

Trabajo Fin de Máster

Máster en Ingeniería Aeronáutica

Manual de FloEFD para análisis de dinámica de fluidos y aplicaciones prácticas

Autor: Sandra Sánchez Ligeró

Tutor: Francisco Valderrama Gual

Dep. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Máster
Máster en Ingeniería Aeronáutica

Manual de FloEFD para análisis de dinámica de fluidos y aplicaciones prácticas

Autor:

Sandra Sánchez Ligeró

Tutor:

Francisco Valderrama Gual
Profesor Titular de Universidad

Dep. de Ingeniería Gráfica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2017

Trabajo Fin de Máster: Manual de FloEFD para análisis de dinámica de fluidos y aplicaciones prácticas

Autor: Sandra Sánchez Ligeró

Tutor: Francisco Valderrama Gual

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

No ha sido fácil llegar hasta aquí, pero no he estado sola. Me gustaría rendir homenaje a todas las personas que han participado en esta locura de alguna u otra forma, aunque unas simples palabras no basten.

En primer lugar, debo dar las gracias a mi familia. A mis padres, por toda la inversión, los apoyos y la confianza depositada en mí. Por estar en las buenas, en las no tan buenas y en las peores. En definitiva, por hacer de mí la Ingeniera Aeronáutica que soy. Os lo debo todo.

A mi tutor Francisco Valderrama Gual por embarcarse conmigo en esta aventura. Su ejemplo de dedicación, paciencia y profesionalidad han hecho apasionarme desde el primer día con el proyecto y disfrutar al máximo en su desarrollo.

A mi compañero de vida, Samuel, por ser el monstruo de la motivación cada día, y a mi mejor amigo, Alfonso, por ser la familia que he elegido.

Por último, gracias a la ETSI por enseñarme a crecer en todos los sentidos. Le debo las risas con los trabajadores de copistería, los batidos de fresa en cafetería, y la mejor tripulación que pude imaginar, mis compañeros de clase.

Sandra Sánchez Ligeró

Sevilla, 2017

Resumen

Actos tan cotidianos como tomar una ducha, respirar o beber agua, requieren necesariamente la circulación de fluidos. El conocer y entender los principios básicos de la mecánica de fluidos es esencial en el análisis y diseño de cualquier sistema en el cual el fluido es el elemento de trabajo.

Para la mayoría de los problemas de mecánica de fluidos, la solución se obtiene mediante métodos matemáticos, y aquí es donde entra en juego la mecánica de fluidos computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics), una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias.

El presente Trabajo Fin de Máster recoge a modo de guía una herramienta computacional de análisis de dinámica de fluidos que está integrada en CATIA V5: **FloEFD**. La guía recoge las funciones básicas del programa con la ayuda de un ejemplo ilustrativo. Al final del documento, se añade un ejemplo didáctico más complejo para analizar con más detalle el alcance de este software.

Índice general

1. Introducción	12
1.1. Mecánica de Fluidos	12
1.1.1. Definición	12
1.1.2. ¿Qué es un fluido?	13
1.1.3. Ecuaciones de Navier-Stokes	14
1.2. CFD	15
1.2.1. El proceso de CFD	16
1.2.2. Etapas de un análisis CFD	16
1.2.3. Discretización espacial	17
1.3. Objetivo del proyecto	19
2. Cómo crear un proyecto FloEFD	21
2.1. Apertura del conjunto	21
2.2. Configuración del asistente	22
2.2.1. Project Name	23
2.2.2. Unit System	24
2.2.3. Analysis Type	25
2.2.4. Default Fluid	28
2.2.5. Default Solid	30
2.2.6. Wall Conditions	31
2.2.7. Initial Conditions	32
2.3. Comprobación del modelo	34
2.4. Cambios en la configuración	37
3. Árbol de FloEFD	38
3.1. Computational Domain	38
3.2. Fluid Subdomains	41
3.3. Boundary Conditions	43
3.3.1. Condiciones de contorno generales	43
3.3.1.1. Caudal másico, volumétrico o velocidad	44
3.3.1.2. Presiones	45
3.3.1.3. Condiciones de pared	45
3.3.2. Otras condiciones de contorno	46
3.3.2.1. Fan	46
3.3.2.2. Heat Source	47
3.3.2.3. Solid Material	48
3.4. Goals	50
3.5. Mesh	53
3.5.1. Global Mesh	53
3.5.1.1. Automatic Mesh	53
3.5.1.2. Manual Mesh	55
3.5.2. Local Mesh	57

3.6. Results	58
4. Visualización de resultados	60
4.1. Solver	60
4.2. Mesh	64
4.3. Cut Plot	65
4.3.1. Barra de colores	66
4.4. Surface Plot	67
4.5. Isosurfaces	67
4.6. Flow Trajectories	68
4.7. Particle Studies	69
4.8. Point Parameters	70
4.9. Surface Parameters	70
4.10. Volume Parameters	72
4.11. XY Plots	72
4.12. Goal Plots	73
4.13. Report	74
4.14. Animations	75
4.15. Export Results	75
4.16. Customize tree	76
5. Aplicaciones prácticas	77
5.1. Intercambiador de calor	77
5.1.1. Apertura del conjunto	78
5.1.2. Configuración del asistente	78
5.2. Árbol de FloEFD	79
5.2.1. Computational Domain	79
5.2.2. Fluid Subdomains	79
5.2.3. Boundary Conditions	80
5.2.4. Goals	80
5.2.5. Mesh	81
5.3. Results	81
5.3.1. Cut Plot	81
5.3.2. Flow Trajectories	82
5.3.3. Surface Parameters	83
5.3.4. Cálculo de la eficiencia	83
6. Conclusiones	84
7. Bibliografía	85

Índice de figuras

1. Introducción	12
Figura 1.1. Flujo alrededor de aeronaves	12
Figura 1.2. Fluidos sometidos a esfuerzos cortantes	13
Figura 1.3. Ejemplos prácticos de CFD	15
Figura 1.4. Malla ortogonal	17
Figura 1.5. Malla no ortogonal	17
Figura 1.6. Mallado no estructurado	18
2. Cómo crear un proyecto FloEFD	21
Figura 2.1. Apertura del módulo	21
Figura 2.2. Apertura del conjunto	21
Figura 2.3. Válvula de bola despiezada	22
Figura 2.4. Apertura del asistente	22
Figura 2.5. Ventana Project Name	23
Figura 2.6. Ventana Navigator	24
Figura 2.7. Apertura de la configuración de unidades	24
Figura 2.8. Ventana Unit System	25
Figura 2.9. Ventana Analysis Type	25
Figura 2.10. Tapas para análisis interno	26
Figura 2.11. Aplicación de transparencia para las tapas	26
Figura 2.12. Ventana Default Fluid	28
Figura 2.13. Ventana Engineering Database	29
Figura 2.14. Ventana Default Solid	30
Figura 2.15. Pestaña de Engineering Database	30
Figura 2.16. Ventana Wall Conditions	31
Figura 2.17. Ventana Initial Conditions	32
Figura 2.18. Ventana Dependency	33
Figura 2.19. Warning por ausencia de tapas	34
Figura 2.20. Ventana Create Lids	34
Figura 2.21. Warning para reiniciar configuración de la malla	35
Figura 2.22. Ventana Check Geometry	35
Figura 2.23. Posibles warnings de Check Geometry	36
Figura 2.24. Volumen fluido en la válvula	36
Figura 2.25. Ventana General Settings	37
3. Árbol de FloEFD	38
Figura 3.1. Árbol de FloEFD	38
Figura 3.2. Ventana Computational Domain	39
Figura 3.3. Computational Domain de la válvula	39
Figura 3.4. Pestaña de Size and Conditions	40
Figura 3.5. Computational Domain simétrico	40
Figura 3.6. Ventana Fluid Subdomains	41

Figura 3.7. Volumen fluido del intercambiador	42
Figura 3.8. Ventana Boundary Conditions	43
Figura 3.9. Pestaña Flow Parameters	44
Figura 3.10. Pestaña Thermodynamic Parameters	45
Figura 3.11. Pestaña Wall Parameters	45
Figura 3.12. Ventana Fan	46
Figura 3.13. Ventana Volume Source	47
Figura 3.14. Ventana Surface Source	48
Figura 3.15. Ventana Solid Material	49
Figura 3.16. Condiciones de contorno aplicadas	49
Figura 3.17. Tipos de goals	50
Figura 3.18. Ventana Surface Goals	51
Figura 3.19. Opción create goal for each surface	52
Figura 3.20. Ventana Equation Goal	52
Figura 3.21. Ventana Global Mesh Settings	53
Figura 3.22. Ejemplos Level of Initial Mesh	54
Figura 3.23. Ejemplos de Minimum Gap Size	54
Figura 3.24. Show Basic Mesh	55
Figura 3.25. Advanced Channel Refinement	55
Figura 3.26. Manual Mesh	55
Figura 3.27. Control Planes	56
Figura 3.28. Ejemplo del parámetro Channel	56
Figura 3.29. Ventana Local Mesh Settings	57
Figura 3.30. Ventana Run	58
Figura 3.31. Ventana Batch Run	58
4. Visualización de resultados	60
Figura 4.1. Árbol de Results	60
Figura 4.2. Ventana Solver	61
Figura 4.3. Ventana Insert Goal Plot	61
Figura 4.4. Resultado Goal Plot	62
Figura 4.5. Ventana Preview Settings	62
Figura 4.6. Contornos, isolíneas y vectores del plano XZ	63
Figura 4.7. Ventana Model Transparency	63
Figura 4.8. Representación del mallado según nivel de refinamiento	64
Figura 4.9. Ventana Mesh	64
Figura 4.10. Cut Plot del plano XZ	65
Figura 4.11. Plano XZ con contorno, líneas de corriente y vectores	65
Figura 4.12. Ventana Appearance	66
Figura 4.13. Ventana Color Bar	66
Figura 4.14. Ventana Surface Plot y resultados	67
Figura 4.15. Ventana Isosurfaces y resultados	68
Figura 4.16. Ventana Flow Trajectories y resultados	68
Figura 4.17. Ventana Particle Studies y resultados	69
Figura 4.18. Ventana Point Parameters y resultados	70
Figura 4.19. Ventana Surface Parameters	71

Figura 4.20. Resultados de los parámetros	71
Figura 4.21. Ventana de Volume Parameters y resultados	72
Figura 4.22. Ventana de XY Plots y vista del Sketch	73
Figura 4.23. Gráficos XY	73
Figura 4.24. Ventana Goal Plot	74
Figura 4.25. Resultados en Excel	74
Figura 4.26. Ventana Animation Wizard	75
Figura 4.27. Ventana Export Results	75
Figura 4.28. Ventana Customize Tree	76
5. Visualización de resultados	77
Figura 5.1. Intercambiador de calor	78
Figura 5.2. Ventana Fluid Subdomain y dominio fluido	79
Figura 5.3. Aplicación de condiciones de contorno	80
Figura 5.4. Temperatura en el plano medio	81
Figura 5.5. Líneas de corriente en el rango por defecto	82
Figura 5.6. Líneas de corriente en un rango determinado	82

Índice de tablas

2. Cómo crear un proyecto FloEFD	21
Tabla 2.1. Valores predeterminados	23
Tabla 2.2. Valores de ejemplo	33
5. Aplicaciones prácticas	77
Tabla 5.1. Configuración del asistente	78
Tabla 5.2. Condiciones de contorno	80
Tabla 5.3. Goals	80
Tabla 5.4. Mesh	81
Tabla 5.5. Parámetros en la salida del agua	83

Capítulo 1

Introducción

El estudio de la mecánica de fluidos puede ayudarnos tanto para comprender la complejidad del mundo natural, como para mejorar el mundo que hemos creado. Hoy en día, el diseño de todos los medios de transporte requiere la aplicación de la mecánica de fluidos. Entre éstos se incluyen tanto los aviones como máquinas terrestres, barcos, submarinos y típicamente automóviles. Incluso el sistema de circulación del cuerpo humano es un sistema fluido; de ahí que los diseños de corazones artificiales, máquinas de diálisis, ayudas respiratorias y otros aparatos de este tipo estén basados en los principios de la mecánica de fluidos.

Si bien la mecánica de fluidos está siempre presente en nuestra vida cotidiana, lo que nos falta conocer es cómo se expresa esta información en términos cuantitativos, o la manera en que se diseñan sistemas con base en este conocimiento. En este apartado del proyecto se da una breve introducción acerca de esta rama de la física, así como de las aplicaciones informáticas de soporte que usaremos. Al final del capítulo se describen el objetivo y la estructura del proyecto.

1.1. Mecánica de fluidos

1.1.1. Definición

La mecánica de fluidos es la parte de la física que se interesa en el estudio del movimiento de fluidos, (líquidos o gases), tales como el estudio del aire al atravesar un motor de reacción, el movimiento de un líquido como el petróleo, el flujo alrededor de un rascacielos o alrededor de un ala en un vuelo supersónico.

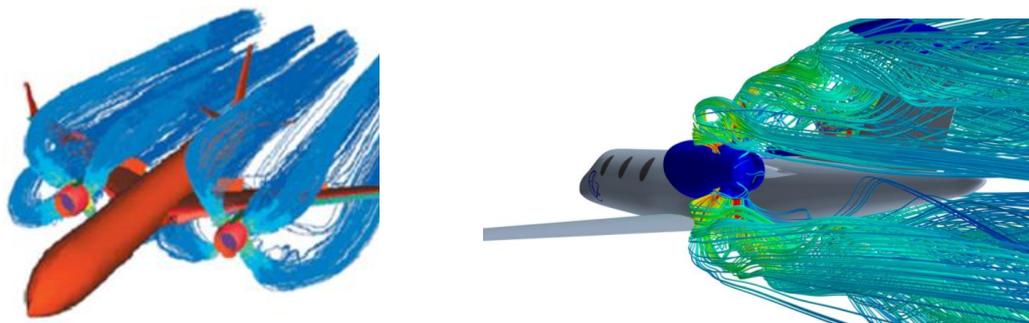


Figura 1.1. Flujo alrededor de aeronaves

1.1.2. ¿Qué es un fluido?

La propiedad fundamental que caracteriza a los fluidos es que carecen de rigidez y en consecuencia se deforman fácilmente. Por este motivo, la fluidez, resultan infinitamente más complejos de analizar que los sólidos, capaces de resistir esfuerzos cortantes o tangenciales. Mientras que en un sólido se produce un cambio fijo γ para cada valor de la fuerza constante aplicada, un fluido cambia de forma de manera continua cuando está sometido a un esfuerzo cortante, por muy pequeño que sea éste. Es decir, un fluido no es capaz de soportar un esfuerzo cortante sin moverse durante ningún intervalo de tiempo.

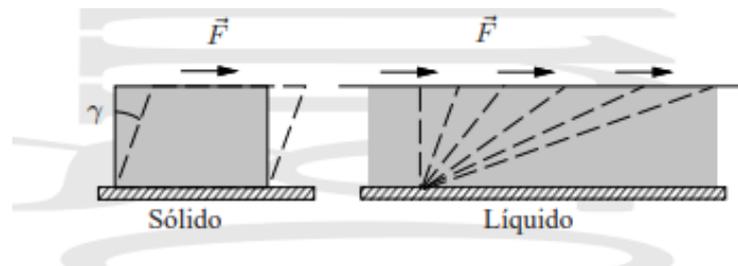


Figura 1.2. Fluidos sometidos a esfuerzos cortantes

Dentro de los fluidos, la principal diferencia entre líquidos y gases estriba en las distintas compresibilidades de los mismos:

- **Gases.** Los gases presentan una gran compresibilidad, que influye sobre las características del flujo, ya que tanto el volumen como la densidad varían con facilidad. En el caso de los gases el movimiento térmico vence a las fuerzas atractivas y, por tanto, tienden a ocupar todo el volumen del recipiente que los contiene.
- **Líquidos.** En el caso de los líquidos, la compresibilidad es muy débil. Esto es debido a que las fuerzas atractivas entre las moléculas del líquido vencen al movimiento térmico de las mismas, colapsando las moléculas y formando el líquido. Al contrario que en el caso de los gases, que tendían a ocupar todo el volumen que los contiene, los líquidos tienen a formar una superficie libre.

A pesar de hablar de moléculas, las escalas que son de interés en mecánica de fluidos son enormes en comparación con el tamaño característico molecular, y por esta razón imaginamos al fluido como si fuera un continuo en el espacio en vez de un conjunto muy grande de átomos más o menos dispersos. Esta hipótesis, llamada **hipótesis de medio continuo**, nos permite trabajar con valores continuos de las variables en vez de discretos, lo cual sería completamente inviable. Por esta razón, las ecuaciones de la mecánica de fluidos no son aplicables en escala atómica.

1.1.3. Ecuaciones de Navier-Stokes

Para determinar completamente el movimiento de un fluido necesitamos conocer las siguientes cuatro magnitudes: El vector velocidad (en sus 3 componentes x,y,z) del fluido, la presión, la densidad y la temperatura del mismo en todos los puntos del espacio que ocupa el fluido, y en todo instante. Esto quiere decir que tenemos por tanto 6 incógnitas, las tres del vector velocidad, la presión, la densidad y la temperatura, dependientes de las tres coordenadas espaciales y el tiempo.

Para obtener estas 6 magnitudes se utilizan las ecuaciones de Navier-Stokes, que gobiernan el movimiento de todos los fluidos. Reciben su nombre en honor a los físicos George Gabriel Stokes y Claude-Louis Navier quienes las definieron en principios del siglo XIX. Las ecuaciones de Navier – Stokes se derivan de los principios de conservación bien establecidos y conocidos de la mecánica clásica y de la termodinámica:

- **Ecuación de la continuidad**

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho d\Omega = - \int_{\delta\Omega} \rho(\vec{v} \cdot \vec{n}) d(\delta\Omega)$$

- **Ecuación de la cantidad de movimiento**

$$\frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \vec{v} d\Omega + \int_{\delta\Omega} \rho \vec{v} (\vec{v} \cdot \vec{n}) d\delta\Omega = \int_{\delta\Omega} \vec{\tau} \cdot \vec{n} d(\delta\Omega) + \int_{\Omega} \rho \vec{f} d\Omega$$

- **Ecuación de la energía**

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) d\Omega + \int_{\delta\Omega} \rho \left(e + \frac{1}{2} v^2 \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) d\delta\Omega \\ = \int_{\delta\Omega} \vec{n} \cdot \tau \cdot \vec{v} d\delta\Omega + \int_{\Omega} \rho \vec{f} \cdot \vec{v} d\Omega - \int_{\Omega} \vec{q} \cdot \vec{n} d\delta\Omega \end{aligned}$$

Las ecuaciones son 3 ecuaciones escalares y 1 ecuación vectorial. La ecuación vectorial se descompone a su vez en 3 ecuaciones escalares, que junto con las otras dan lugar a las 6 ecuaciones que necesitamos. Todas las ecuaciones tienen una formulación integral y una formulación diferencial, esto quiere decir que se pueden aplicar tanto a un volumen de fluido finito (forma integral que acabamos de desarrollar) o a un volumen infinitamente pequeño, llamada partícula fluida (forma diferencial).

