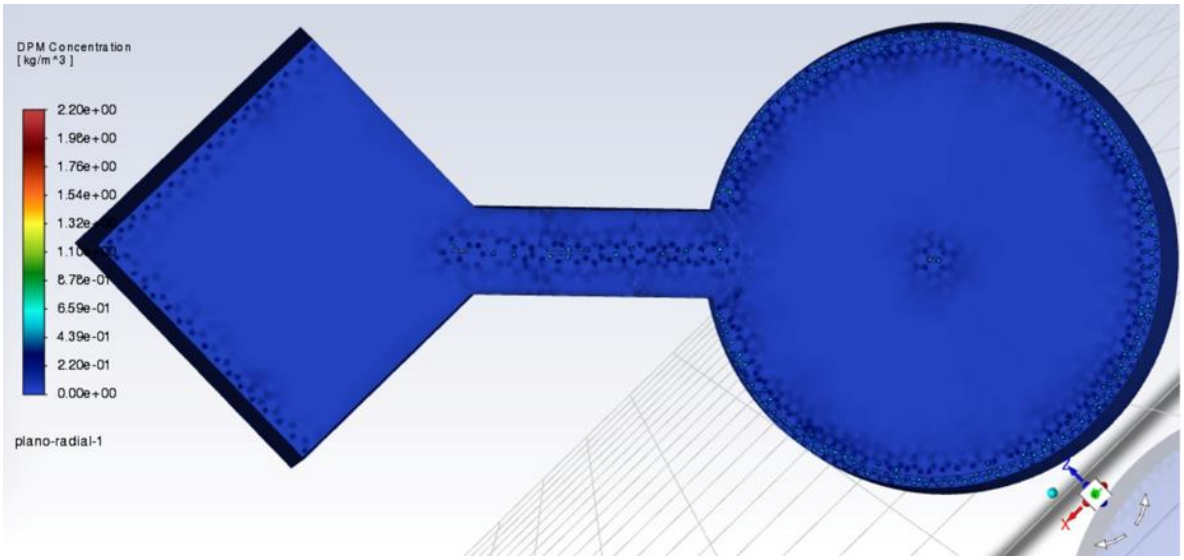


Ilustración 3.36 Contornos de concentración DPM

La Ilustración 3.36 muestra los contornos de concentración de fase discreta (DPM) en kg/m³, evidenciando una distribución prácticamente uniforme con valores máximos alrededor de 2.20 kg/m³ en el perímetro interno de la zona circular (rosa de los vientos) y valores mínimos inferiores a 0.22 kg/m³ en el área del rombo (palmeras). Esta homogeneidad indica una inyección y transporte eficaz de partículas a través del conducto de transición, con mínima sedimentación o acumulación diferencial en ambas regiones.

De igual forma, la Ilustración 3.37 presenta los contornos de la fuerza de la fase discreta en la dirección X aplicada a las superficies interiores, con valores positivos (rojo) indicando empuje del flujo de partículas contra la pared y valores negativos (azul) denotando succión o retroceso. En la zona del rombo (palmeras) se observan regiones de succión localizadas en las esquinas, mientras que en la estructura circular (rosa de los vientos) predominan las áreas de empuje más intensas en el perímetro interior. Estos patrones revelan cómo la geometría de la conexión curva modula las fuerzas de impacto de partículas sobre el área de las palmeras.

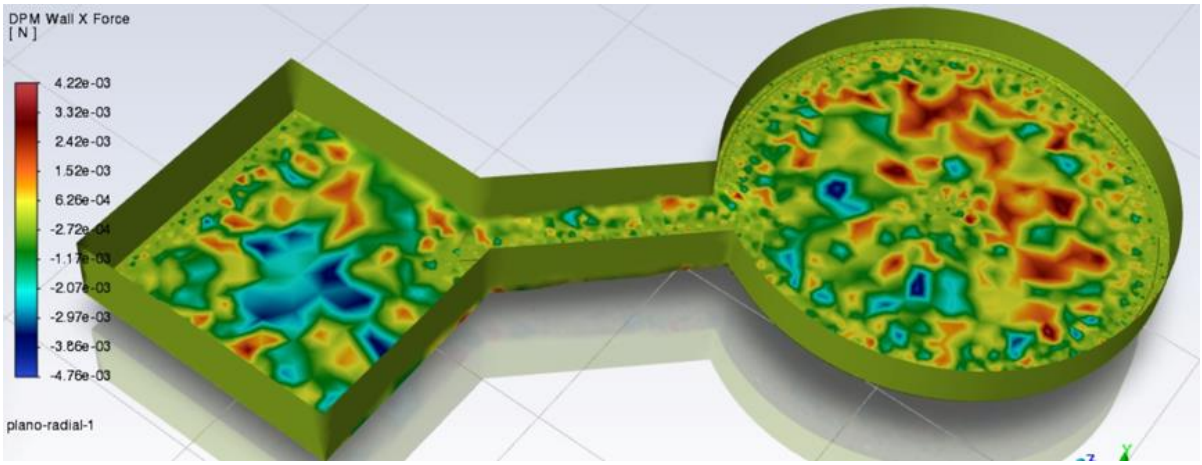


Ilustración 3.37 Fuerza de interacción DPM sobre las paredes

La Ilustración 3.38 muestra el esfuerzo cortante de pared en pascales, con valores máximos alrededor de 4.5×10^{-3} Pa localizados en el perímetro interior de la zona circular (rosa de los vientos) y en bordes angulados de la región del rombo (palmeras). La conexión de transición concentra gradientes de velocidad que generan picos de corte cercanos a las uniones geométricas, mientras que las áreas planas interiores presentan esfuerzos muy bajos ($< 1\times10^{-3}$ Pa), lo que indica un flujo casi uniforme lejos de las paredes.