A pesar de que se trata de un problema cerrado, (6 ecuaciones y 6 incógnitas) es necesario para su resolución la imposición de condiciones iniciales y de contorno. Por lo tanto, todos los movimientos de todos los fluidos vienen determinados por las ecuaciones de Navier Stokes; lo que realmente distingue a unos movimientos de otros son las condiciones que imponemos a los mismos. Una condición puede ser, el fluido está en reposo (fluidoestática), el fluido fluye únicamente en una dirección (movimiento unidireccional), el movimiento del fluido no depende del tiempo (flujo estacionario) ...etc.

1.2. CFD

Al problema que acabamos de presentar es imposible dar una solución genérica, ya que no es posible encontrar expresiones analíticas de velocidad, presión, densidad y temperatura que resuelvan el problema en todas las situaciones. En la gran mayoría de las veces, la solución se obtiene mediante métodos matemáticos, y aquí es donde entra en juego la mecánica de fluidos computacional o CFD (*Computational Fluid Dynamics*), una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias.

Esto quiere decir que, introducimos el sistema en un ordenador muy potente, con sus respectivas condiciones de contorno, y el ordenador devuelve las soluciones en forma numérica. La CFD tiene actualmente una altísima importancia pues con el gran avance de los métodos numéricos y la potencia de cálculo moderna es posible encontrar soluciones de problemas que hacen 40 años hubieran tomado millones de horas de operación continua para su solución.

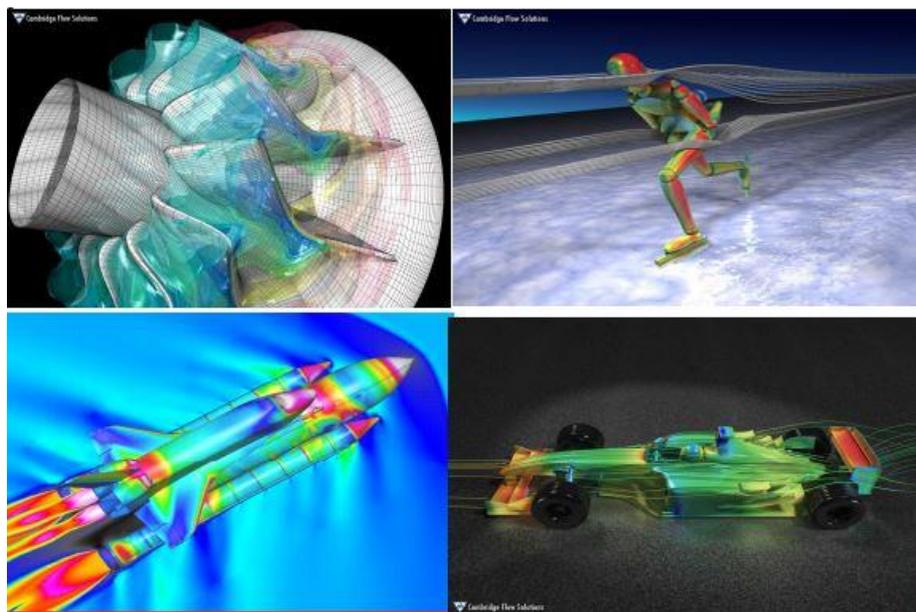


Figura 1.3. Ejemplos prácticos de CFD

Y aún con todo, la CFD no es capaz de resolver las ecuaciones en todas las situaciones de flujo posibles. Existen tipos de flujo de tantísima complejidad, como aquellos que involucran fenómenos de turbulencia, separación, interacción de fluidos entre otros, que sólo son resolubles mediante métodos estadísticos o experimentales. Es por ello por lo que los ensayos de laboratorio se siguen haciendo hoy en día y en base de a ellos se sacan conclusiones para desarrollar una teoría coherente.

1.2.1. El proceso de CFD

Los elementos principales en la dinámica de fluidos computacional (CFD) son:

- Discretización del flujo continuo, es decir, las variables del campo se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos.
- Las ecuaciones de movimiento también se discretizan, es decir, aproximadas en función de los valores en los nodos. Por lo tanto, pasamos de ecuaciones integrales (continuas) a ecuaciones algebraicas (discretas).
- Los sistemas de ecuaciones algebraicas se resuelven y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos

1.2.2. Etapas de un análisis de CFD

Un análisis completo de dinámica de fluidos computacional consta de las siguientes etapas:

- **Cálculo previo.** Esta etapa consiste en formular el problema y plantear las ecuaciones que lo gobiernan, establecer las condiciones de contorno y generar una malla de volúmenes finitos. Todo esto depende del análisis que queremos realizar (fuerzas, flujos, distribución de concentraciones...) y de la capacidad computacional.
- **Solución de las ecuaciones.** Esta es la etapa principal del CFD. En ella tiene lugar la solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el problema.
- **Análisis de los resultados.** Los resultados obtenidos de la solución de las ecuaciones se corresponden con el valor de las variables de campo en cada punto de la malla. Esta enorme cantidad de números deben reducirse a los fundamentales para poder manejarse con facilidad y obtener lo que pretendíamos con el cálculo.

Una parte importante de esta etapa es la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, para tener una visión rápida y amena de los resultados obtenidos.

1.2.3. Discretización espacial

El primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional consiste en la discretización espacial del dominio para posteriormente calcular sobre la misma la aproximación numérica de los flujos convectivos y difusivos, así como las fuentes. Existen muchos métodos para la discretización del problema. A groso modo, podemos clasificar los distintos esquemas de discretización en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. Básicamente, existen dos tipos de mallado:

Mallado estructurado

Cada punto de la malla está inequívocamente identificado por los índices i,j,k , en coordenadas cartesianas. Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D. La principal ventaja en este tipo de mallado reside en la ordenación de los elementos en la memoria, ya que el acceso a las celdas vecinas a una dada resulta muy rápido y fácil, si más que sumar o restar un número al valor del índice correspondiente.

Este mallado puede clasificarse en:

- **Mallas ortogonales.** Son aquellas en las que todas las líneas que la configuran se cortan entre sí con un ángulo de 90° . Algunos flujos pueden considerarse como axisimétricos. En estos casos, las ecuaciones de flujo pueden ser expresadas en coordenadas polares, en vez de en coordenadas cartesianas.
- **Mallas no ortogonales.** Son aquellas mallas estructuradas que no presentan la configuración anterior, como en el siguiente ejemplo:

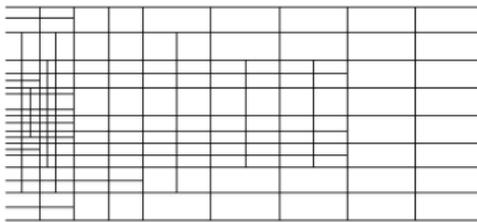


Figura 1.4. Malla ortogonal

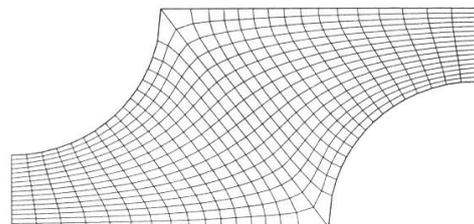


Figura 1.5. Malla no ortogonal

Otra metodología es la llamada técnica de la quimera. La idea básica es generar en primer lugar, mallas separadas alrededor de cada una de las entidades geométricas en el dominio. Después, las mallas se combinan de forma que se produzcan solapes de elementos. Lo más importante es la transferencia precisa de las cantidades entre las diferentes mallas y la región donde se produce el solape. La ventaja de esta metodología es que se pueden generar mallas para problemas particulares sin tener que generar mallas particulares, independientes unas de otras. Por otro lado, el problema de la técnica de la quimera es que las conservaciones de las propiedades de las ecuaciones de gobierno del fluido no son satisfechas exactamente en la zona donde se produzca solape de mallas.

Mallado no estructurado

Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular, es decir, las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente por sus índices. Los elementos de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D.

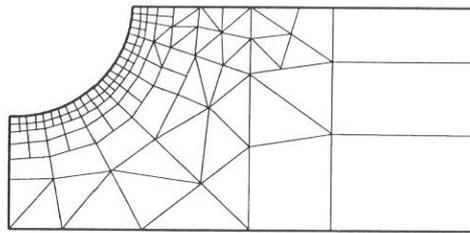


Figura 1.6. Mallado no estructurado

Estas mallas ofrecen gran flexibilidad en el tratamiento de geometrías complejas. La principal ventaja reside en que los triángulos (2-D) o los tetraedros (3-D), se pueden generar automáticamente, independientemente de la complejidad del dominio. En la práctica, es necesario determinar unos parámetros adecuadamente para obtener una buena calidad de malla. El tiempo requerido por una computadora para generar un mallado no estructurado es mucho menor que el que requiere para uno estructurado. Otra ventaja de este tipo de metodología es que la solución obtenida depende del refinamiento que se realice de la malla. Una desventaja de este tipo de mallado es el espacio que la malla ocupa en una computadora, es decir, requieren más memoria que los mallados estructurados.

El tipo de discretización espacial a emplear depende del tipo de discretización de las ecuaciones empleado, así como de la estructura interna de datos empleados para resolver el flujo. El método de las diferencias finitas, que discretiza las ecuaciones de Navier-Stokes en forma diferencial, requiere una malla estructurada de puntos en los que se guarden las variables de flujo. En el método de volúmenes finitos, es necesario definir puntos de control en cada volumen generado. Precisamente es, en estos vértices donde se guardan las variables, que dependiendo del método que se emplee pueden ser definidos en el centro del elemento o en los vértices de las celdas.

1.3. Objetivo del proyecto

El mundo de la ingeniería, al igual que el de la arquitectura y el de toda actividad que implique el diseño de algo que después se materialice físicamente, ha cambiado enormemente con la aparición y desarrollo del Diseño Asistido por Ordenador, **CAD** – *Computer Aided Design* - y de la Fabricación Asistida por Ordenador **CAM** – *Computer Aided Manufacturing* -. Hoy en día, el diseño y desarrollo de nuevos productos o la modificación de los existentes se ha convertido en un elemento clave para la mejora de la capacidad de innovación y competitividad de las empresas industriales actuales. Por ello, resulta necesario el conocimiento y el manejo de estas aplicaciones informáticas como herramientas de diseño e ingeniería.

CATIA – *Computer Aided Three-dimensional Interactive Application* - constituye el sistema CAD 3D más avanzado del mercado; lleva varios años implantado fuertemente a nivel internacional en sectores como el de automoción y el aeronáutico, y cada día son más las empresas que demandan esta tecnología de desarrollo.

En concreto, en el sector aeronáutico, se necesitan ordenadores potentes que realicen numerosos cálculos para simular la interacción de los fluidos con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. En el contexto de CFD, la continua investigación permite la incorporación de softwares que aumentan la velocidad de cálculo y disminuyen el margen de error, al tiempo que permiten analizar situaciones complejas con fluidos transónicos o turbulentos.

El presente Trabajo Fin de Máster recoge a modo de guía una herramienta computacional de análisis de dinámica de fluidos que está integrada en CATIA V5: **FloEFD**. Permite a los ingenieros trabajar directamente en su modelo CAD para preparar y evaluar su simulación de CFD simultánea, obteniendo resultados casi a la misma velocidad de los cambios en el diseño.

Las ventajas que este software alcanza son las siguientes:

- Fácil de usar
- CAD integrado
- Malla automatizada
- Criterios de convergencia sólidos
- Flujos de trabajo simplificados

- Es el único software CFD que entrega interfaces de usuario locales en japonés, chino, francés, alemán y ruso.

Dado que no existe material en español, se ha decidido realizar este documento como una guía de fácil aprendizaje con conceptos clave. La guía está elaborada de forma que haya una parte dedicada al manual de usuario con generalidades y una cierta aplicación a ejemplos práctico.

El objetivo es mostrar la facilidad con la que FloEFD realiza simulaciones de flujo de fluidos y analiza las variaciones de diseño. Estos son factores que hacen de FloEFD la herramienta perfecta para los ingenieros que quieren probar el impacto de sus cambios en el modelo.

Capítulo 2

Cómo crear un proyecto FloEFD

Para realizar cualquier análisis de dinámica de fluidos en FloEFD, es necesario configurar las características del mismo previamente, con el objeto de ahorrar tiempo de computación y especificar las particularidades del diseño. Por ello, a continuación, se muestran los pasos a seguir para crear un proyecto FloEFD desde el principio con el asistente de configuración.

2.1. Apertura del conjunto

- Copie el archivo CAD a analizar en el directorio de trabajo y asegúrese de que los archivos no son de sólo lectura, ya que FloEFD guardará los datos en estos archivos.
- Ejecute CATIA y seleccione el módulo en **Start > Analysis & Simulation > FloEFD – Engineering Fluid Dynamics** en el menú principal de módulos, como se muestra a continuación:

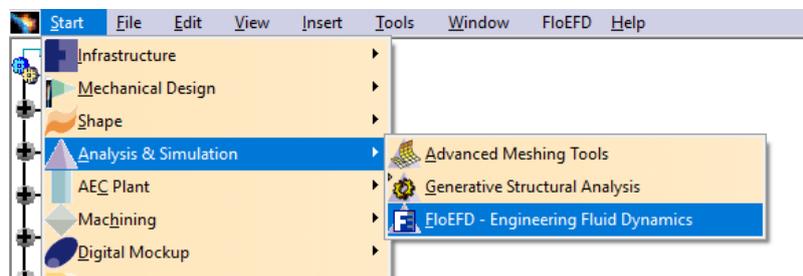


Figura 2.1. Apertura del módulo

- Seguidamente, en la barra de herramientas superior seleccione la pestaña de **File > Open** y busque el archivo CAD a analizar en su directorio de trabajo o, si lo prefiere, arrastre el conjunto hacia la ventana de FloEFD directamente.

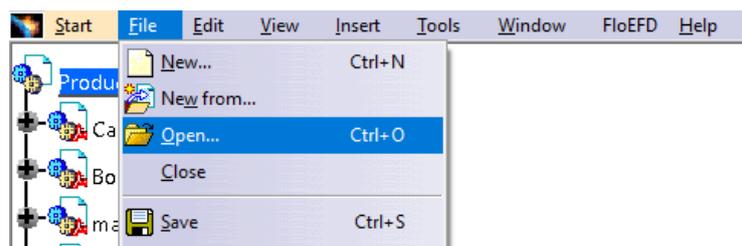


Figura 2.2. Apertura del conjunto

En este tutorial se usa a modo de ejemplo un conjunto CAD (CAD Product) de una válvula de bola, un mecanismo de llave de paso que sirve para regular el flujo de un fluido canalizado. Se caracteriza porque el mecanismo regulador situado en el interior tiene forma de esfera perforada, como se muestra en el siguiente esquema:



Figura 2.3. Válvula de bola despiezada

La válvula de bola se abre mediante el giro del eje unido a la esfera, de forma que permite el paso del fluido cuando está alineada la perforación con la entrada y la salida de la válvula. Cuando la válvula está cerrada, el agujero estará perpendicular a la entrada y a la salida. La posición de la manija de actuación indica el estado de la válvula (abierta o cerrada).

Dado que este tipo de válvula es muy versátil en el manejo de fluidos, es una de las válvulas más populares dentro de la industria y servirá de ayuda como aplicación práctica a lo largo de este tutorial.

2.2. Configuración del asistente

Una vez abierto el conjunto, el asistente de proyectos - *The Project Wizard* - le guía a través de la definición de las propiedades del proyecto paso a paso. Para acceder a él, en la barra de herramientas superior seleccione la pestaña de FloEFD > Project > Wizard...

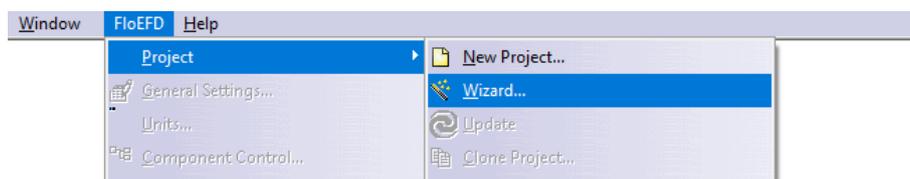


Figura 2.4. Apertura del asistente

El asistente está compuesto de las siguientes ventanas:

2.2.1. Project Name

Una vez dentro de *Wizard*, escriba un nuevo nombre para el proyecto FloEFD en **Project Name**. FloEFD creará un nuevo proyecto y guardará todos los datos en una carpeta.

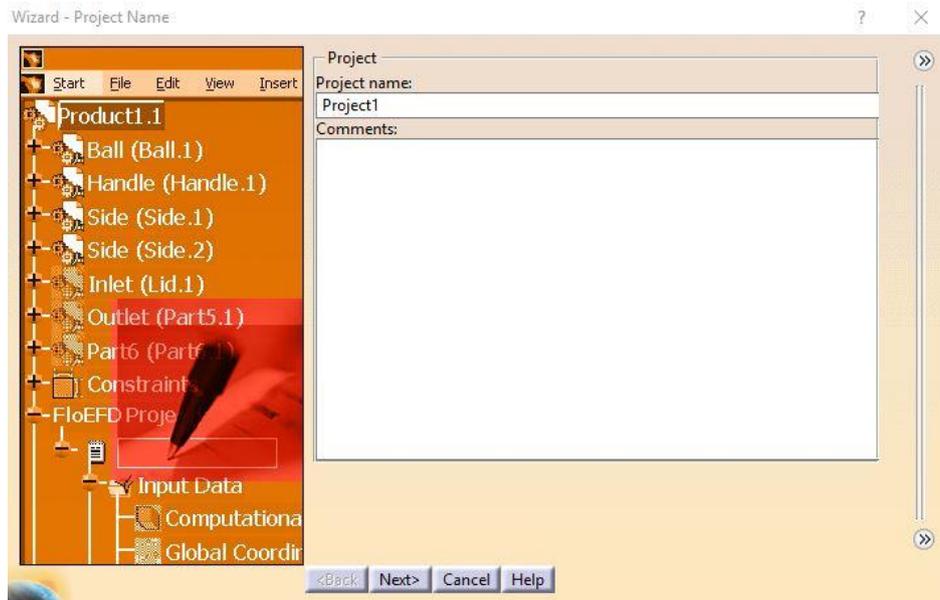


Figura 2.5. Ventaja Project Name

Si selecciona **Next**, pasa a definir el resto de los parámetros para el proyecto paso a paso. Excepto por dos pasos (aquellos que definen los fluidos del proyecto y el sólido predeterminado), cada paso tiene algunos valores predefinidos, por lo que puede aceptar estos valores (omitir el paso haciendo clic en Next) o modificarlos según sus necesidades. Los valores predeterminados son los siguientes:

<i>Sistema de Unidades</i>	SI
<i>Tipo de análisis</i>	Interno Sin considerar características físicas adicionales
<i>Condición de contorno de pared</i>	Pared adiabática
<i>Condiciones iniciales</i>	Presión 1 atm; Temperatura 293.2 K

Tabla 2.1. Valores predeterminados

Por lo tanto, para evitar atravesar todos los pasos, puede usar el panel Navegador (Navigator) haciendo  clic en el icono situado en la esquina superior derecha de la imagen anterior, que proporciona un acceso rápido a las páginas del asistente como se ilustra en la imagen. De esta forma, puede modificarse sólo aquello que se desee.