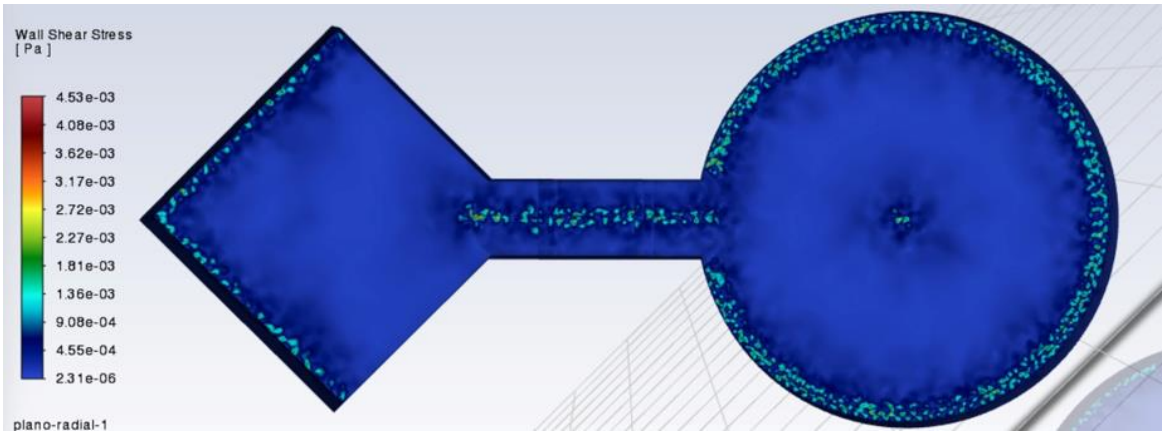


Ilustración 3.38 Esfuerzo cortante en pared

Asimismo, el contorno de energía cinética turbulenta (Ilustración 3.39) presenta valores máximos (≈3.06×10⁻² m²/s²) a lo largo del perímetro interior de la zona circular (rosa de los vientos), donde las recirculaciones inducen altos gradientes de velocidad. En la región del rombo (área de las palmeras) los valores son más bajos (≈1.5×10⁻² m²/s²) y uniformes, mientras que el conducto de transición muestra niveles intermedios de energía turbulenta, lo que confirma la efectividad del refinamiento de malla para capturar correctamente la generación y disipación de turbulencia en la conexión entre ambas geometrías.

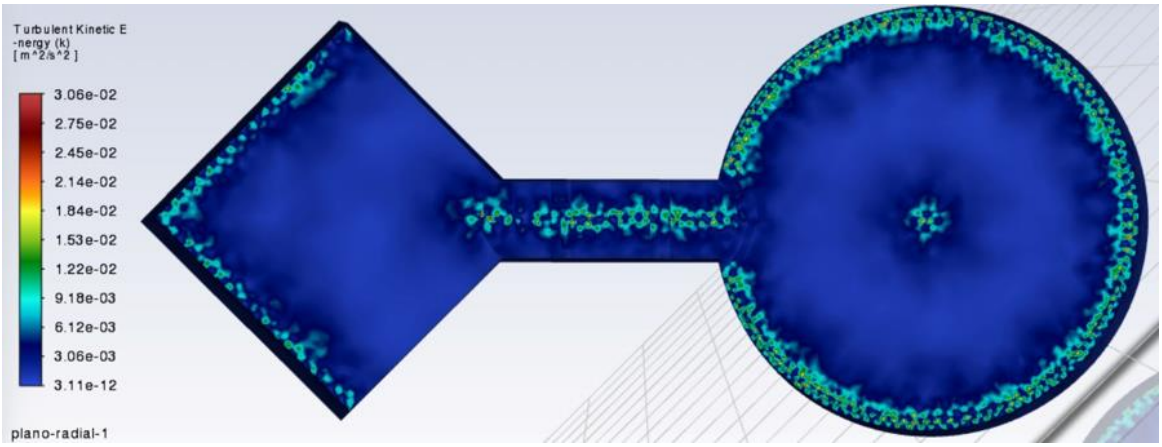


Ilustración 3.39 Energía cinética turbulenta

La representación de vectores coloreados según la magnitud de la velocidad radial presentados en la Ilustración 3.40 muestra velocidades positivas (hacia afuera) superiores a 0.73 m/s en el perímetro interior de la rosa de los vientos, donde las fuerzas centrífugas inducen un flujo de recirculación. En el conducto de transición hacia la zona de las palmeras las velocidades radiales oscilan entre –0.59 m/s y 0.36 m/s debido a cambios de sección y curvatura, mientras que en el área del rombo la velocidad radial se atenúa a valores cercanos a cero (±0.05 m/s) indicando un flujo mayormente tangencial sobre las palmeras. Estas variaciones certifican la influencia geométrica de la conexión en la distribución del flujo radial.

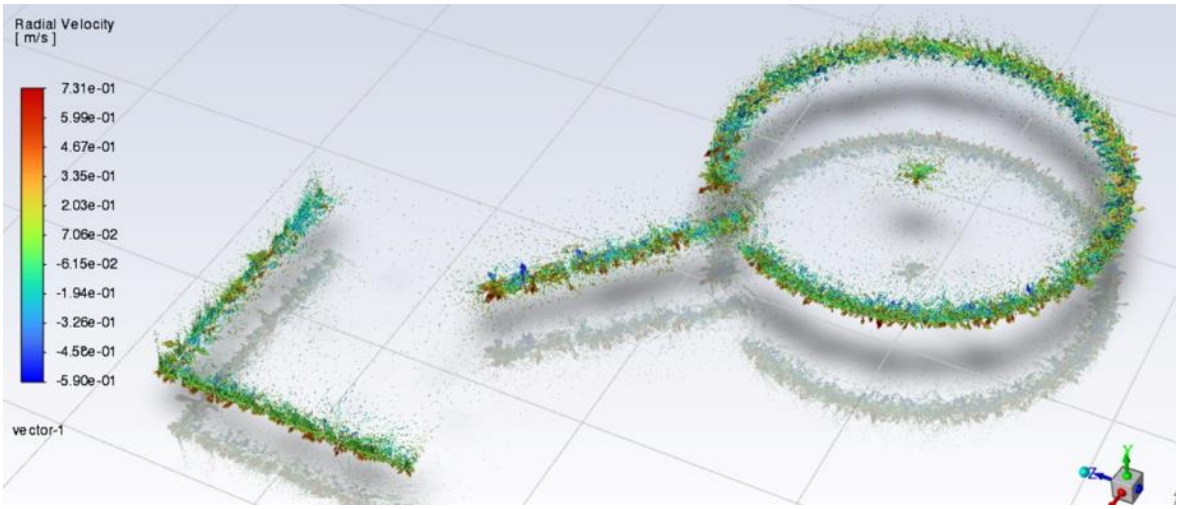


Ilustración 3.40 Distribución de velocidad radial

La curva presentada en la Ilustración 3.41 muestra el promedio ponderado por área de la magnitud de la velocidad en las bajantes a lo largo de 2100 iteraciones. Inicialmente, la velocidad desciende hasta un mínimo de 0.009 m/s en la iteración 800 debido al establecimiento del flujo en la conexión con la rosa de los vientos, para luego incrementarse progresivamente hasta estabilizarse alrededor de 0.18 m/s después de la iteración 1250. Las oscilaciones posteriores reflejan el equilibrio dinámico entre la descarga desde la zona de las palmeras y el flujo entrante, garantizando que el sistema de drenaje opere con velocidades adecuadas para evacuar el caudal de diseño sin generar turbulencias excesivas ni zonas de estancamiento. Estos resultados evidencian que el sistema hidráulico puede evacuar eficazmente el caudal correspondiente a la precipitación máxima de diseño sin generar zonas de estancamiento ni exceder los límites de velocidad admisibles.

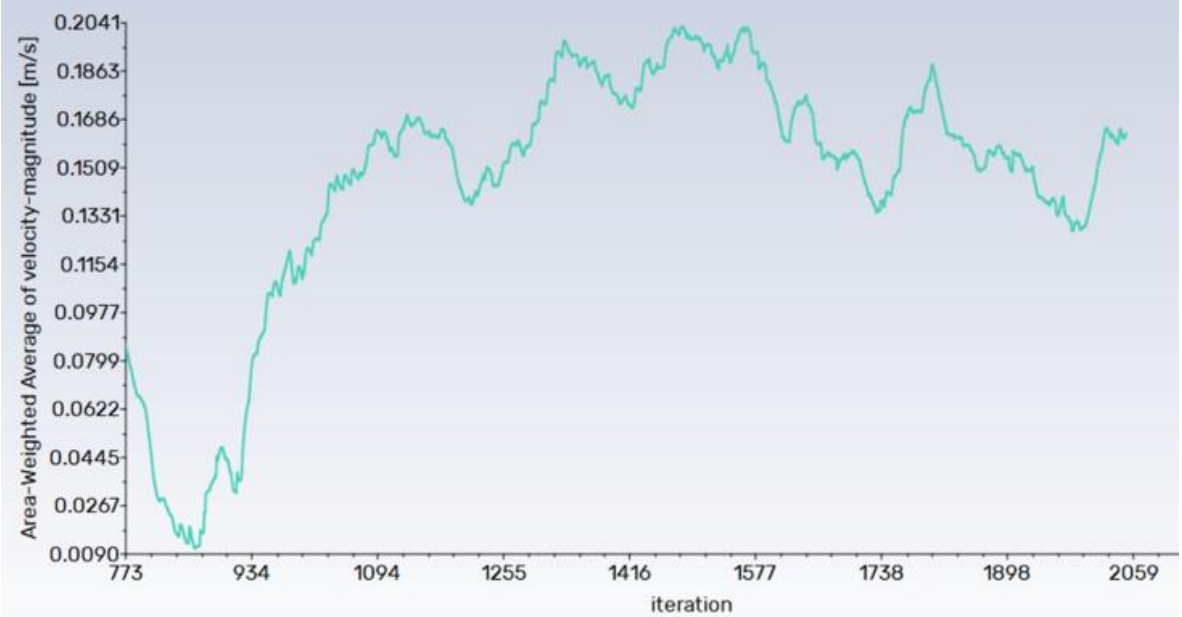


Ilustración 3.41 Evolución de la velocidad promedio en salidas del sistema de drenaje

El corte de muestreo mostrado en la Ilustración 3.42 recorre en primer lugar el área del rombo, correspondiente a la región de las palmeras, continúa a través del conducto de transición y finaliza en el círculo que define la rosa de los vientos. A lo largo de esta trayectoria se aprecia que la masa de película líquida permanece baja y casi constante en el tramo central del conducto (valores cercanos a 0.002 kg), mientras que incrementa de forma marcada al entrar en contacto con las superficies de las palmeras, alcanzando valores máximos de 0.008 kg en las esquinas del rombo. Al avanzar hacia la rosa de los vientos, la masa de película experimenta nuevas acumulaciones alrededor del perímetro interior del círculo, con picos de hasta 0.013 kg. Este comportamiento indica que las geometrías divergentes en los extremos favorecen la deposición y recirculación del film, mientras que el conducto uniforme facilita un drenaje eficiente con mínima retención de líquido.