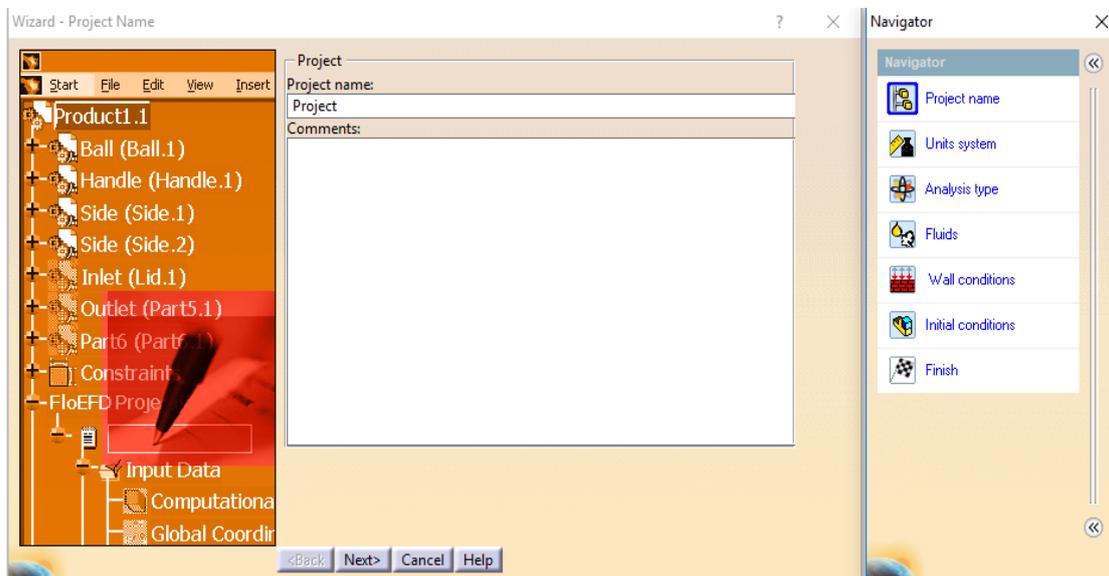


Figura 2.6. Ventana Navigator

2.2.2. Unit System

La siguiente ventana permite elegir el sistema de unidades para el proyecto. Aunque pueda seleccionarlo directamente en este asistente, tenga en cuenta que después de finalizar esta configuración puede cambiar las unidades en cualquier momento haciendo clic en la pestaña de la barra de herramientas superior **FloEFD > Units**.

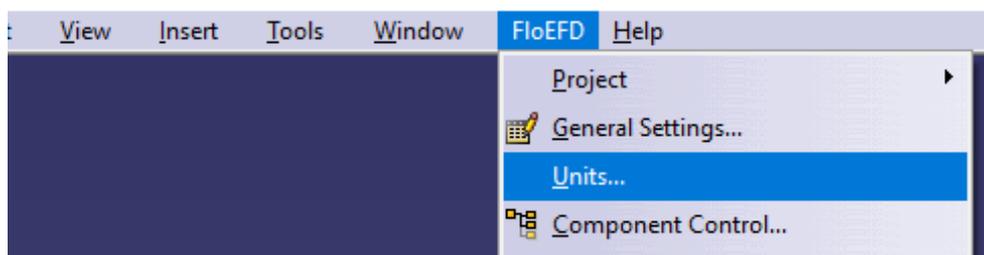


Figura 2.7. Apertura de la configuración de unidades

Existen varios sistemas predefinidos de unidades, y se pueden crear los propios o cambiar los existentes haciendo clic en  **Create new** y modificando los parámetros de abajo manualmente. Para nuestro modelo, se elige SI (Sistema Internacional). Haga clic en **Next** para continuar.

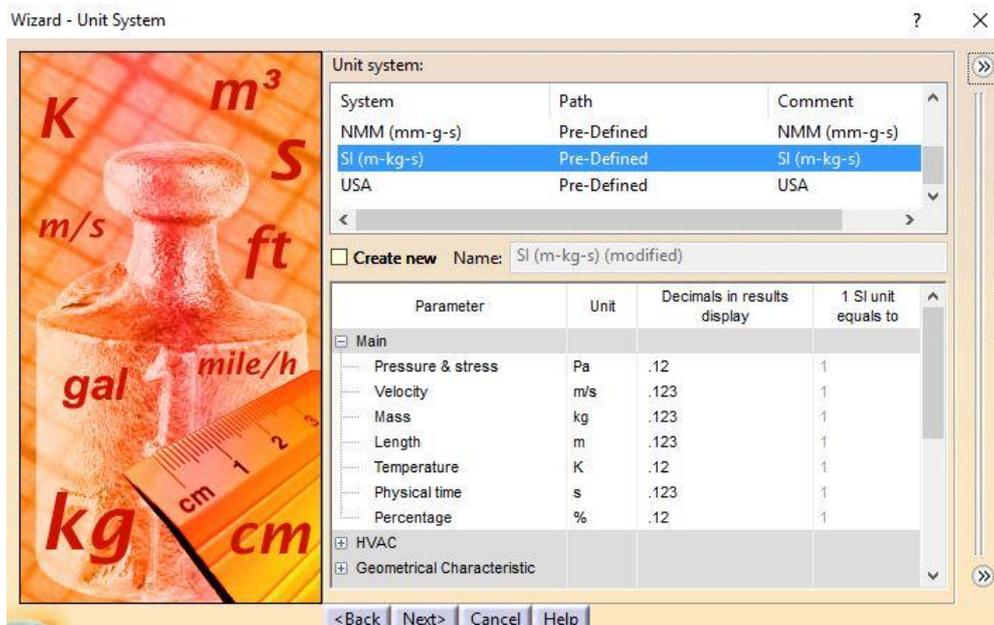


Figura 2.8. Ventana Unit System

2.2.3. Analysis Type

En esta ventana puede establecer el tipo y las características físicas que van a determinar el análisis. La ventana tiene la siguiente apariencia:

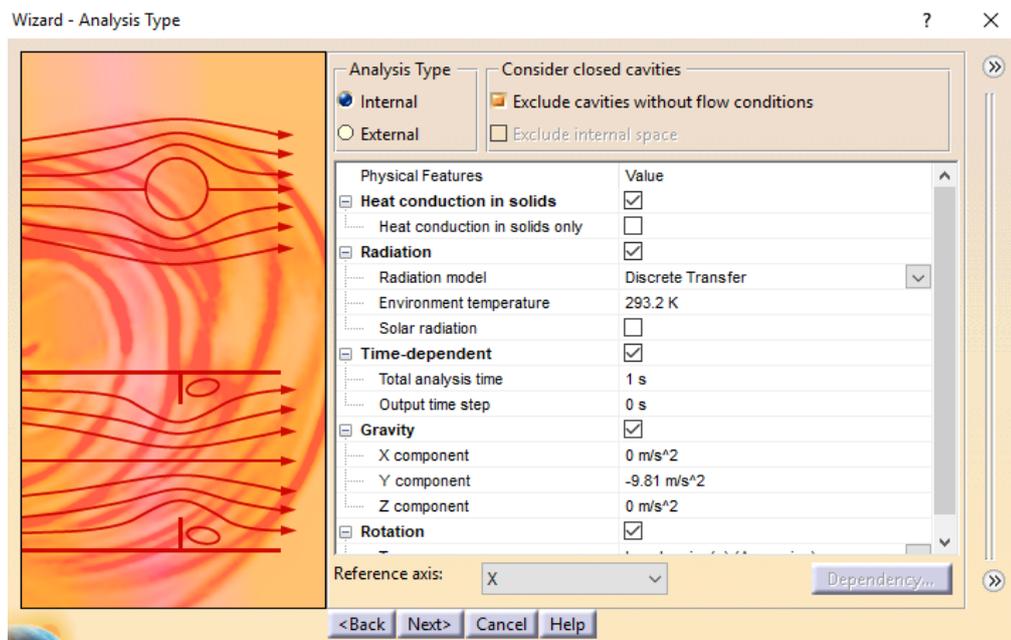


Figura 2.9. Ventana Analysis Type

La ventana se compone de las siguientes pestañas:

- **Analysis Type**

En la primera pestaña de esta ventana puede definir si el flujo pasa a través de la estructura (**Internal**) o alrededor del objeto (**External**).

Internal

Los análisis de flujo interno se ocupan de los flujos dentro de tuberías, depósitos, etc. El fluido entra por unos orificios de entrada y sale por orificios de salida. Para realizar este tipo de análisis, todos los orificios deben estar cerrados con tapas con objeto de especificar las condiciones de contorno necesarias de flujo de entrada y salida. En nuestro ejemplo:

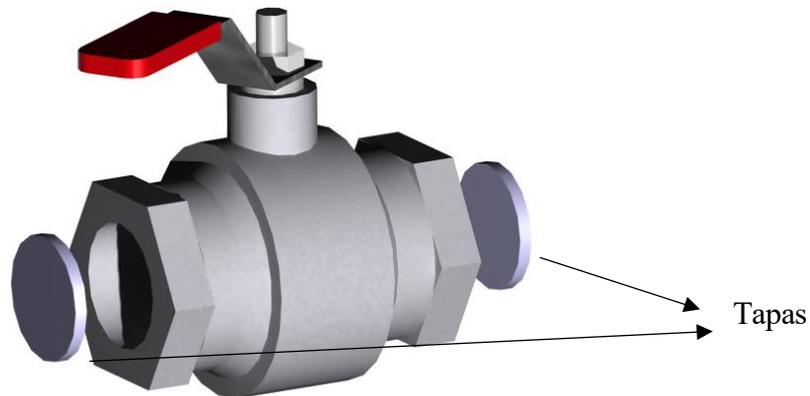


Figura 2.10. Tapas para análisis interno

Más tarde, puede darse semitransparencia a estas tapas para ver que ocurre en el interior del modelo. Para ello, haga clic con el botón derecho en la tapa en el árbol de CATIA y seleccione **Properties > Graphic > Transparency**:

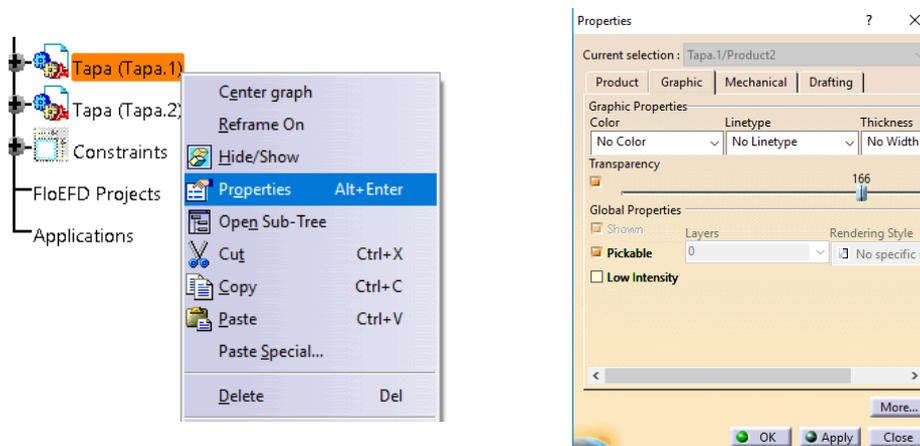


Figura 2.11. Aplicación de transparencia para las tapas

External

Los análisis de flujos externos se ocupan de flujos sobre o alrededor de un modelo, tales como flujos sobre aviones, automóviles, edificios, etc. Para los análisis de flujo externo, los límites del campo son los límites del Dominio Computacional, que

También puede solucionar un problema combinado de flujo externo e interno en un proyecto de FloEFD (por ejemplo, flujo alrededor y a través de un edificio). Si el análisis incluye una combinación de flujos internos y externos, debe especificar *External Type* para el análisis.

- **Consider closed cavities**

En esta pestaña se puede optar por ignorar espacios internos cerrados que no están involucrados el análisis de flujo, haciendo que FloEFD no desperdicie memoria y recursos CPU para tenerlos en cuenta.

- **Physical Features**

Además, en esta ventana, FloEFD no sólo tiene la capacidad de calcular el flujo de fluido, sino que podrá especificar características físicas avanzadas que quizá desee tener en cuenta:

- **Heat Conduction in Solids.** Esta opción permite estudiar la llamada transferencia de calor conjugada, una combinación de convección y conducción. Es decir, considera el calor no sólo en sólidos, sino en el fluido y entre las paredes y el fluido. Si se desea considerar sólo el sólido, ha de seleccionarse **Heat conduction in solids only**.
- **Radiation.** Analiza la radiación de superficie a superficie. Esta opción sólo está disponible una vez seleccionado Heat Conduction in Solids. Es necesario seleccionar el método mediante el cual se resuelven las ecuaciones (transferencia discreta, ordenadas discretas o Montecarlo), así como la temperatura ambiente. En caso de radiación solar, se requiere especificación especializada de la misma.
- **Time-dependent.** Trata los análisis transitorios.

- **Gravity.** Son los efectos gravitatorios para casos de convección natural. Es necesario especificar las tres componentes del vector gravedad.
- **Rotation.** Analiza el flujo de los equipos giratorios, pudiendo ser una rotación local o global.

Para nuestro ejemplo, debido a su simplicidad, no se considerarán ninguna de estas características físicas.

- **Reference Axis**

El eje de referencia del sistema de coordenadas global (X, Y o Z) se utiliza para especificar datos en forma tabular o de fórmula en un sistema de coordenadas cilíndrico basado en este eje.

Una vez definida todas las características, haga clic en **Next**.

2.2.4. Default Fluid

FloEFD contiene una base de datos integrada, **Engineering Database**, que contiene propiedades de varios líquidos, gases y sólidos, y nos permite elegir el fluido a tratar en el análisis. También puede usarse esta base de datos para especificar un medio poroso. Para acceder a ella, haga clic en **New...** a la derecha en la ventana que aparece a continuación, en donde se muestran algunos de estos fluidos predefinidos a la izquierda:

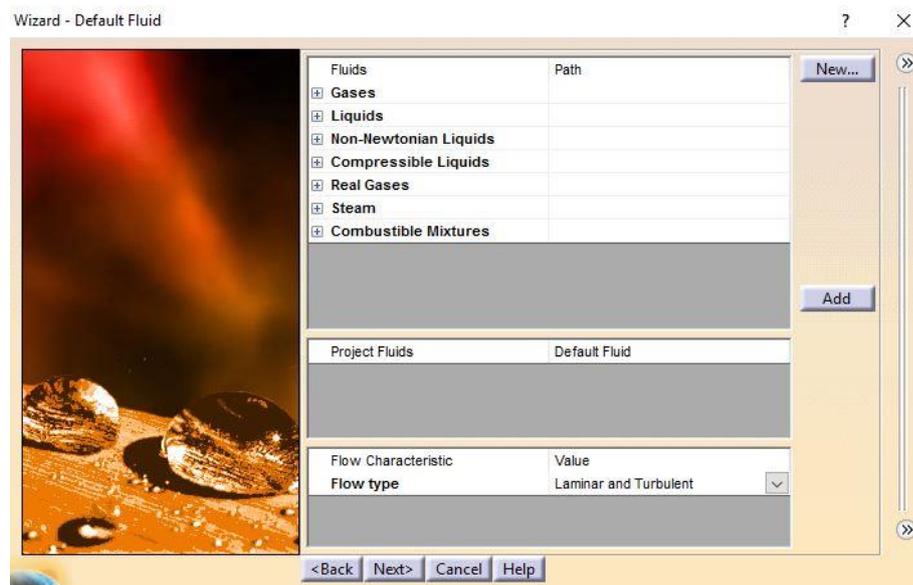


Figura 2.12. Ventana Default Fluid

Este software es capaz de calcular el flujo de diferentes tipos de fluidos en el mismo análisis, pero aquellos de diferente tipo deben estar separados por paredes. Una mezcla de fluidos puede ser considerada solamente si los fluidos son del mismo tipo. Los sólidos se usan para la conducción de calor, y hasta 10 líquidos o gases pueden ser elegidos para cada análisis. Para agregar un fluido, selecciónelo y haga clic en **Add**.

Además, FloEFD puede analizar cualquier tipo de flujo: sólo turbulento, sólo laminar o laminar y turbulento. Las ecuaciones turbulentas pueden ser despreciadas si el flujo es completamente laminar. FloEFD también puede manejar flujos compresibles de bajo y alto número de Mach para gases. Estas opciones podemos considerarlas en el último apartado, *Flow Characteristic*.

Para definir nuestro propio fluido de trabajo, haciendo clic en **New...** previamente, aparecerá la siguiente ventana:

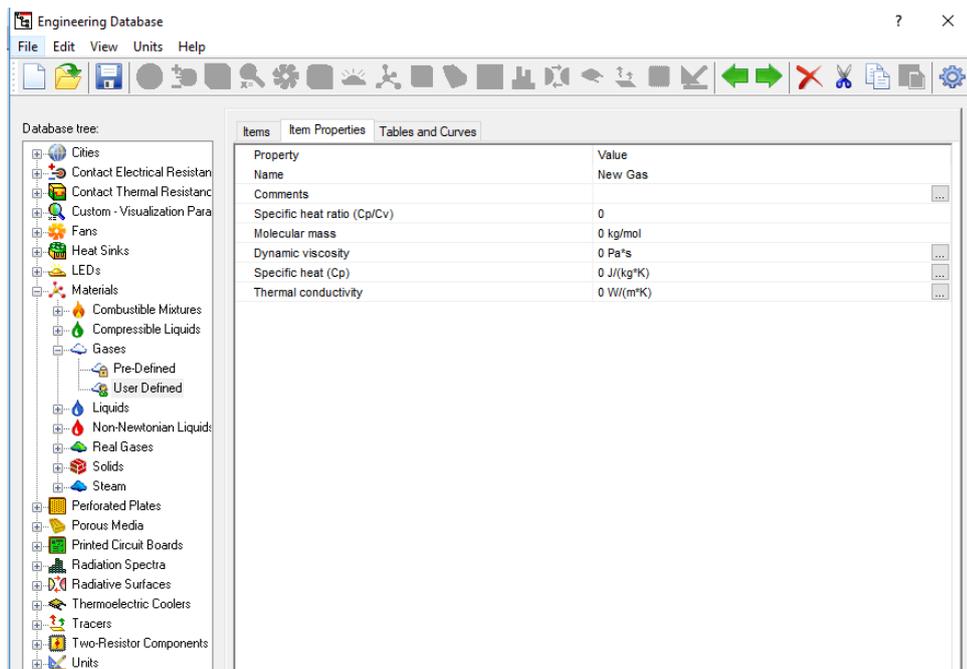


Figura 2.13. Ventana Engineering Database

Esta base de datos permite modificar los fluidos predeterminados o la creación de otros nuevos haciendo clic en  e introduciendo los datos manualmente. Una vez haya definido el nuevo fluido, haga clic en  y salga de la base de datos. Automáticamente le aparecerá en la lista de los fluidos predeterminados en la ventana Default Fluid y podrá seleccionarlo.

En nuestro ejemplo, se elige el agua como fluido y el resto de parámetros se dejan por defecto. Para continuar con la configuración, haga clic en **Next**.

2.2.5. Default Solid

Esta ventana sólo aparece si se ha seleccionado **Heat Conduction in Solids** en la ventana Analysis Type. Nos permite especificar el material sólido aplicado por defecto a todos los componentes sólidos del modelo.

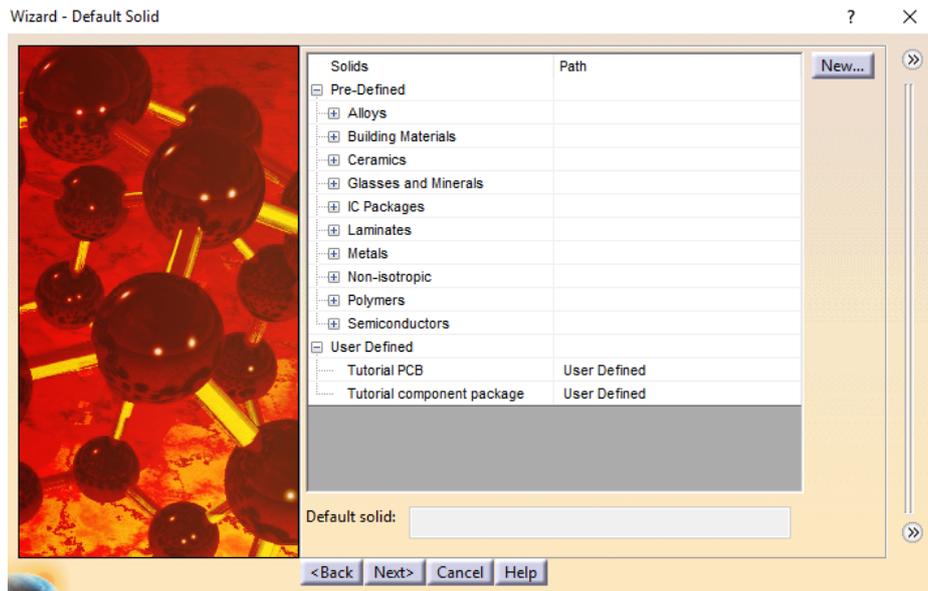


Figura 2.14. Ventana Default Solid

Para asignar un material diferente a un componente del conjunto en particular, necesitas crear una condición de material sólido para este componente. Si el material que desea especificar no está en el menú, puede hacer clic en **New...** y definirlo en la base de datos mencionada anteriormente, **Engineering Database**, cambiando los datos manualmente.

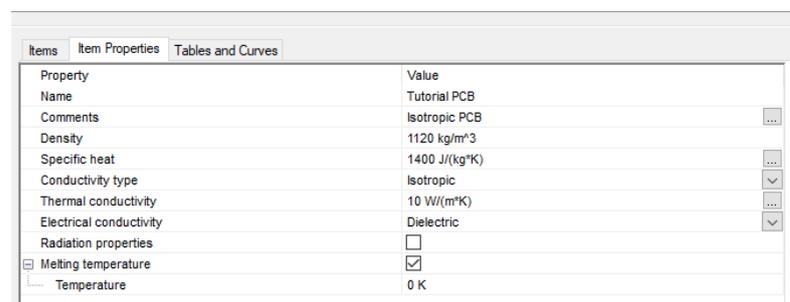


Figura 2.15. Pestaña de Engineering Database

Una vez haya definido el nuevo material, haga clic en **Save** y salga de la base de datos. Al igual que antes, como en el caso de los fluidos, encontrará el nuevo material en la lista de predefinidos.

Para continuar con la configuración, haga clic en **Next**.

2.2.6. Wall Conditions

En esta ventana puede especificar las condiciones de contorno de pared aplicadas a todas las paredes del modelo en contacto con el fluido. Existen varias opciones disponibles, tales como pared aislada térmicamente (**Adiabatic Wall**), flujo de calor (**Heat flux**), ratio de transferencia de calor (**Heat transfer rate**), y la temperatura en la pared (**Wall Temperature**). Cuando Heat Conduction in solids está seleccionado, aparece una nueva opción: **Heat transfer coefficient**, que te permite simular el intercambio de calor entre las paredes de fuera y el ambiente que lo rodea. En esta pestaña se especifica el coeficiente de película y la temperatura del fluido en el exterior. Asimismo, si se selecciona radiación, se especificará el tipo de superficie radiante que involucra el problema (cuerpo negro, blanco, gris...).

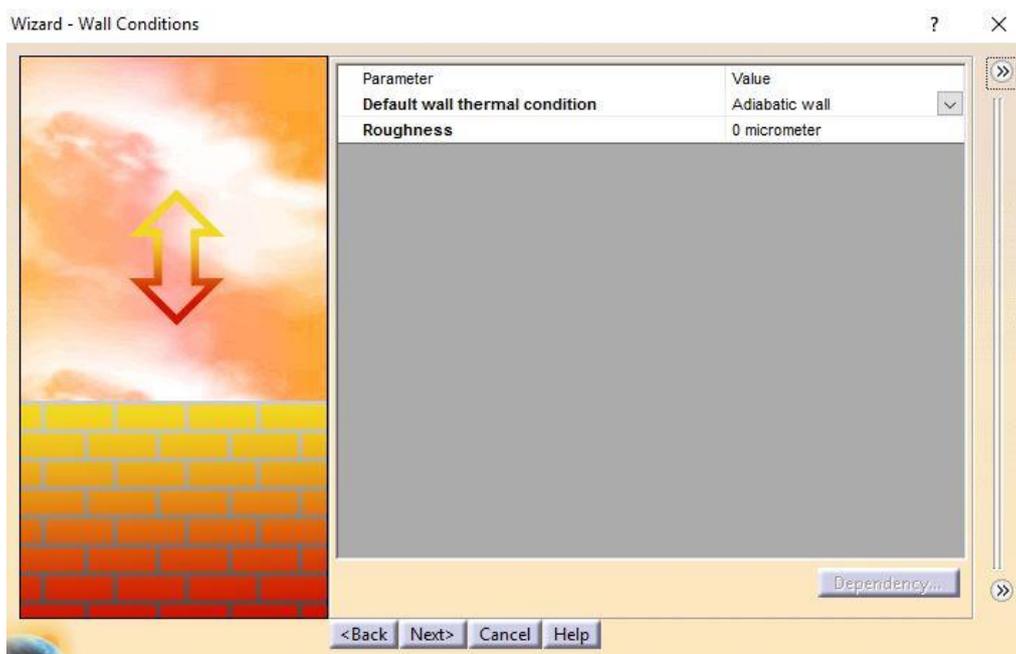


Figura 2.16. Ventana Wall Conditions

Se puede especificar también el valor de la rugosidad de la pared, **Roughness**, que se aplicará por defecto a todas las paredes del modelo. Por el contrario, si quiere definir este valor para una pared específica, puede definir una condición de contorno “Real Wall”. Lo veremos más adelante. Haga clic en **Next** para continuar.

2.2.7. Initial Conditions

En esta ventana podemos especificar los valores iniciales de los parámetros de flujo, como la presión, la temperatura, velocidad y parámetros de turbulencia. Aunque el establecimiento de condiciones iniciales para cálculos transitorios es más importante para ver cuánto tiempo se tarda en alcanzar cierta configuración, en un cálculo estacionario es útil establecerlas cerca de la solución final esperada para acelerar la convergencia: cuanto más se aproximen estos valores a los valores finales determinados en el análisis, más rápido se terminará el análisis.

Para la mayoría de flujos es difícil tener una buena estimación de su turbulencia a priori, así que se recomienda usar los parámetros de turbulencia que vienen por defecto. Los valores de la intensidad de la turbulencia propuestos por FloEFD son 0.1% para análisis externos y 2% para análisis internos, siendo apropiados para la mayoría de los casos.

Para problemas estacionarios, FloEFD itera hasta que la solución converge, mientras que para problemas transitorios itera durante un tiempo especificado. Si no tenemos conocimiento de los valores finales esperados, podemos dejar los valores por defecto y seleccionar **Finish** para terminar el asistente.

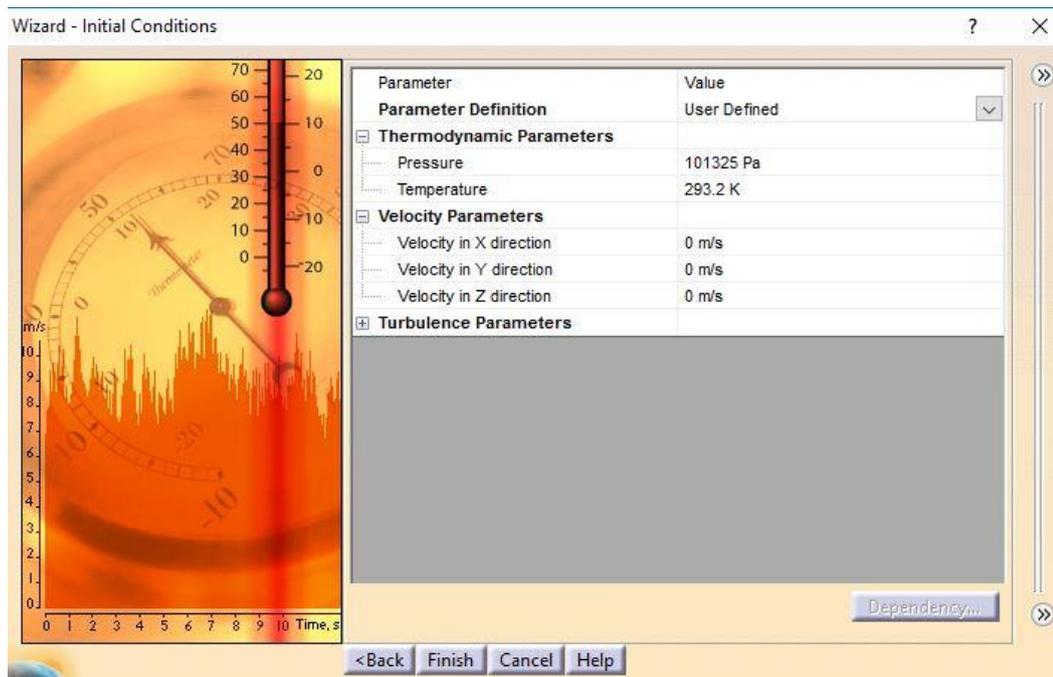


Figura 2.17. Ventana Initial Conditions

Si hace clic en cada parámetro (presión, temperatura, velocidad...), puede observar que se activa. Esta opción nos permite definir un parámetro según una ley

Dependency...

determinada.

Utilizando **Dependency** puede especificar datos de varias maneras: como una constante, como una dependencia tabular o una dependencia de fórmulas en coordenadas x, y, z, r, θ, ψ y tiempo t :

- El radio r es la distancia de un punto al eje de referencia seleccionado del sistema de coordenadas de referencia
- θ y ψ son los ángulos polares y azimutales del sistema de coordenadas esféricas, respectivamente.

Por lo tanto, mediante la combinación de coordenadas r, θ y ψ puede especificar datos en sistemas de coordenadas cilíndricas o esféricas.

Por ejemplo, en el caso de querer introducir la velocidad correspondiente a la Fórmula de Reynolds con los datos que se adjuntan a continuación, seleccionaríamos **Velocity in X direction** > **Dependency** y en la ventana emergente, **Formula Definition**.

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad V = \frac{\mu Re}{\rho d}$$

Reynolds Re	1
Viscosidad agua μ	0.0010115 Pa·s
Diámetro d	0.01 m
Densidad agua ρ	988.19 kg/m ³

Tabla 2.2. Valores de ejemplo

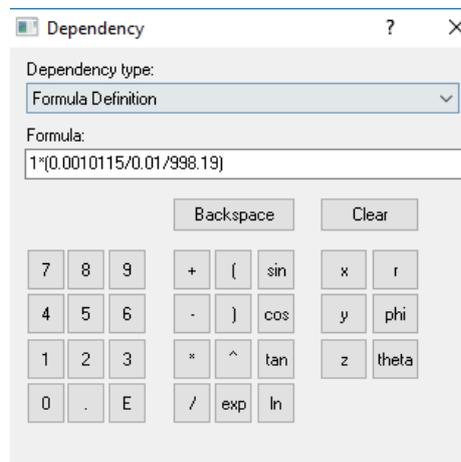


Figura 2.18. Ventana Dependency

2.3. Comprobación del modelo

2.3.1. Create lids tool

Si tenemos un caso de análisis interno, tal y como hemos comentado anteriormente, necesitaremos tapas para limitar el dominio fluido. En el caso de que no se hayan creado manualmente, una vez finalizado el asistente, en FloEFD aparece la siguiente ventana informando de la necesidad de las mismas:

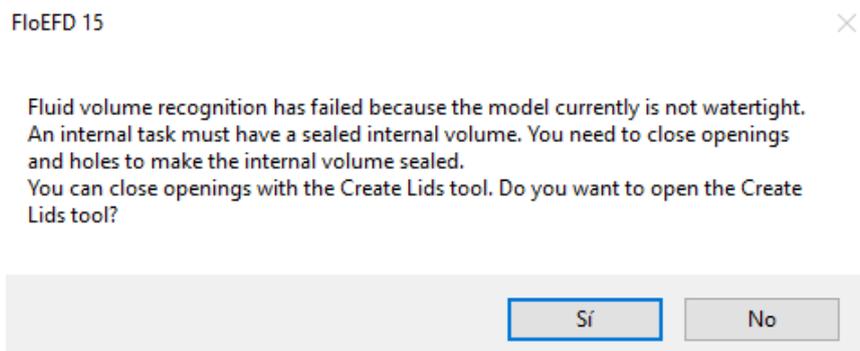


Figura 2.19. Warning por ausencia de tapas

Si hace clic en **Sí**, FloEFD creará automáticamente las tapas en las caras del modelo donde se necesite limitar el dominio fluido, pudiendo elegir el grosor de la misma. Para nuestro ejemplo, se crea de la siguiente manera:

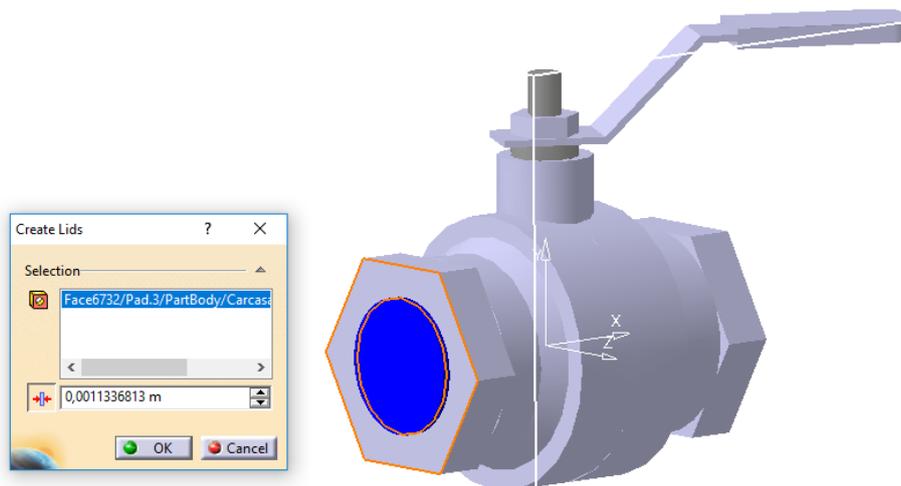


Figura 2.20. Ventana Create Lids

Una vez hemos seleccionado **OK** en la ventana anterior, aparecerán dos avisos adicionales para reiniciar el dominio computacional y las configuraciones del mallado. Haga clic en **Sí** para continuar.

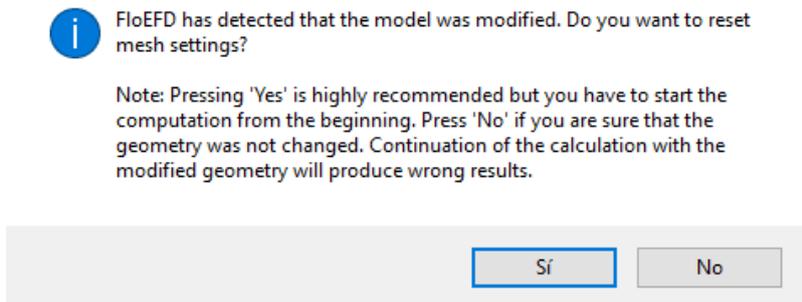


Figura 2.21. Warning para reiniciar configuración de la malla

2.3.2. Check Geometry

En esta ventana podemos especificar los valores iniciales de los parámetros de flujo, como la presión, la temperatura, velocidad y parámetros de turbulencia. Aunque el establecimiento de condiciones iniciales para cálculos transitorios es más importante para ver cuánto tiempo se Una vez finalizado el asistente, para casos de análisis interno, es necesario asegurarse del correcto funcionamiento del modelo. Para verificar que el modelo creado está completamente cerrado podemos hacer clic en la barra de herramientas superior de FloEFD Tools > **Check Geometry** y aparecerá la siguiente ventana.