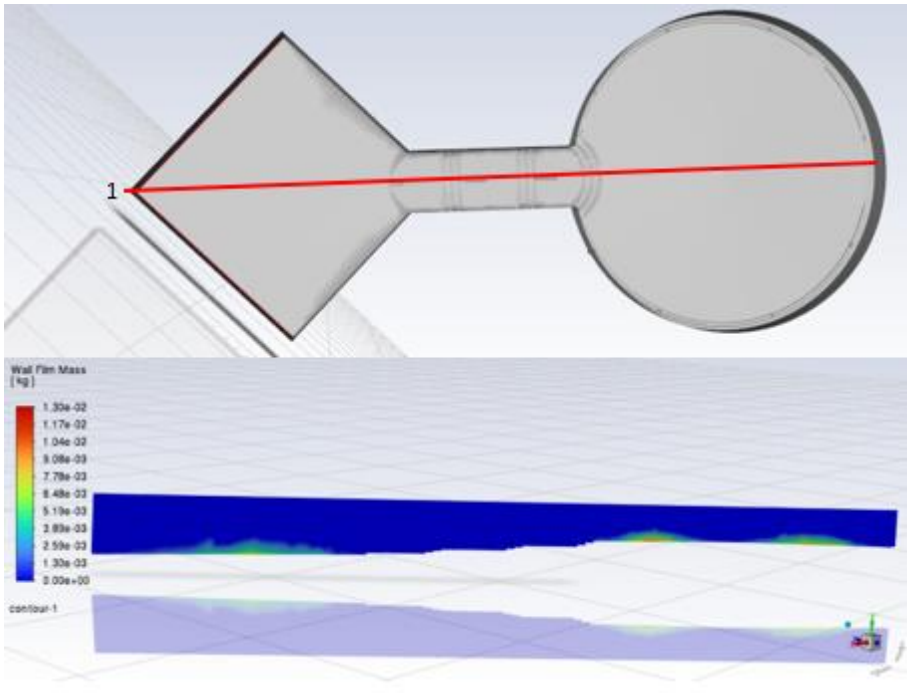


Ilustración 3.42 Sección longitudinal y masa de película sobre la línea de corte

Con el objetivo de apreciar el comportamiento hidrodinámico del sistema ee han definido once secciones que parten desde el centro de la rosa de los vientos, distribuyéndose de manera radial y numerándose de 3 a 10 alrededor del perímetro antes de conectar con el conducto de transición (sección 2) y continuar hacia la región de las palmeras (sección 11). Cada uno de estos cortes permite analizar variables locales, como el espesor de película líquida o la velocidad radial, a diferentes ángulos respecto al eje principal. El patrón radial reproduce la influencia de la geometría curva sobre la distribución del flujo, capturando tanto las recirculaciones internas en la rosa de los vientos como las heterogeneidades de deposición en las superficies planas y anguladas del rombo. Esta disposición de secciones contribuye a la obtención de perfiles comparativos que evidencian cómo el diseño de la conexión modula los fenómenos de transporte en ambas zonas (Ilustración 3.43).

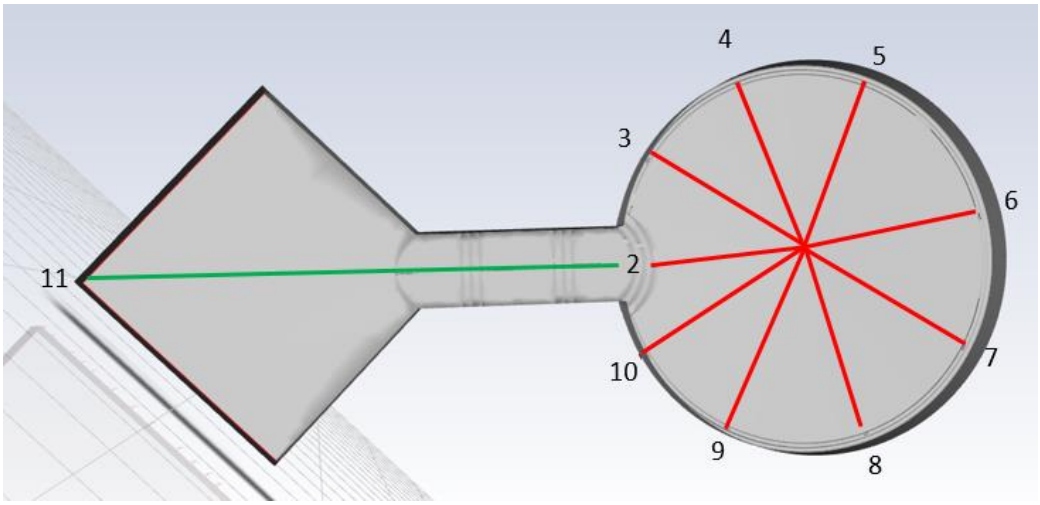


Ilustración 3.43 Trazado de secciones radiales desde la rosa de los vientos hacia el área de palmeras

Los gráficos superiores presentados en la Ilustración 3.44, muestran la variación de la velocidad del film (m/s) y la masa de película líquida (kg) a lo largo de la sección 2, que conecta directamente la rosa de los vientos con el área de palmeras. La velocidad del film se mantiene casi constante y muy baja (< 0.002 m/s) en todo el tramo recto, lo que indica un flujo laminar y un drenaje continuo. En contraste, la masa de película aumenta progresivamente desde 0 kg en el inicio de la sección, alcanzando un máximo de 0.012 kg en el punto de transición hacia el volumen circular, lo que confirma la acumulación de líquido en la interfase entre la conexión curva y la rosa de los vientos. Por otro lado, los gráficos inferiores ilustran la altura del film (m) sobre la misma sección 2 y la magnitud de la velocidad del film en la sección 3 (otro corte radial dentro de la rosa de los vientos). La altura del film presenta un pico inicial de 1.5×10^{-4} m en el comienzo del conducto, seguido de una caída a valores estables cercanos a 2×10^{-5} m, lo cual refleja la formación y posterior drenaje del film antes de ingresar a la rosa de los vientos. La velocidad del film en la sección 3 permanece casi nula (< 0.001 m/s) hasta el final de la curva, donde aumenta bruscamente a 0.013 m/s en el perímetro de la rosa de los vientos, evidenciando la influencia de la geometría circular sobre el desplazamiento superficial.

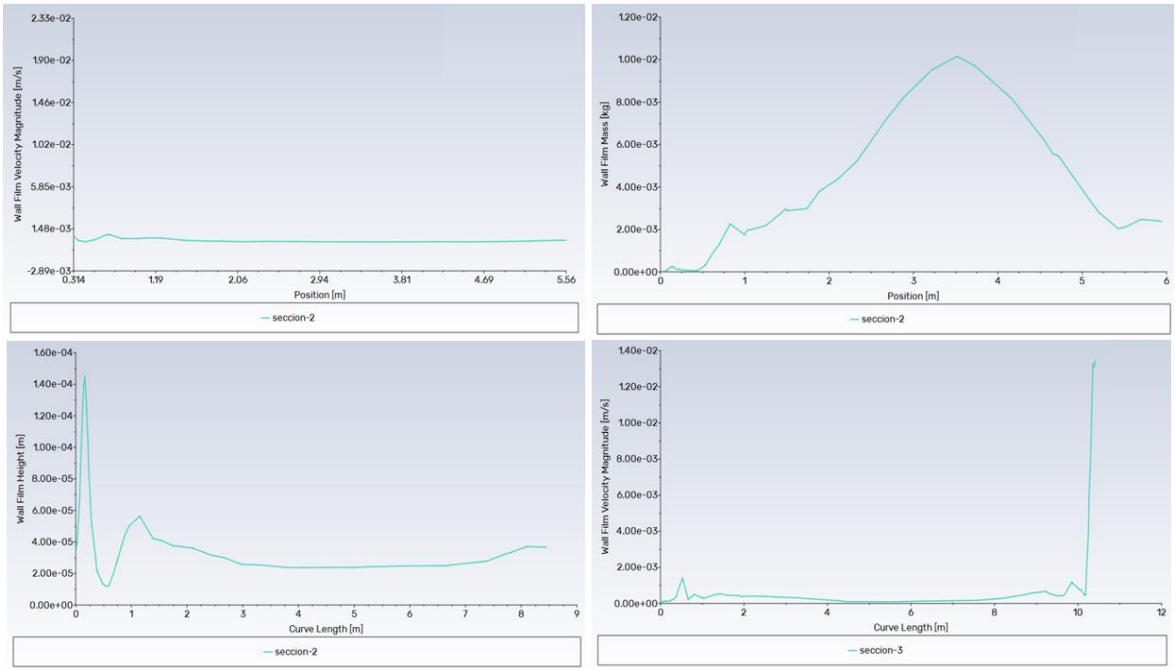


Ilustración 3.43 Perfiles longitudinales de película líquida y flujo sobre secciones radiales

La velocidad del film sobre la sección 4 presenta un valor máximo de 2.0×10^{-3} m/s en la unión entre el conducto de transición y el perímetro interior de la rosa de los vientos, seguido de una disminución gradual hasta valores cercanos a cero en el tramo medio de la curva, lo que indica una desaceleración del flujo superficial antes de alcanzar el área de las palmeras. Hacia el extremo de la sección, la velocidad aumenta nuevamente hasta 2.1×10^{-3} m/s en el punto de salida de la rosa de los vientos.

La masa de película a lo largo de la misma sección crece de forma casi lineal desde 0 kg en el inicio del corte hasta un máximo de 7.5×10^{-3} kg en el punto de máxima curvatura dentro de la zona circular, evidenciando acumulación de film en la rosa de los vientos. A partir de ese pico, la masa decrece progresivamente hasta valores inferiores a 1.0×10^{-3} kg al acercarse al área de las palmeras, reflejando el drenaje efectivo a través del conducto y la menor retención en el rombo.

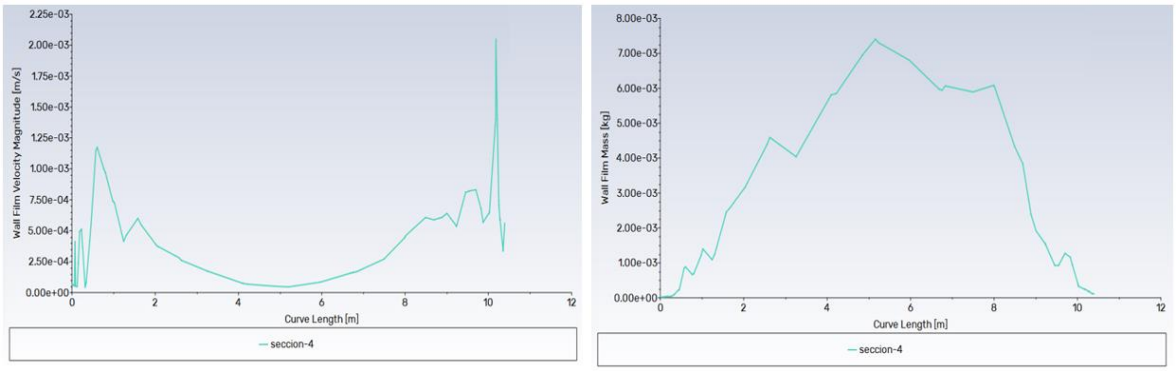


Ilustración 3.44 Perfil de película líquida en la sección 4

Además, la Ilustración 3.45 presenta el comportamiento de la velocidad del film en la sección 5 alcanza picos de 1.5×10^{-3} m/s en la zona de entrada a la rosa de los vientos y disminuye progresivamente hasta valores mínimos inferiores a 2×10^{-4} m/s en el tramo medio del conducto, lo que indica un régimen laminar estable lejos de las superficies curvas. Hacia el final de la sección, la velocidad vuelve a elevarse hasta 1.6×10^{-3} m/s en el perímetro del círculo, reflejando la aceleración superficial inducida por la geometría circular.

La masa de película líquida crece desde 0 kg en el inicio del corte hasta un máximo de 8.5×10^{-3} kg cerca del 40 % de la longitud de la curva, donde la acumulación sobre la rosa de los vientos es más intensa. A partir de ese punto, la masa disminuye de forma continua, alcanzando valores por debajo de 1×10^{-3} kg al acercarse al área de las palmeras, lo que demuestra un drenaje efectivo a lo largo del conducto de transición.