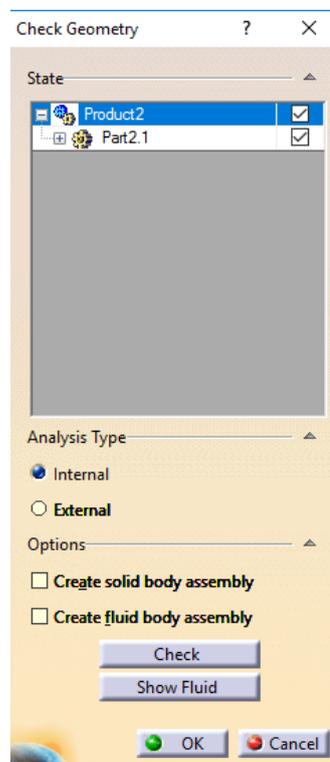


Figura 2.22. Ventana Check Geometry

Seleccionando **Internal** como *Analysis Type* y haciendo clic en **Check**, la nueva ventana nos calculará el volumen de fluido y de sólido. Si el volumen de fluido es cero, el modelo no está cerrado. Los dos warnings correspondientes se muestran a continuación:

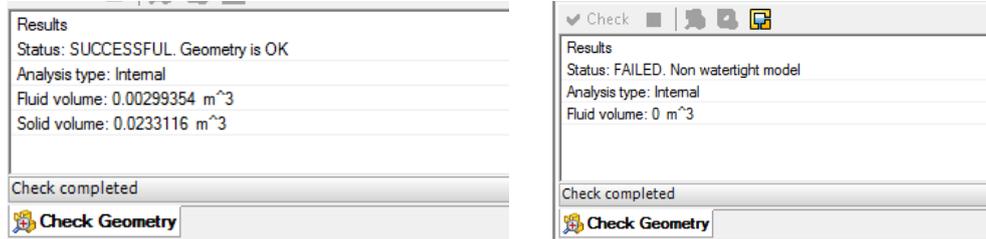


Figura 2.23. Posibles warnings de Check Geometry

Asimismo, seleccionando **Show Fluid** puedes ver el volumen que ocupará el fluido en el análisis. Por ejemplo, para el análisis de una válvula de bola cuya llave está girada cierto ángulo, el volumen fluido sería el siguiente:

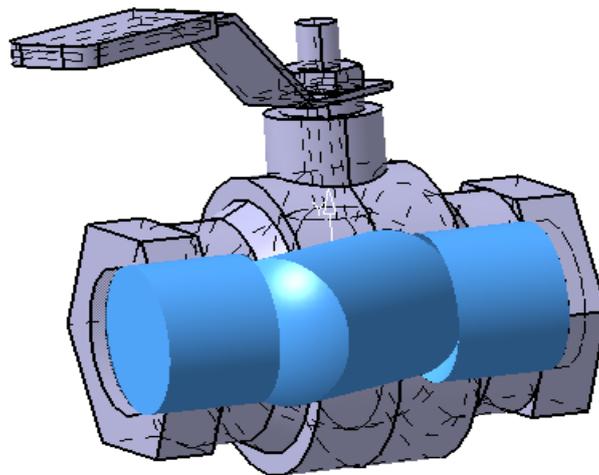


Figura 2.24. Volumen fluido en la válvula

La herramienta **Check Geometry** es muy útil ya que te permite calcular el volumen total de fluidos y sólidos, revisar los cuerpos para detectar posibles problemas de geometría y visualizar el área del fluido y el sólido como modelos separados.

2.4. Cambios en la configuración

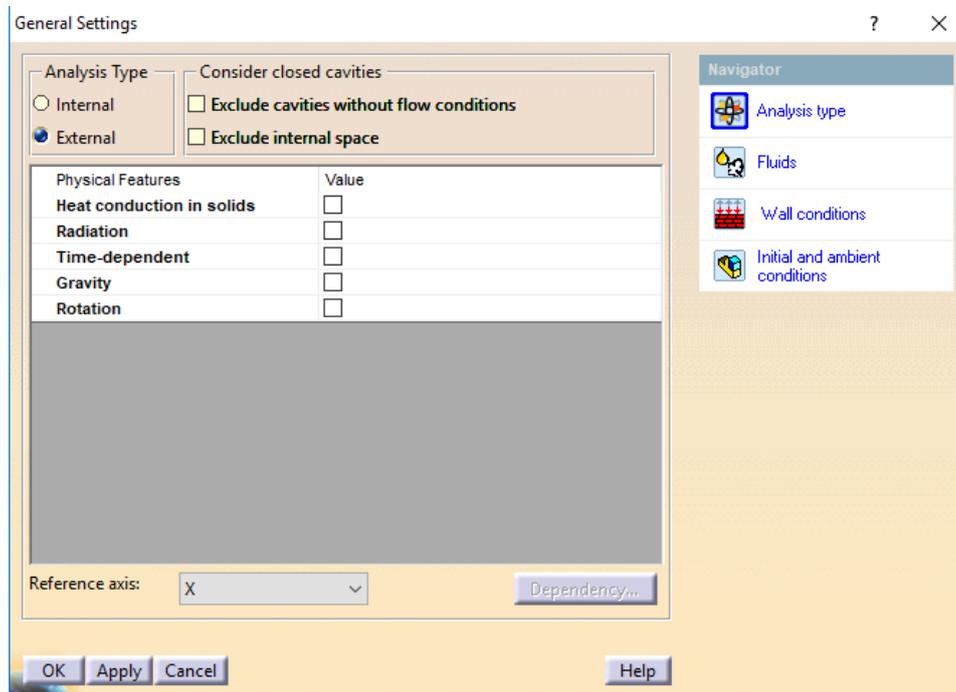


Figura 2.25. Ventana General Settings

General Settings siempre presenta el estado actual de los parámetros del proyecto. Puedes cambiar la configuración general para corregir las configuraciones hechas en el asistente (menos las unidades y la resolución de la geometría y resultados) o para modificar el proyecto creado con FloEFD de acuerdo con los requisitos del nuevo proyecto. Para acceder a esta pestaña, haga clic en la barra de herramientas superior, en **FloEFD > General Settings**.

Capítulo 3

Árbol de proyecto FloEFD

Una vez definido el asistente, FloEFD crea un árbol que muestra la especificación de los datos del proyecto y las visualizaciones de los resultados: El **Árbol de proyecto de FloEFD**. Aparece a la derecha en el panel administrador y tiene la siguiente apariencia:

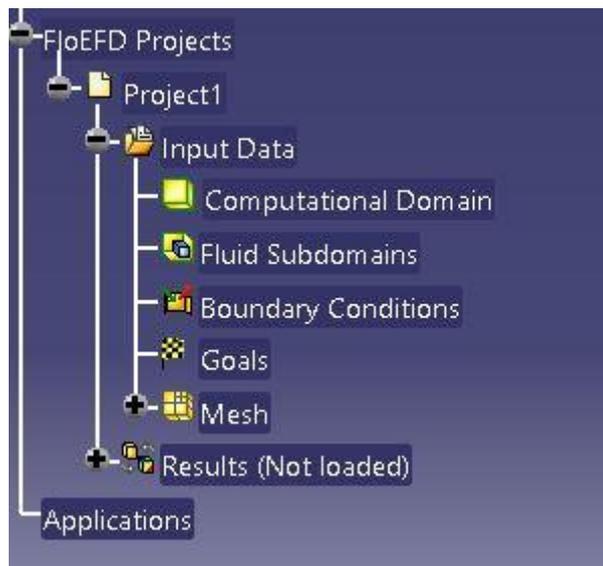


Figura 3.1. Árbol del proyecto FloEFD

Observe que el nuevo proyecto tiene el nombre que definió en el asistente. Puede expandir todos los elementos del árbol y personalizarlo, seleccionando las carpetas que se muestran y las que se ocultan. Para ello, haga clic en el botón secundario en la carpeta que quiera ocultar y seleccione **Hide**. A continuación, se va a desarrollar el contenido del árbol de proyecto FloEFD.

3.1. Computational Domain

El dominio computacional es un prisma rectangular que abarca el área dentro de la cual se realizan los cálculos de flujo y la transferencia de calor. La caja esquemática que envuelve el modelo es la visualización de los límites del dominio computacional. Haciendo clic en el botón derecho sobre **Computational Domain > Computational Domain Object > Definition**, aparece la siguiente ventana:

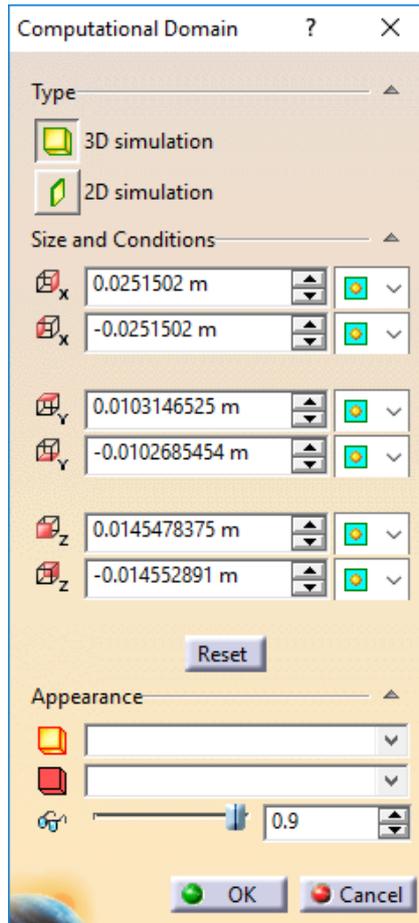


Figura 3.2. Ventana de Computational Domain

En primer lugar, debe especificar si la simulación es en 2D o 3D en la pestaña *Type*. La pestaña *Size and Conditions* se utiliza para modificar el tamaño del volumen analizado. Puede hacerse cambiando los valores a mano, o en el área de gráficos, haciendo clic y arrastrando los controladores de flechas en los lados del marco del dominio computacional a las posiciones deseadas.

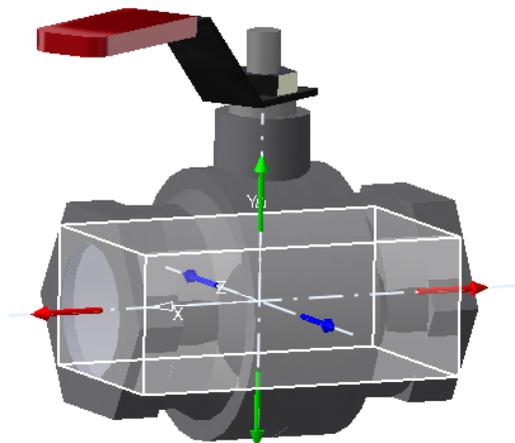


Figura 3.3. Computational Domain de la válvula

Además, se puede especificar la apariencia del dominio computacional en *Appearance* eligiendo el color de los límites y del volumen que contiene, así como la transparencia .

Esta herramienta es muy útil, debido a que, para la mayoría de los casos, para estudiar el campo de flujo alrededor de un cuerpo externo e investigar los efectos de los cambios en el diseño, no se recomienda usar el tamaño predeterminado del Dominio Computacional determinado por FloEFD. Por ejemplo, con el fin de eliminar cualquier perturbación del flujo entrante en los límites del Dominio Computacional debido a la presencia de un cuerpo, conviene establecer manualmente los límites más alejados. Debido al mayor tamaño del Dominio Computacional, aumentará el tiempo de cálculo y la memoria CPU requerida, pero se obtendrán mejores resultados con mayor precisión.

Si la geometría del modelo a analizar es simétrica, puede aprovecharlo para reducir el tiempo de CPU y la memoria necesaria para el cálculo. Dado que el modelo es simétrico, es posible "cortar" el modelo a la mitad y utilizar una condición de frontera de simetría en el plano de simetría. Este procedimiento no es necesario, pero se recomienda para análisis eficientes.

Usando el icono  de *Size and Conditions* puede establecer la simetría, así como periodicidad en los casos que corresponda. Por ejemplo, si se quisiera aplicar simetría en la figura adjunta anterior, bastaría con realizar la siguiente modificación:

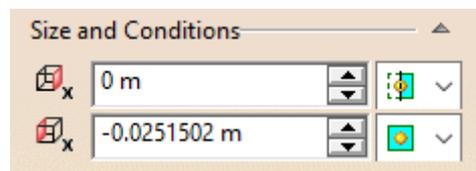


Figura 3.4. Pestaña de Size and Conditions

De esta forma, el dominio computacional en la válvula una vez aplicada la simetría sería:

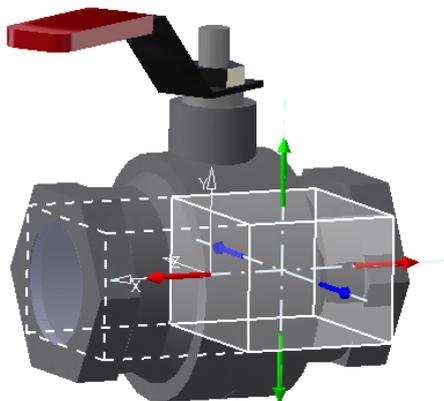


Figura 3.5. Computational Domain simétrico

3.2. Fluid Subdomains

Esta herramienta es muy útil para crear subdominios, con objeto de separar un fluido cuando se encuentra en contacto con otro fluido de distinta naturaleza. Para crear un subdominio, clicas en el botón derecho en el árbol de proyecto FloEFD en **Fluid Subdomains > Fluid Subdomains Object > New Fluid Subdomain...** y aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación:

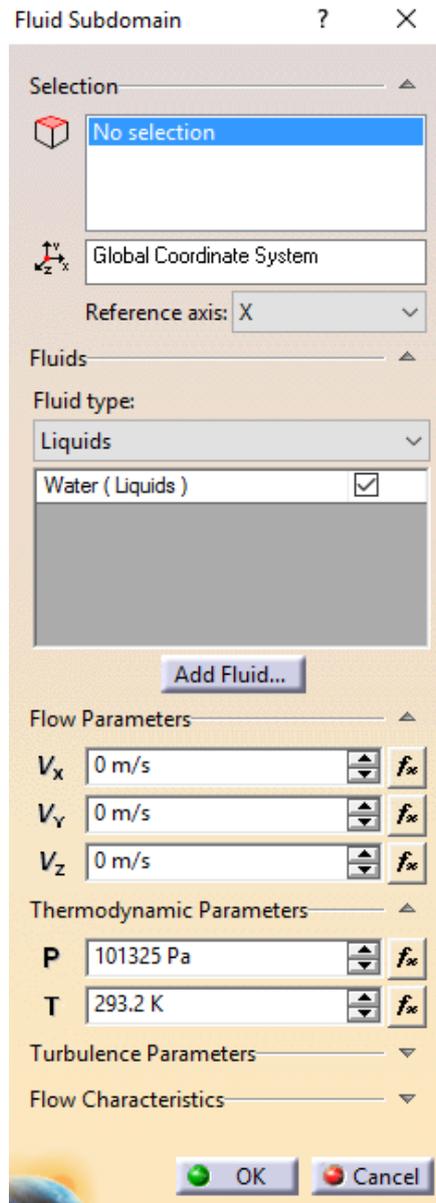


Figura 3.6. Ventana Fluid Subdomains

En esta ventana, es necesario especificar:

- **Selection:** Cara situada en el límite entre las sustancias.

Debe tener en cuenta que, para especificar el subdominio de fluido dentro de una región de fluido, debemos seleccionar esta condición en una de las caras situadas en el límite de la región, es decir, en el límite entre sustancias sólidas y fluidas, por ejemplo. El subdominio fluido especificado en el límite de la región se aplicará a toda la región del fluido.

La región seleccionada aparecerá en azul, como muestra el siguiente ejemplo de aire caliente circulando por el interior de un intercambiador de calor, que luego analizaremos con más detalle:

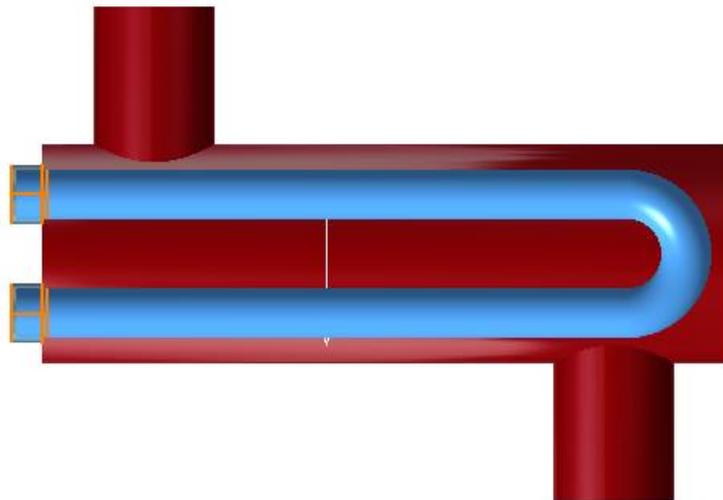


Figura 3.7. Volumen fluido del intercambiador

- **Global Coordinate System:**

Sistema de coordenadas. Normalmente se deja el que viene por defecto.

- **Fluid type:**

El tipo de fluido que circula por el interior del subdominio fluido. En el cuadro de grupo Fluidos, FloEFD le permite especificar el tipo de fluido y / o fluidos que se asignarán para el subdominio de fluido, así como las características de flujo, dependiendo del tipo de flujo seleccionado

- **Flow Parameters / Thermodynamic Parameters /Turbulence Parameters**

FloEFD le permite especificar parámetros de flujo inicial, parámetros termodinámicos iniciales y parámetros de turbulencia inicial (después de seleccionar una cara para aplicar el subdominio de fluido). Los ajustes se aplican al subdominio de fluido especificado.

3.3. Boundary Conditions

3.3.1. Condiciones de contorno generales

Las condiciones de contorno se necesitan donde el fluido entra o sale y pueden ser de muchos tipos: presión, caudal másico, caudal volumétrico o velocidad. Para especificarlas, debe hacer doble clic en **Boundary Conditions > Boundary Conditions Object > New Boundary Conditions**, donde encontraremos la siguiente ventana:

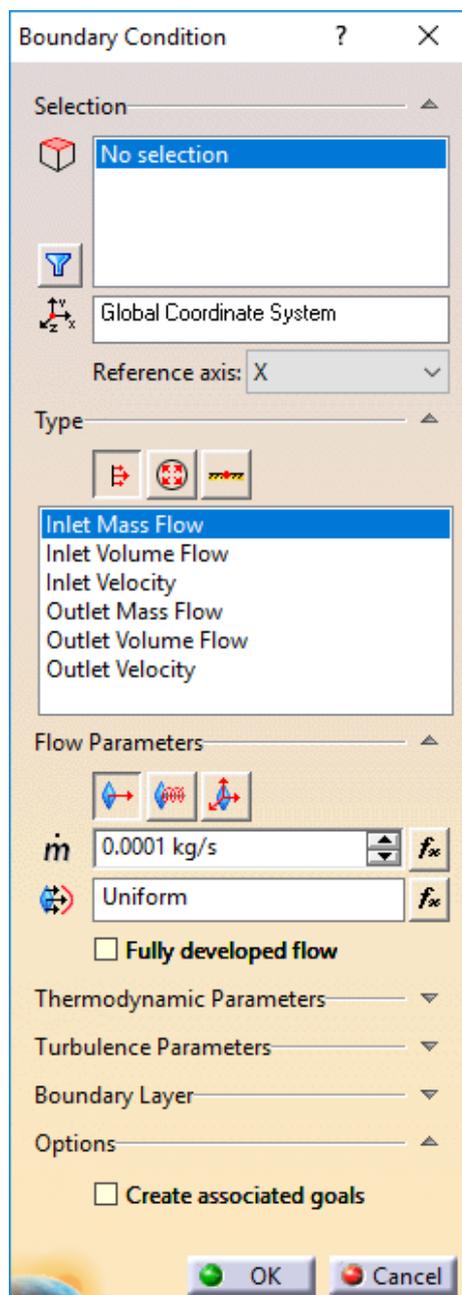


Figura 3.8. Ventana Boundary Condition

En la pestaña *Selection*, debe especificar la cara a la que se le aplica la condición de contorno (entrada o salida del fluido). Para mayor exactitud a la hora de seleccionarla geometría, puede pinchar con el botón derecho en el área gráfica sobre el elemento, y seleccionar **Other Selection**, donde dispondrá del despliegue de componentes. Otra opción análoga es hacer clic con el botón derecho en el componente del árbol del conjunto y seleccionar **Open Sub-Tree**.

En la pestaña *Type*, el tipo de condición de contorno que vamos a elegir. Podemos aplicar:

3.3.1.1. Caudal másico, volumétrico o velocidad

En esta opción podemos escoger entre:

- *Inlet Mass Flow*. Para definir un caudal másico de entrada.
- *Inlet Volume Flow*. Para definir un caudal volumétrico de entrada.
- *Inlet Velocity*. Para definir una velocidad de entrada.
- *Outlet Mass Flow*. Para definir un caudal másico de salida.
- *Outlet Volume Flow*. Para definir un caudal volumétrico de salida.
- *Outlet Velocity*. Para definir una velocidad de salida.

Antes de que el cálculo empiece, FloEFD comprueba las condiciones de contorno específicas para el balance de flujo másico. La especificación de las condiciones de contorno es incorrecta si el flujo másico total en las entradas no es igual al flujo másico total en las salidas. En tal caso, el cálculo no empezará. Además, dese cuenta de que el valor de flujo másico es recalculado de la velocidad o del valor especificado de flujo volumétrico en una entrada. Para evitar problemas especificando condiciones de contorno, se recomienda especificar al menos una condición de entrada de presión, dado que el flujo másico en una entrada de presión es automáticamente calculado para satisfacer la ley de la conservación de la masa.

Estas condiciones de contorno vendrán acompañadas de la pestaña *Flow Parameters*, donde pueden especificarse para las condiciones de entrada la forma en la que el flujo incide en la superficie (normal a ésta, en remolino o según un vector 3D) y otros datos para las condiciones de salida como la ratio de flujo másico o la velocidad.

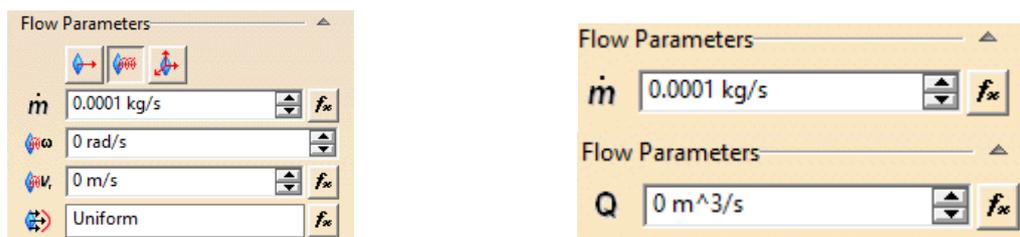


Figura 3.9. Pestaña Flow Parameters

3.3.1.2. Presiones

En esta opción podemos escoger entre:

- *Environment Pressure*. Presión ambiental.
- *Static Pressure*. Para definir una presión estática.
- *Total Pressure*. Para definir una presión total.

La condición de Environment Pressure es interpretada como una presión estática para flujos que salen y como una presión total para flujos que entran. Estas condiciones de contorno vendrán acompañadas de la pestaña *Thermodynamic Parameters*, donde se especificarán variables como la presión y la temperatura.

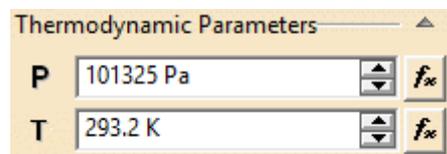


Figura 3.10. Pestaña Thermodynamic Parameters

3.3.1.3. Condiciones de pared

En esta opción podemos escoger entre:

- *Real Wall*. Para definir una condición de pared real.
- *Ideal Wall*. Para definir una condición de pared ideal.

Se puede especificar una condición de pared ideal para paredes adiabáticas sin fricción, y una condición de pared real para configurar la rugosidad, temperatura o el coeficiente de conducción de calor en las superficies del modelo seleccionadas. Para este caso, sólo con la opción de Real Wall aparecerá la pestaña de *Wall Parameters*, donde se especifican las características de la condición de contorno.

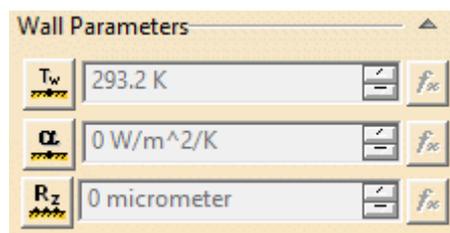


Figura 3.11. Pestaña Wall Parameters

3.3.2. Otras condiciones de contorno

3.3.2.1. Fan

Un ventilador es uno de los tipos de contorno que define el flujo. Está considerado como un dispositivo ideal que crea un flujo con un cierto caudal másico, que depende de la diferencia entre las presiones de entrada y de salida en la cara correspondiente. Para definir un fan, haga clic en la barra de herramientas superior en **Insert** > **New Fan...** y aparecerá la siguiente ventana:

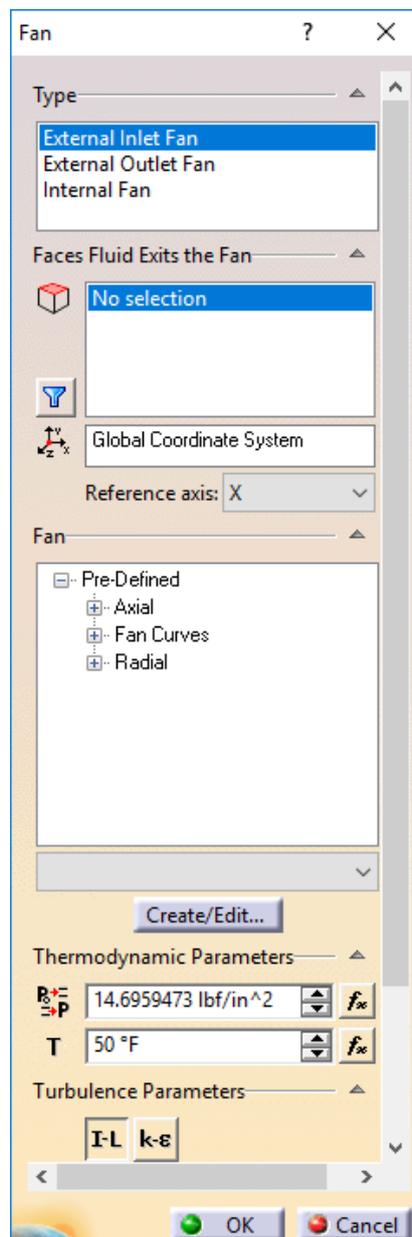


Figura 3.12. Ventana Fan

Puede especificar fan en las superficies que no tengan una condición de contorno o fuentes de calor involucradas. En las tapas también pueden definirse, así como en cualquier cara de la región fluida. Puede usar aquellos que vienen predefinidos por FloEFD, disponibles en **Engineering Database**, o definir el suyo propio de acuerdo con las especificaciones del fan.

El sistema de coordenadas de la cara es creado automáticamente en el centro de una superficie plana cuando se selecciona esta cara como la cara a aplicar la condición de contorno o ventilador. El eje X de este sistema de coordenadas es normal a la cara. El sistema de coordenadas de la cara se crea sólo cuando una cara plana es seleccionada.

3.3.2.2. Heat Source

Esta herramienta nos permite crear fuentes de calor volumétricas (Volume Source) o de superficie (Surface Source). Para acceder a ellas, haga clic en la barra de herramientas superior en **Insert > New Volume Source / New Surface Source**, y aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación:

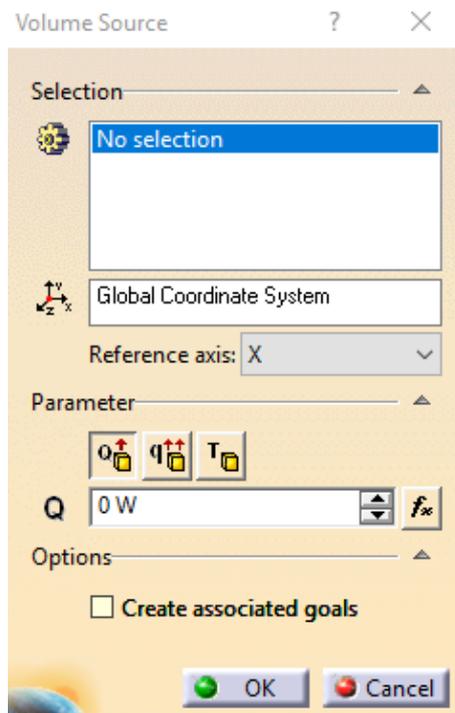


Figura 3.13. Ventana Volume Source

Esta ventana te permite especificar el ratio de generación de calor en vatios Q (Heat generation rate) o el ratio de generación de calor volumétrico en vatios por volumen q (Volumetric heat generation rate), o una condición de contorno de temperatura constante T para un volumen.

Para el caso de la superficie, es posible especificar las fuentes de calor en términos del ratio de la transferencia de calor (en vatios) o ratio de flujo (vatios por área).

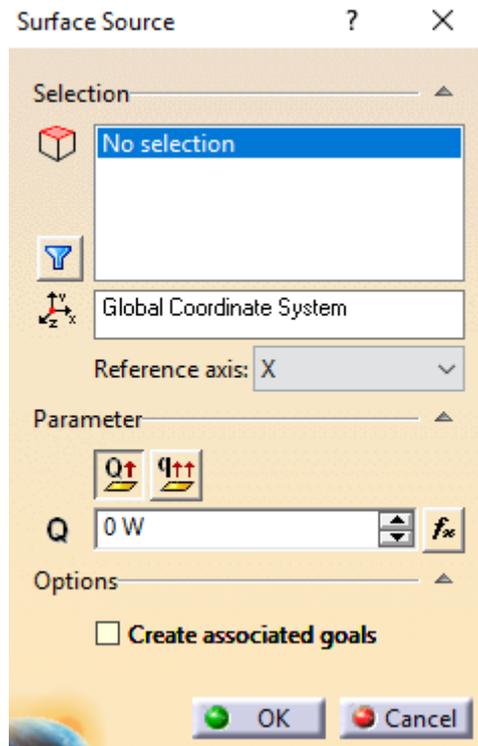


Figura 3.14. Ventana Surface Source

El valor de la fuente de calor especificada (Heat transfer rate) es distribuida a lo largo de la cara seleccionada en proporción a su área. Sólo las caras en contacto con el fluido son tomadas en cuenta.

3.3.2.3. Solid Material

En el caso de conducción de calor, es necesario especificar el tipo de sólido que tienen cada una de las paredes del modelo. Si desea aplicar un sólido a una superficie diferente a los que vienen predefinidos en FloEFD, puede crearlos haciendo clic en la barra superior de herramientas en **Insert > New Solid Material**, donde aparecerá la ventana de **Engineering Database** explicada previamente en el capítulo 2.

Tras definir todos los sólidos que requiera el modelo, puede aplicarlos a las superficies haciendo clic con el botón derecho en el árbol de FloEFD, en **Solid Material > Solid Materials Object > New Solid Material**, donde aparecerá la siguiente ventana:

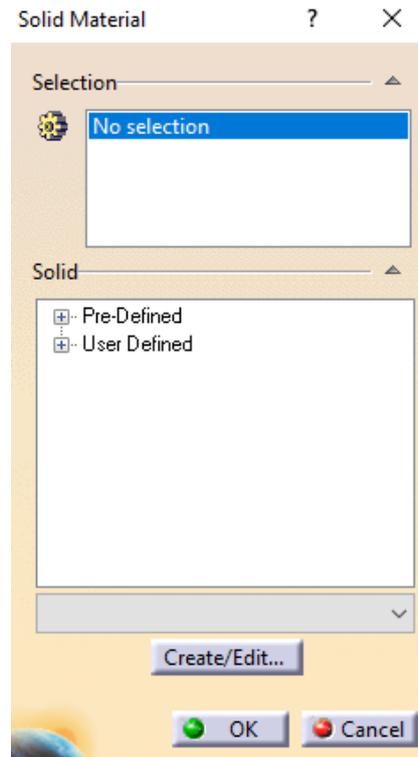


Figura 3.15. Ventana Solid Material

Donde puede seleccionar un sólido para cada cara seleccionada del modelo. Tenga en cuenta que las tapas creadas en las entradas y salidas del modelo también participan en la transmisión de calor. En caso de que desee que las tapas no tengan influencia en el análisis de conducción de calor, las puede excluir haciéndolas aislantes. Para ello, en la ventana anterior, ha de seleccionarlas y hacer clic en **Pre-Defined > Glasses and Minerals > Insulator**.

Como resultado de la aplicación de las condiciones de contorno, aparecerán sobre el modelo elementos flecha y otros elementos visuales, como se muestra a continuación:

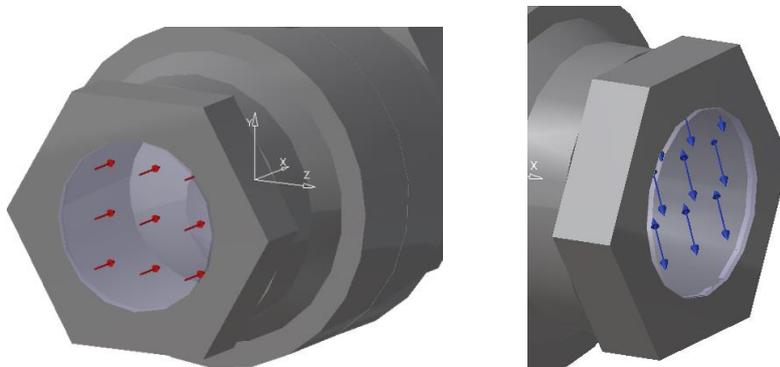


Figura 3.16. Condiciones de contorno aplicadas

3.4. Goals

Los Goals definen cuál es el objetivo del análisis, es decir, los parámetros importantes que necesitan converger con mayor precisión. De esta forma se reduce el tiempo del análisis, al buscar una solución menos precisa para el resto de parámetros. Por ejemplo, si estamos calculando una pérdida de presión entre una salida y una entrada que viene dada por:

$$C_p = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

Donde ρ es la densidad del fluido escogido para el análisis (conocida), y V la velocidad especificada en las condiciones de contorno (conocida), nuestro parámetro de interés para conseguir las pérdidas es la diferencia de presiones ΔP . La presión total es la variable que tomaríamos como un Goal en cada superficie. Para el caso en el que se quiera determinar un coeficiente de resistencia, por ejemplo, tomaremos como Goal global la fuerza en la dirección de la corriente.

Para definirlos, haga clic con el botón derecho en **Goals > Goals Object** y encontrará que los Goals pueden configurarse para:

- El dominio entero (Global Goals)
- Un volumen seleccionado (Volume Goals)
- Un área de superficie (Surface Goals)
- Un punto dado (Point Goals)

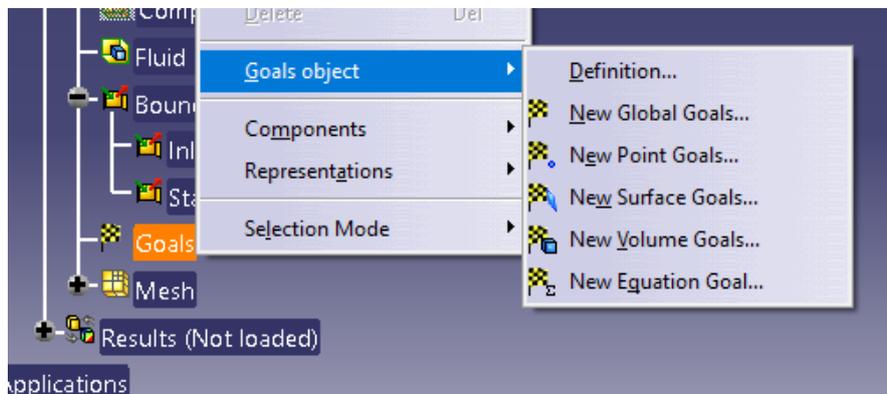


Figura 3.17. Tipos de Goals

Además, FloEFD puede tener en cuenta el valor medio, el mínimo valor o el máximo valor de un Goal, de forma que restrinja la búsqueda del valor esperado. Por ejemplo, para el caso de la superficie, haga clic con el botón derecho en **Goals > Goals Object > New Surface Goals**. En la imagen podemos ver que se requiere:

- Una cara en la que aplicar el parámetro (Pestaña Selection). Puede seleccionarla directamente en las condiciones de contorno previamente definidas a la izquierda.
- Definir el parámetro que vas a declarar como objetivo (Pestaña Parameters) Para seleccionarlo haga clic en la columna de Average (Av). Vemos como la columna de Use for Convergence control ya está seleccionada, porque de lo contrario el parámetro no influenciará en el criterio de parada de cálculo.
- Seleccionar un nombre para el Goal o dejarlo por defecto.

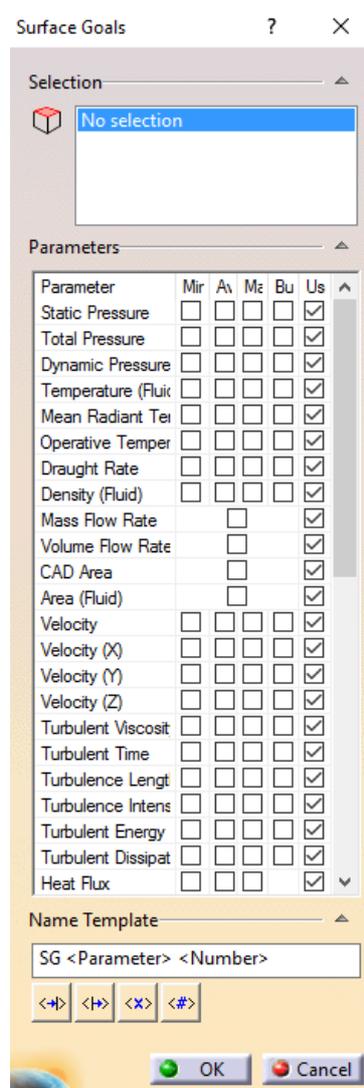


Figura 3.18. Ventana Surface Goals

Puedes seleccionar más de una cara a la vez. En ese caso, en la ventana de configuración del Goal te aparecerá una nueva opción “**Create goal for each Surface**”, que te permite crear dos goals diferentes para cada superficie, como vemos en la siguiente imagen:

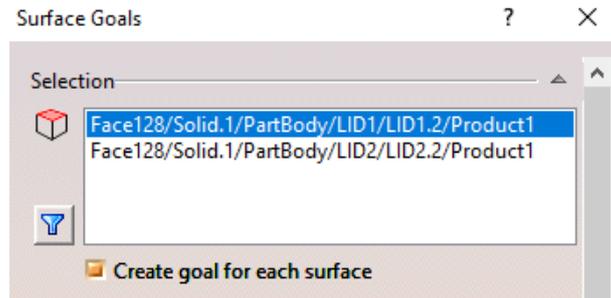


Figura 3.19. Opción create goal for each surface

Esta herramienta proporciona otra aplicación de gran utilidad: El uso de ecuaciones (**Equation Goal**), un goal definido por una función analítica de goals existentes y parámetros de entrada como variables. Por ejemplo, si se desea hallar un coeficiente de resistencia, podríamos calcularlo manualmente una vez se muestren los resultados tras el cálculo. Una manera más eficiente de actuar sería creando un *Equation Goal*, de manera que FloEFD lo calcule directamente. Para ello, haga clic en **Goals > Goals Object > New Equation Goal**. En la nueva pestaña que aparece, seleccione **Add Goal**  para añadir el parámetro de interés (en el caso del coeficiente de resistencia, la fuerza en la dirección X definida como goal previamente). A continuación, seleccione el goal en la ventana de la derecha y haga clic en . De esta forma, puede añadir la ecuación que le interese y seleccionar las unidades deseadas en la pestaña superior.