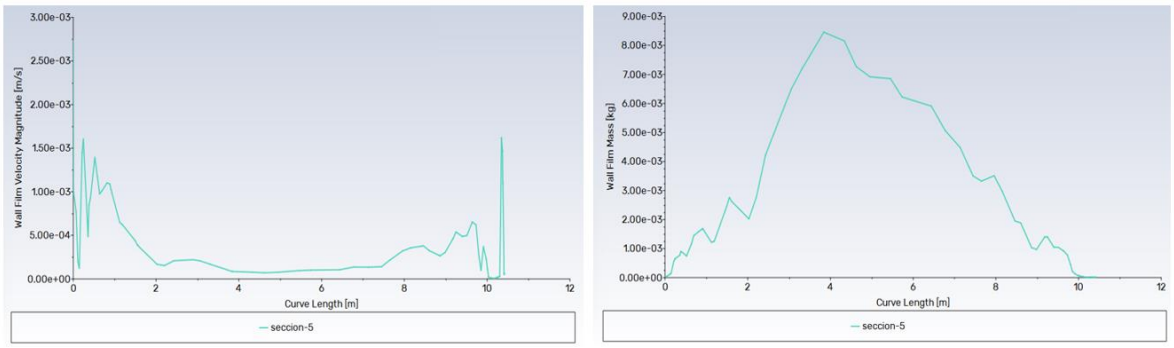


Ilustración 3.45 Perfil de película líquida en la sección 5

El gráfico de velocidad del film (Ilustración 3.46) revela un pico inicial de 9.0×10^{-3} m/s en la transición inmediata a la rosa de los vientos, seguido de una reducción sostenida por debajo de 1.0×10^{-3} m/s a lo largo del conducto de transición, lo que confirma un flujo laminar con fricción predominante en las superficies planas. Hacia el extremo próximo al área de las palmeras, la velocidad vuelve a incrementarse hasta 5.5×10^{-3} m/s, indicando reactivación del film al encontrarse con la geometría angular del rombo. El perfil de masa de película muestra un incremento gradual desde 0 kg en la salida de la rosa de los vientos hasta un máximo de 7.8×10^{-3} kg en el punto de máxima curvatura de la sección, lo que evidencia acumulación de film en el perímetro interno. Posteriormente, la masa disminuye de manera continua hasta valores inferiores a 1.0×10^{-3} kg al acercarse al área de las palmeras, validando un drenaje eficiente a lo largo del tramo de conexión.

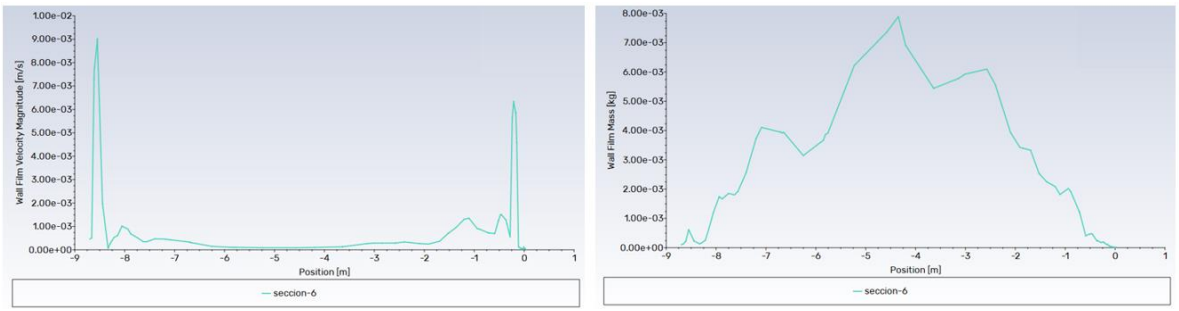


Ilustración 3.46 Perfil de película líquida en la sección 6

En la sección 7 mostrada en la Ilustración 3.47, el perfil de velocidad del film presenta un incremento pronunciado hasta 7.0×10^{-3} m/s en el punto inicial, seguido de un decrecimiento sostenido por debajo de 1.0×10^{-3} m/s a lo largo del conducto y un segundo pico cercano a 7.5×10^{-3} m/s al salir de la rosa de los vientos. Este comportamiento refleja la influencia de la geometría circular en la aceleración inicial del film y la posterior disipación por fricción antes de la reactivación superficial en la zona angular. Por su parte, la masa de película líquida aumenta gradualmente desde 0 kg en el extremo de la conexión hasta alcanzar un máximo de 9.2×10^{-3} kg en el punto de máxima curvatura dentro de la rosa de los vientos, descendiendo después hasta valores próximos a cero al aproximarse al área de las palmeras, lo que confirma un patrón de acumulación y drenaje controlado por el diseño geométrico de ambos volúmenes.

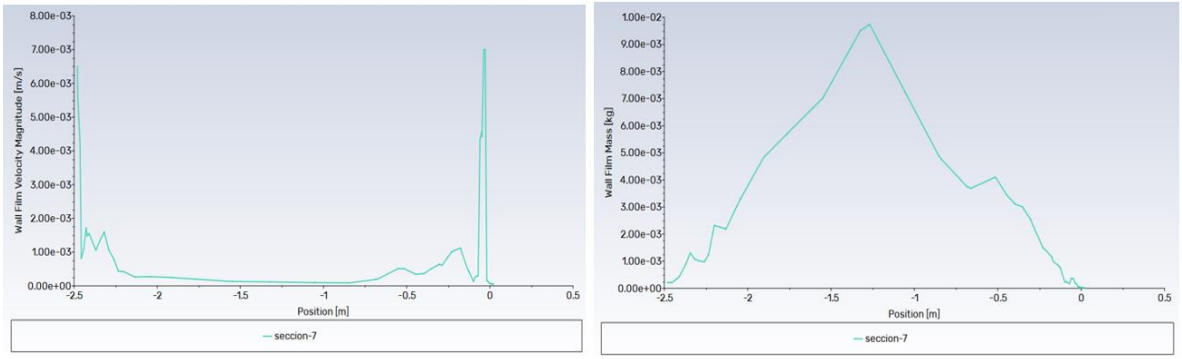


Ilustración 3.47 Perfil de película líquida en la sección 7

De igual forma, para la sección 8 (Ilustración 3.48), la velocidad del film alcanza un valor máximo de 1.8×10^{-3} m/s justo después de salir de la rosa de los vientos, seguida de un descenso uniforme por debajo de 5.0×10^{-4} m/s en el tramo medio del conducto, antes de experimentar una segunda aceleración hasta 3.8×10^{-3} m/s al aproximarse al área de las palmeras. La masa de película crece de forma continua desde prácticamente 0 kg en el inicio del corte hasta un pico de 8.2×10^{-3} kg en el 55 % de la longitud, correspondiente al punto de máxima curvatura dentro de la zona circular, y luego disminuye progresivamente hasta 1.2×10^{-3} kg al alcanzar la región del rombo.