Figura 3.20. Ventana Equation Goal

Puede utilizar goals, parámetros de condiciones de datos de entradas y constantes en la expresión que define el goal. Si las constantes de la expresión representan algunos parámetros físicos (es decir, longitud, área, etc.), asegúrese de que estén especificados en el sistema de unidades del proyecto. FloEFD no tiene información sobre el significado físico de las constantes que usa, por lo que debe especificar la dimensionalidad por sí mismo.

3.5. Mesh

Para crear el mallado, es necesario haber especificado todas las condiciones de contorno previamente, dado que influyen en la configuración del mallado automático a la hora de definir el tamaño mínimo de hueco, que depende del tamaño de las características de las caras donde las condiciones de contorno son impuestas. Por el mismo motivo, también se recomienda definir previamente los goals involucrados en el análisis.

FloEFD genera automáticamente una malla dividiendo el dominio computacional en rodajas, que se subdividen en celdas. Las celdas se refinan si es necesario para resolver la geometría del modelo correctamente. Aunque la malla generada automáticamente es apropiada para la mayoría de los casos, pueden aparecer problemas derivados de las características físicas y geométricas del modelo que son finas y pequeñas, ya que pueden dar lugar a la creación de un número extremadamente alto de celdas, para las cuales la memoria del ordenador podría ser demasiado pequeña. En tales casos, se recomienda probar las opciones de FloEFD que te permiten ajustar manualmente el mallado computacional para resolver las características de estos modelos mucho mejor. A continuación, van a exponerse las distintas opciones de mallado que este programa ofrece.

3.5.1. Global Mesh

3.5.1.1. Automatic Mesh

Para generar la malla, haga clic con el botón derecho en **Mesh > Mesh Object > Global Mesh**.

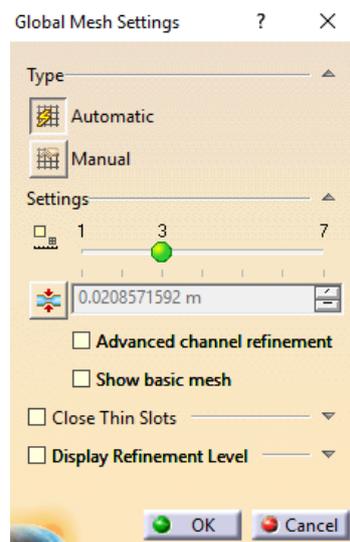


Figura 3.21. Ventana Global Mesh Settings

Seleccione Automatic en la pestaña *Type* para generar la malla. Para la siguiente pestaña, *Settings*, es necesario saber que FloEFD calcula el tamaño de separación mínimo predeterminado y el grosor mínimo de la pared utilizando información sobre las dimensiones generales del modelo, el dominio computacional y las caras en las que se especifican las condiciones de contorno y los goals. Sin embargo, esta información puede ser insuficiente para reconocer huecos relativamente pequeños y paredes de modelo delgadas, acarreado como consecuencia resultados inexactos. En estos casos, el tamaño mínimo de hueco y el espesor mínimo de pared deben especificarse manualmente. Por lo tanto:

- Podemos seleccionar el nivel de la malla inicial (**Level of Initial Mesh**), que es una medida del nivel de precisión de los resultados que se desea. Controla la resolución de la geometría por la malla. Cuanto más alto dejemos este valor, más precisa será.

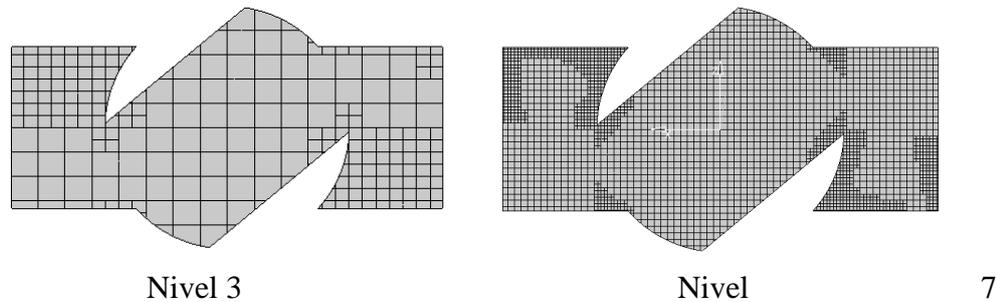


Figura 3.22. Ejemplos Level of Initial Mesh

- Asimismo, podemos decidir el tamaño mínimo de hueco (**Minimum Gap Size**), parámetro importante cuando se tienen pequeños detalles o características en el modelo, para que la malla no los pase por alto. Cuanto más pequeño sea este valor, más fina será la malla y más precisión obtendrán los resultados.

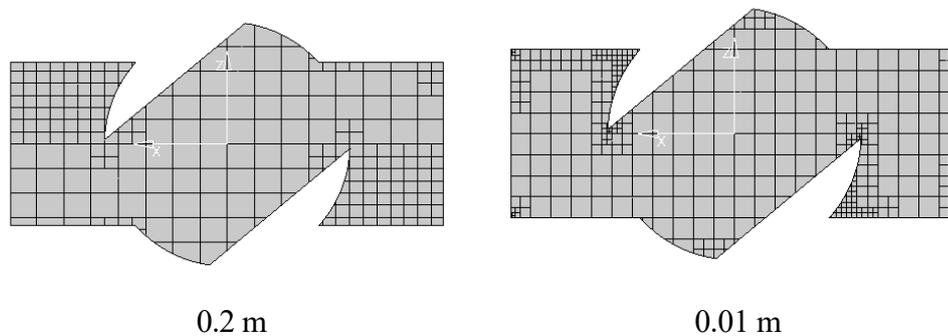


Figura 3.23. Ejemplos de Minimum Gap Size

Existen dos opciones más para seleccionar en esta pestaña, **Advanced Channel Refinement**, que acentúa el refinamiento de la malla en aquellas regiones donde es más fina, y **Show Basic Mesh**, que te permite mostrar el mallado básico para poder comparar la malla creada refinada con la inicial. A continuación se muestran los dos efectos:

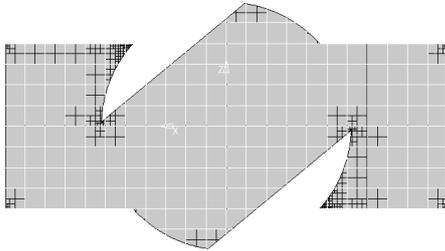


Figura 3.24. Show Basic Mesh

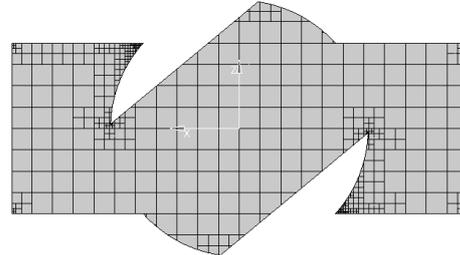


Figura 3.25. Advanced Channel Refinement

3.5.1.2. Manual Mesh

Para los casos en los que la malla automática no satisfaga sus necesidades, puede acudir al mallado manual seleccionando la casilla de *Manual* en **Mesh > Mesh Object > Global Mesh**, donde encontrará la siguiente ventana:

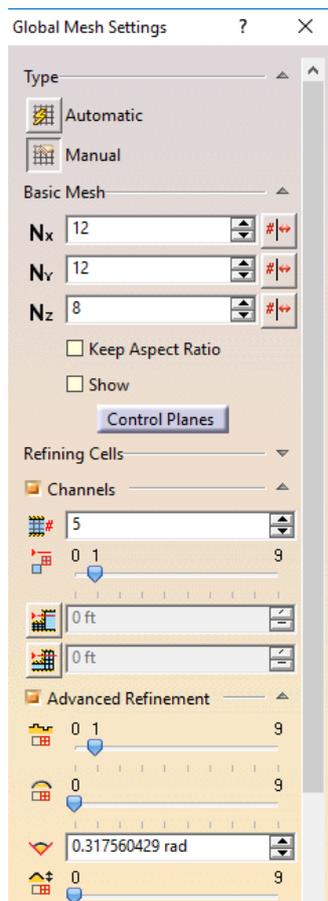


Figura 3.26. Manual Mesh

El llamado *Basic Mesh* se forma dividiendo el dominio computacional en rebanadas por planos paralelos que son ortogonales a los ejes del sistema de coordenadas global. La malla inicial se construye del *Basic Mesh* refinando las celdas de mallado básicas de acuerdo con la configuración de mallado especificado. En la siguiente imagen, podemos ver un ejemplo de un *Basic Mesh*, con los planos de control (*Control Planes*) marcados a color:

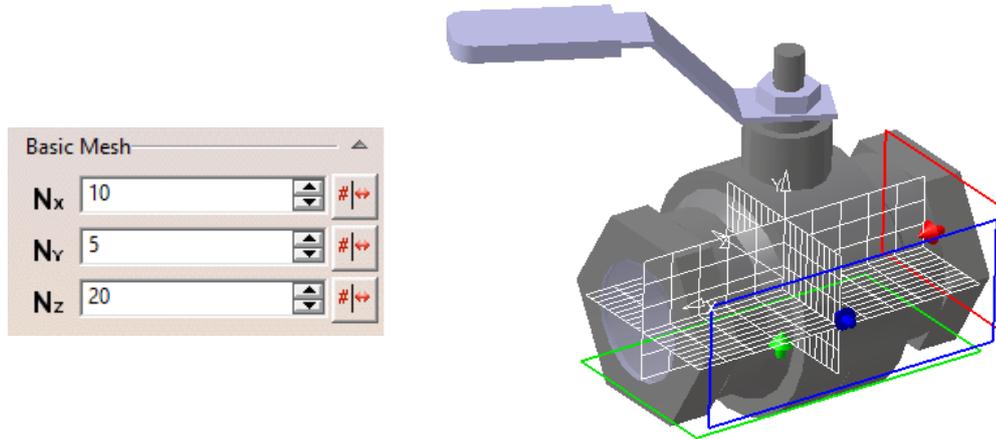


Figura 3.27. Control Planes

La pestaña de *Refining Cells* permite una malla más fina, aumentando el número de celdas en el fluido y en el límite del fluido con el sólido. La Pestaña Channel ayuda a realizar más divisiones en el mallado, de forma que cuanto mayor sea este parámetro más fina será la maya:

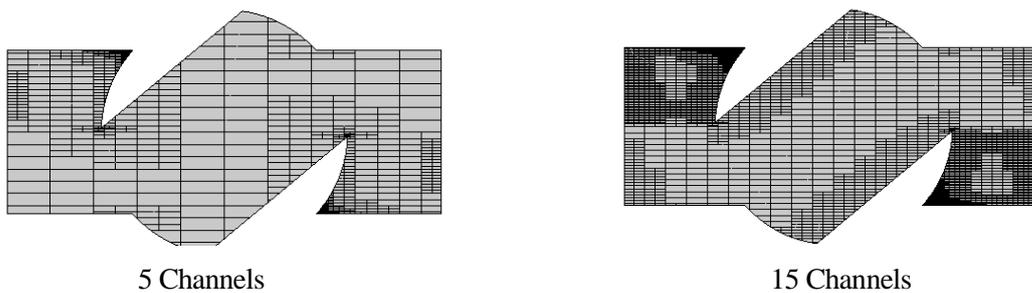


Figura 3.28. Ejemplo del parámetro Channel

3.5.2. Local Mesh

Para resolver adecuadamente una determinada región, puede usarse una malla local, de forma que se obtenga mayor precisión en la solución en esta zona sin crear una malla excesivamente fina en el resto de regiones. Para ello, haga clic con el botón derecho en **Mesh > Mesh Object > New Local Mesh**, y aparecerá la siguiente pestaña:

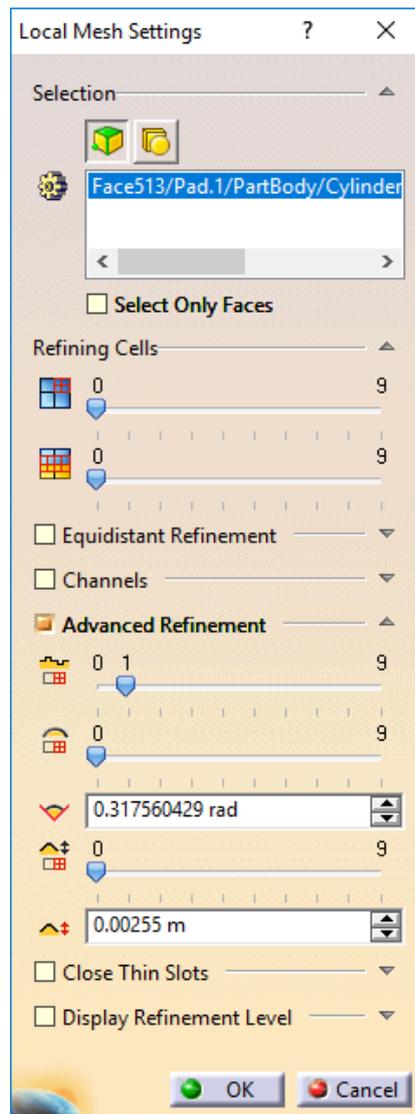


Figura 3.29. Ventana Local Mesh Settings

La región local puede ser definida por un componente del conjunto o especificando una cara, un eje o un vértice del modelo. La configuración del mallado local es aplicada a todas las células interceptadas por estos elementos. La ventana anterior contiene las mismas herramientas que Global Mesh.

3.6. Results

Una vez que se han definido todos los parámetros para resolver el análisis, ejecutamos el cálculo haciendo clic en la barra de herramientas superior, en la pestaña de FloEFD > Solve > Run Active FloEFD Project...y la siguiente ventana aparecerá:

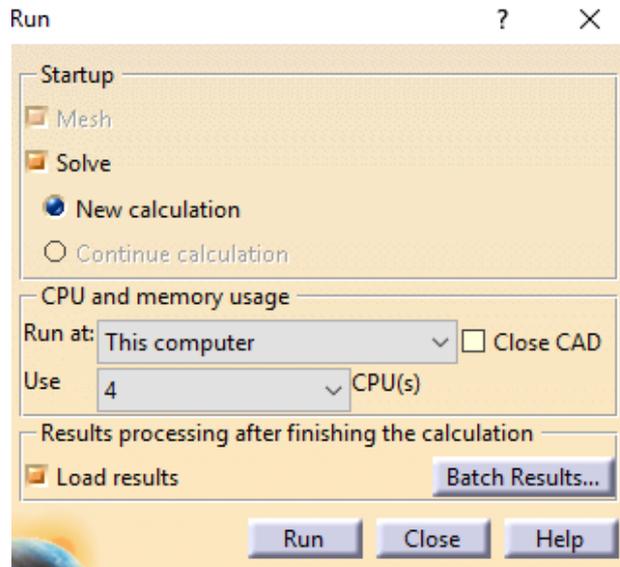


Figura 3.30. Ventana Run

En la nueva ventana, puedes seleccionar si deseas un cálculo desde cero (**New calculation**) o partir de uno ya realizado previamente (**Continue calculation**), si quieres comprobar el sólo el mallado (**Mesh**) o el resultado completo (**Solve**), así como especificar los CPU(s) de los que dispone tu ordenador en la pestaña *CPU and memory usage*. Si la casilla **Load results** está seleccionada, los resultados se cargarán automáticamente después de finalizar los cálculos; haga en **Run** para obtenerlos y dar paso al Solver.

Si tiene un conjunto de proyectos a analizar simultáneamente, FloEFD permite automáticamente su resolución a través de Batch Run. Para acceder a esta herramienta, haga clic en FloEFD > Solve > Batch Run, donde encontrará la siguiente ventana:

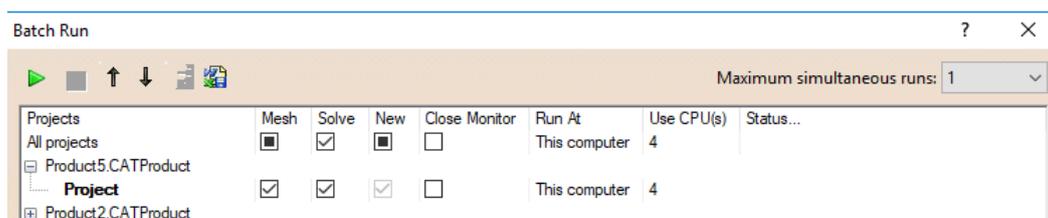


Figura 3.31. Ventana Batch Run

Seleccione la casilla de Solve en la fila de All projects si desea resolver todos los proyectos a la vez. Puede seleccionar Close Monitor en la misma fila para que FloEFD cierre automáticamente el Solver cuando el cálculo finaliza.

Capítulo 4

Visualización de resultados

Tan importante es la definición de los parámetros para el análisis como una correcta visualización de resultados para sacarle el máximo partido a nuestro estudio. A continuación, se desarrollan las distintas opciones de representación que ofrece FloEFD, partiendo del Solver que aparece tras ejecutar el cálculo y explicando con detalle cada módulo del árbol de **Results** de FloEFD.

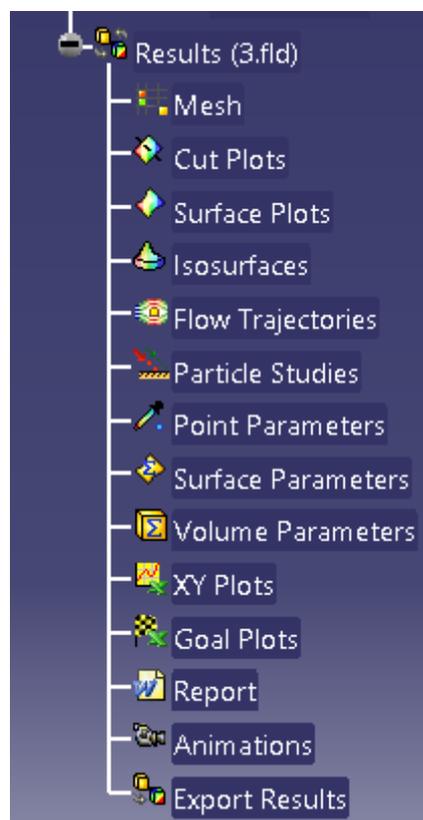


Figura 4.1. Árbol de Results

4.1. Solver

Se compone de varias ventanas:

- A la derecha, en *Log*, se toma un registro de cada paso que conlleva el proceso de solución, junto con las iteraciones y el instante.
- A la izquierda, en *Info*, podemos conocer los detalles de la malla. En la parte inferior tenemos advertencias respecto al análisis.