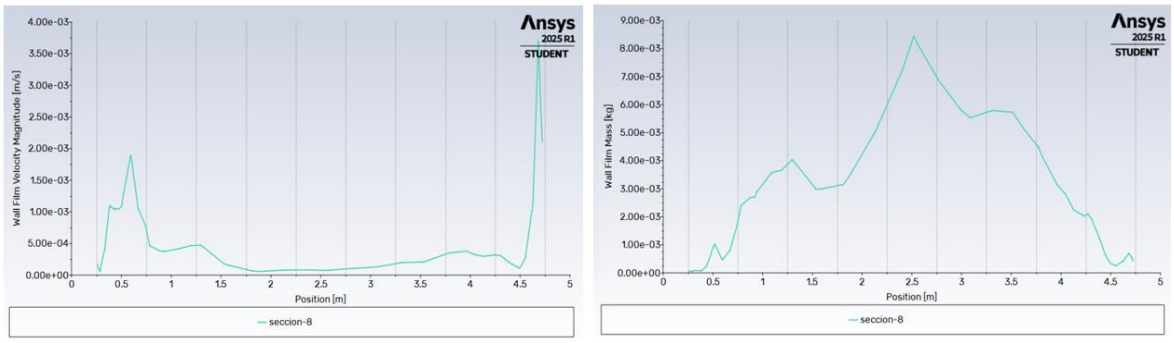


Ilustración 3.48 Perfil de película líquida en la sección 8

Por otro lado, en la sección 9, el perfil de velocidad del film presenta un primer aumento hasta 6 × 10^{-4} m/s en la entrada al conducto de transición, seguido de un descenso rápido a valores constantes por debajo de 1 × 10^{-4} m/s en el tramo intermedio (Ilustración 3.49). Hacia el extremo cercano a la estructura circular, la velocidad vuelve a elevarse hasta 7 × 10^{-4} m/s, coincidiendo con la zona de mayor curvatura antes de la rosa de los vientos. Por su parte, la masa de película comienza próxima a cero en el inicio de la sección, aumenta progresivamente hasta alcanzar un máximo de 1.0 × 10^{-2} kg en el punto medio de la curva, donde la superficie circular ejerce mayor retención, y luego disminuye de forma escalonada hasta 1.5 × 10^{-3} kg al acercarse al área de las palmeras, evidenciando zonas de depósito preferente en los tramos curvos y un drenaje continuo en los segmentos rectos.

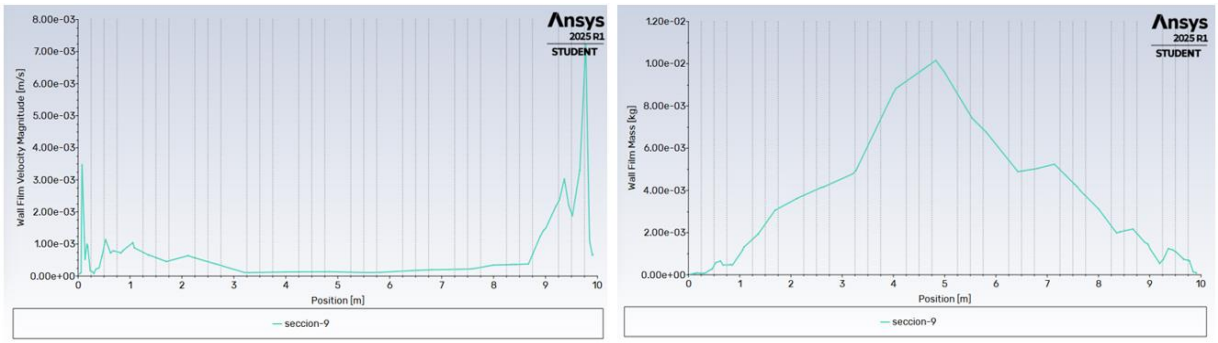


Ilustración 3.49 Perfil de película líquida en la sección 9

La velocidad del film en la sección 10 (Ilustración 3.50) alcanza un valor máximo de 7.8×10^{-3} m/s en la proximidad inmediata a la salida de la rosa de los vientos, seguido por un descenso abrupto hasta niveles por debajo de $5{,}0\times10^{-4}$ m/s en el tramo central del conducto de transición. Hacia el final del recorrido, al aproximarse al área de las palmeras, se registra un leve repunte de la velocidad alrededor de 1.2×10^{-3} m/s, lo que sugiere una reactivación superficial causada por la geometría angular del rombo. En cuanto a la masa de película líquida, empieza cercana a cero en la unión con la rosa de los vientos y crece gradualmente a 3.0×10^{-3} kg en el primer tercio de la curva. A partir de ese punto, la masa se eleva con mayor pendiente hasta un pico de 9.0×10^{-3} kg en torno a la mitad de la sección, coincidiendo con la zona de máxima curvatura, y disminuye progresivamente hasta 1.5×10^{-3} kg al ingresar al área de las palmeras, lo que pone de manifiesto los efectos combinados de la expansión circular y la contracción angular sobre la acumulación del film.

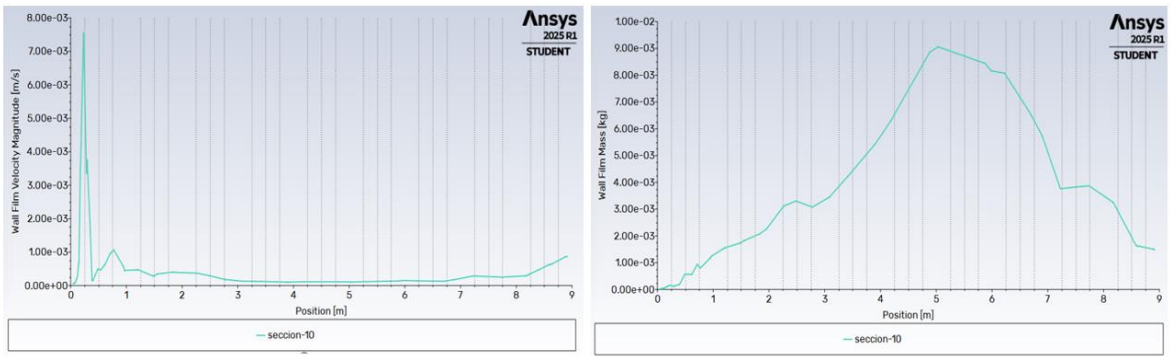


Ilustración 3.50 Perfil de película líquida en la sección 10

Finalmente, en la sección 11 mostrada en la Ilustración 3.51, la cual atraviesa el área de las palmeras, la velocidad del film se mantiene prácticamente nula ($\approx1\times10^{-4}$ m/s) a lo largo de todo el tramo recto, hasta un repunte final de 1.6×10^{-3} m/s en la unión con el conducto de transición. Este comportamiento sugiere una fricción elevada sobre las superficies planas y angulosas del rombo, resultando en un drenaje lento y uniforme.

La masa de película comienza en cero al inicio de la sección y se incrementa de forma continua hasta alcanzar un máximo de 5.4×10^{-3} kg en la zona media, donde la confluencia de flujos provenientes de la rosa de los vientos provoca deposición acumulada. Posteriormente, la masa desciende gradualmente hacia el extremo opuesto, indicando una evacuación progresiva del film hacia el conducto de salida.

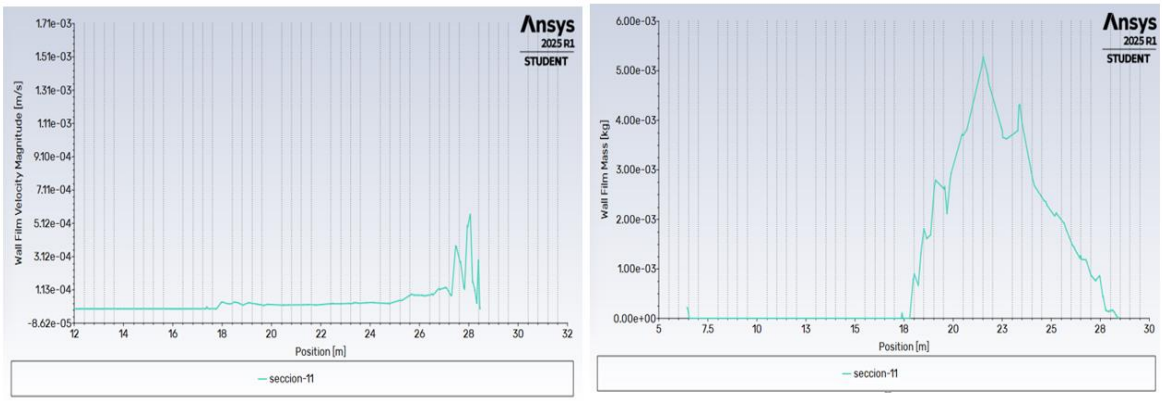


Ilustración 3.51 Perfil de película líquida en la sección 11

3 CONCLUSIONES

Se utilizó la información XYZ proveniente del levantamiento LiDAR para definir los vértices y generar manualmente las superficies que delimitan los volúmenes, dado que la nube original carecía de mallas superficiales o volumétricas consolidadas y no presentaba conectividad explícita entre puntos. La interpolación de dicha nube produjo huecos y solapamientos, por lo que reconstruimos la geometría empleando únicamente las coordenadas LiDAR depuradas como guía. A continuación, se aplicó un mallado tetraédrico de 2 mm con 12 capas de inflación (Y+ controlado, growth rate 1.3), utilizamos el modelo de turbulencia k-ω SST, discretización Second Order Upwind y el esquema PISO en un solver transitorio pressure-based (Δt adaptativo, Courant < 1, residuales de masa < 1×10^{-3} y de momentum/VOF/turbulencia < 1×10^{-4}), garantizando así la precisión del modelo multifásico y lagrangiano y validando la solidez de la simulación para estudios de escurrimiento superficial y diseño de drenaje pluvial.

El flujo superficial de la película líquida presenta acumulaciones máximas en el perímetro interior de la rosa de los vientos (hasta 0.013 kg) y en las esquinas del rombo (0.008 kg), lo que confirma que las geometrías divergentes favorecen la deposición y recirculación del film, mientras que el conducto uniforme (0.002 kg) asegura un drenaje eficiente. El mallado adaptativo con capas de inflación (0.8 mm–12 mm) y criterios de relación de aspecto < 5 y skewness < 0.8 garantiza la estabilidad numérica y permite resolver con precisión los gradientes de presión y las recirculaciones en la conexión curva entre la rosa de los vientos y el área de las palmeras.

La selección del modelo k–omega SST con corrección “Production Limiter” y Prandtl turbulento diferenciado (Pr_t(inner)=1.176; Pr_t(outer)=1.0) optimiza el tratamiento de la capa límite y asegura la convergencia (residuos < $1\cdot10^{-3}$ tras 800 iteraciones) en zonas de separación y recirculación. Asimismo, la aplicación del DPM evidencia tiempos de residencia de partículas entre 0.0003 s y 2.05 s, con transporte eficaz sin sedimentación diferencial significativa, validando la coherencia física del modelo para estudios de transporte de fase dispersa en el sistema hidráulico.

El análisis de la velocidad promedio en las bajantes y la distribución de masa de película demuestra que, incluso bajo el caudal de diseño máximo, el flujo superficial se evacua sin generar acumulaciones críticas ni zonas de estancamiento en la unión entre la rosa de los vientos y la zona de palmeras; la velocidad media se mantiene por encima de 0.15 m/s después de la iteración 1250, lo que garantiza una remoción continua del líquido y confirma la capacidad hidráulica del sistema de drenaje existente.

Finalmente, la interacción geométrica entre la estructura circular (rosa de los vientos) y el rombo (área de las palmeras) optimiza el transporte del caudal: la expansión y recirculación inicial en el perímetro interior de la rosa favorece la disipación de energía, mientras que el conducto uniforme conduce el flujo hacia la zona de palmeras sin pérdidas significativas de carga, validando que el diseño actual soporta adecuadamente el caudal de diseño.

Descarga memorias modelación CFD:

https://drive.google.com/drive/folders/1jwD1oCT1es31oPYBkWs-vG1Y6L7VzSHV?usp=sharing

4 BIBLIOGRAFÍA

- Código Colombiano de Fontanería, NTC 1500 sexta edición, 2023.