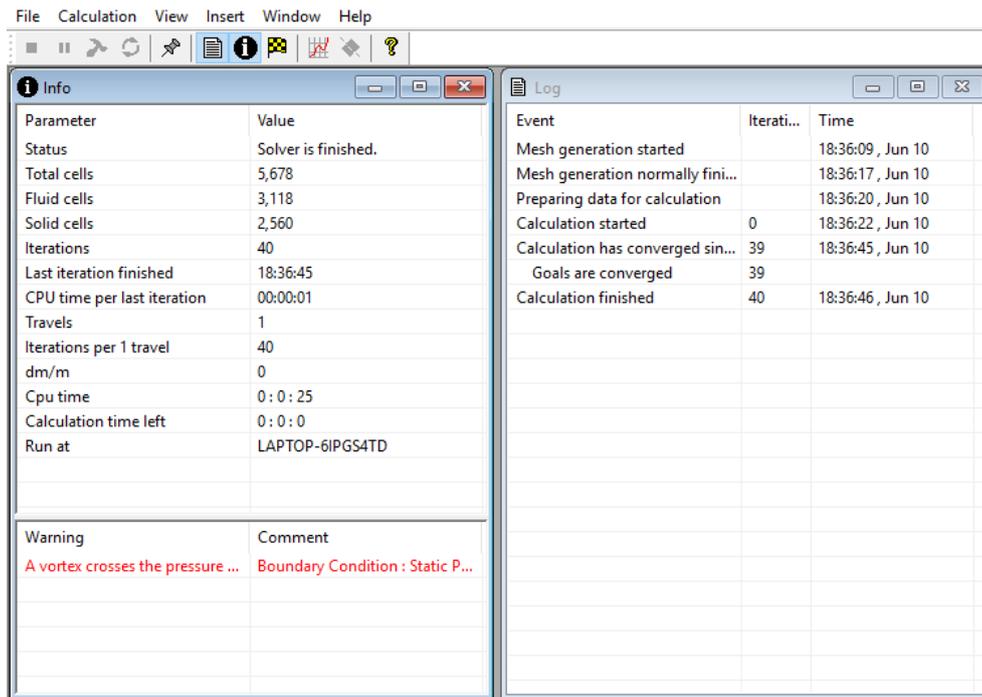


Figura 4.2. Ventana Solver

Puede emplear el icono **Suspend**  mientras se itera para los casos en los que el modelo es sencillo y se calcularía tan rápido que no daría tiempo suficiente para ver las consecuencias de la monitorización. Para ejemplos normales podría acceder a las herramientas de monitorización sin usar este icono. Una vez seleccionado, puede hacer clic en  **Insert Goal Plot**, para consultar el estado de nuestra variable importante, seleccionando el goal definido previamente y haciendo clic en **OK**.

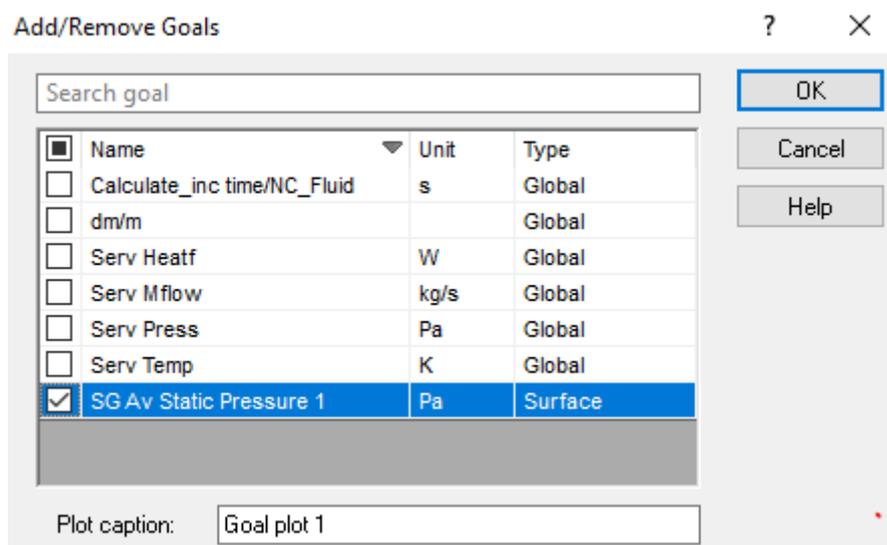


Figura 4.3. Ventana Insert Goal Plot

La ventana que aparece es la que se muestra a continuación, donde puede observarse el valor actual y el gráfico del goal seleccionado, así como el progreso actual hacia el final dado en porcentaje. Sin embargo, el valor del progreso es sólo una estimación y crece con el tiempo.

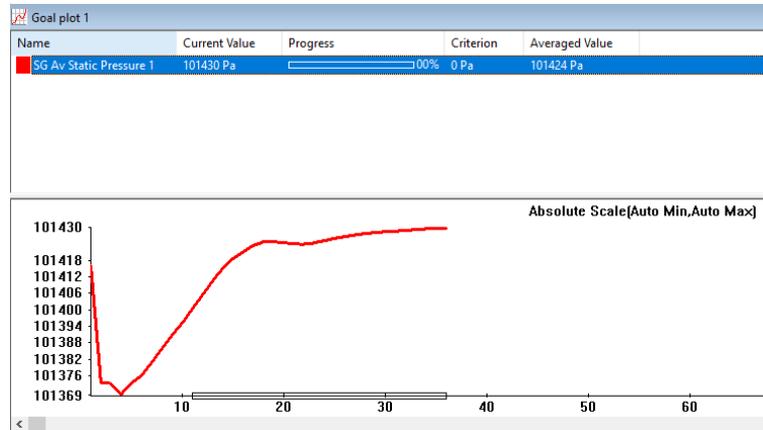


Figura 4.4. Resultado Goal Plot

Existe otro icono de importancia en el Solver, **Insert Preview** , que te permite conocer los resultados en determinados planos del conjunto mientras el cálculo se lleva a cabo. Es muy útil dado que ayuda a determinar si las condiciones de contorno están definidas correctamente y da al usuario una idea de cómo se verán los resultados desde las primeras etapas.

Al comienzo del cálculo, los resultados pueden parecer extraños o cambiar abruptamente. Sin embargo, a medida que la ejecución progresa, estos cambios disminuirán y los resultados se traducirán en una solución convergente. Para visualizarlos, es necesario elegir un plano en **Plane Name**, determinar un offset si se desea en **Plane offset**, y elegir un modo de visualización: contorno, isolíneas o vectores.

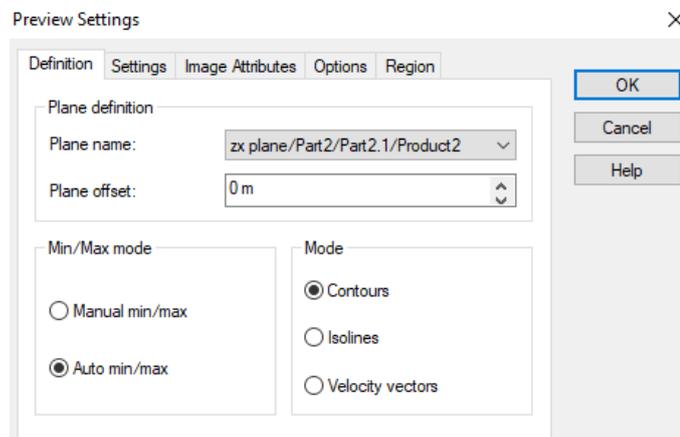


Figura 4.5. Ventana Preview Settings

Con objeto de ejemplificar los modos de representación, se muestra a continuación una válvula de bola llena de agua, girada un cierto ángulo respecto al flujo nominal, representada con contornos, isólineas y vectores de velocidad respectivamente:

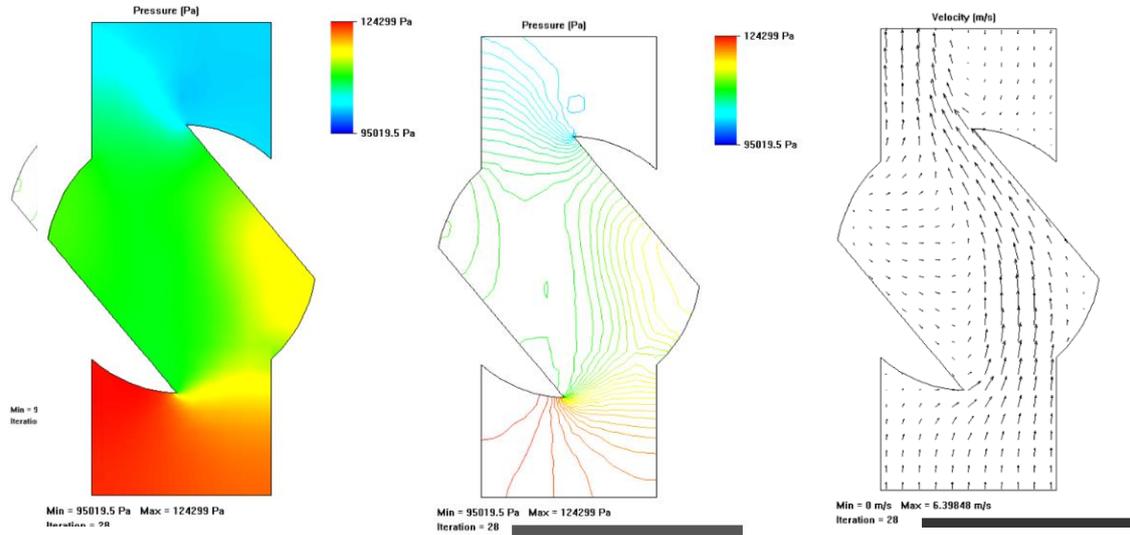


Figura 4.6. Contornos, isólineas y vectores del plano XZ

Una vez el cálculo haya finalizado, ya estamos listos para visualizar los resultados debidamente. Para una mejor visualización de los parámetros en el interior del elemento, podemos aplicar transparencia en el modelo. Para ello, haga clic en **FloEFD > Results > Display > Transparency**.

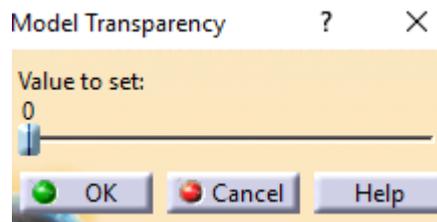


Figura 4.7. Ventana Model Transparency

4.2. Mesh

Es una herramienta que nos da información visual del mallado. Haciendo clic en el botón derecho en **Mesh > Mesh object > Mesh** tenemos a nuestra disposición representaciones gráficas del mallado en función del nivel de refinamiento, número de celdas, volumen del conjunto, criterio de tolerancia y criterio de curvatura. Según nivel de refinamiento tenemos:

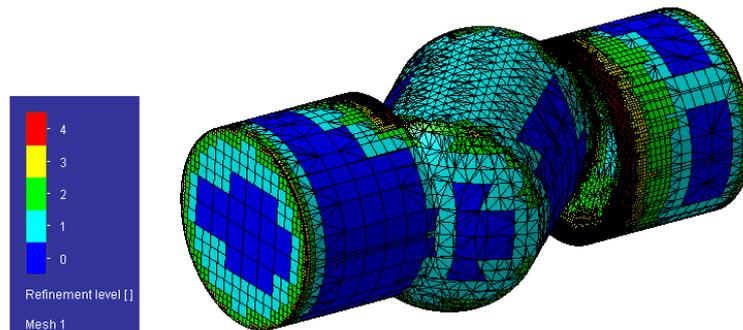


Figura 4.8. Representación del mallado según nivel de refinamiento

Para conseguir un gráfico como el anterior, en la ventana podemos seleccionar las superficies de la cual nos interesa conocer el mallado del fluido, la sección, el parámetro y los colores.

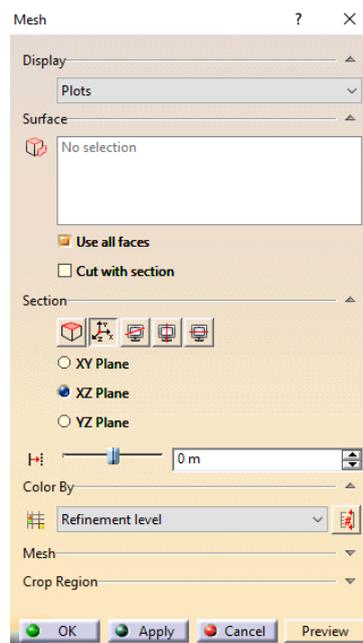


Figura 4.9. Ventana Mesh

4.3. Cut Plot

Muestra la distribución del parámetro seleccionado en un cierto plano del conjunto. Para acceder a esta herramienta, haga clic en **Cut Plots > Cut Plot Object > Cut Plot**. Una vez en el menú, puedes seleccionar el plano en el que quieres la presentación de resultados en primer lugar, aplicando Offset si lo deseas o ajustando valores máximos y mínimos del parámetro seleccionado. Los resultados pueden ser representados como un gráfico de contornos, con isóneas, vectores o una combinación aleatoria de los anteriores, como se muestra en la imagen a continuación:

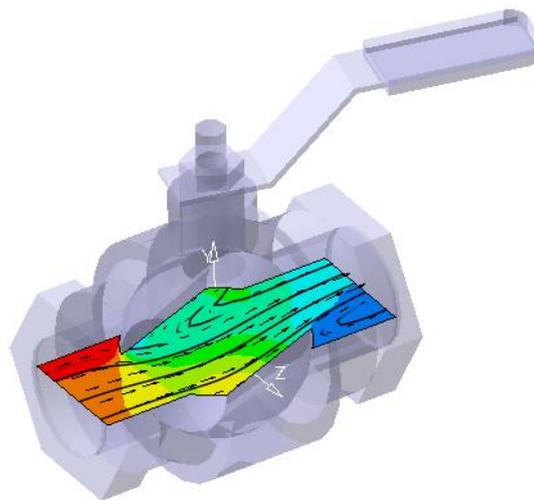


Figura 4.10. Cut Plot del plano XZ

Para una mejor visualización, puede esconder la geometría y quedarse sólo con el plano que el interese. Para ello seleccione **FloEFD > Results > Display > Display Geometry**

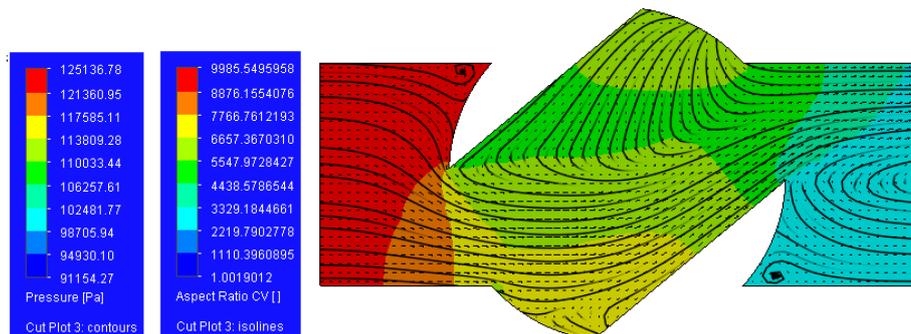


Figura 4.11. Plano XZ con contorno, líneas de corriente y vectores

4.3.1. Barra de colores

Una vez aplicado Cut Plot, aparecerá una barra de colores en el entorno de trabajo. Haciendo clic con el botón derecho en la barra puede seleccionar **Appearance** para determinar sus características: podemos cambiar la fuente de la leyenda, añadir un título (**Title**), elegir el número de valores a representar (**Max number of values**), modificar el tamaño (**Palette size**) y el color de fondo del recuadro (**Background**), etc

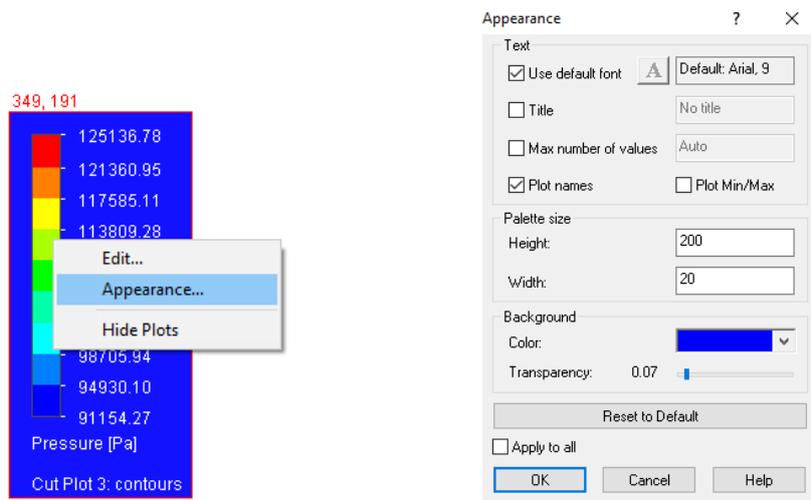


Figura 4.12. Ventana Appearance

Para opciones adicionales, puede hacer doble clic en la barra de colores para cambiar el parámetro mostrado, así como modificar los valores máximos y mínimos de la representación en la pestaña **Settings**, como vemos a continuación:

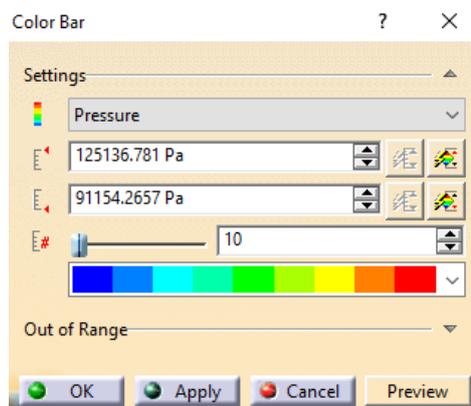


Figura 4.13. Ventana Color Bar

4.4. Surface Plot

Te permite ver la distribución del parámetro seleccionado en las superficies en contacto con el fluido. Tiene las mismas propiedades que la herramienta anterior. Para acceder a este menú, clic en **Surface Plots > Surface Plots Object > Surface Plot**. Haciendo clic en “**All faces**” podemos seleccionar todas las superficies, obteniendo una visión global tal como se muestra en la imagen:

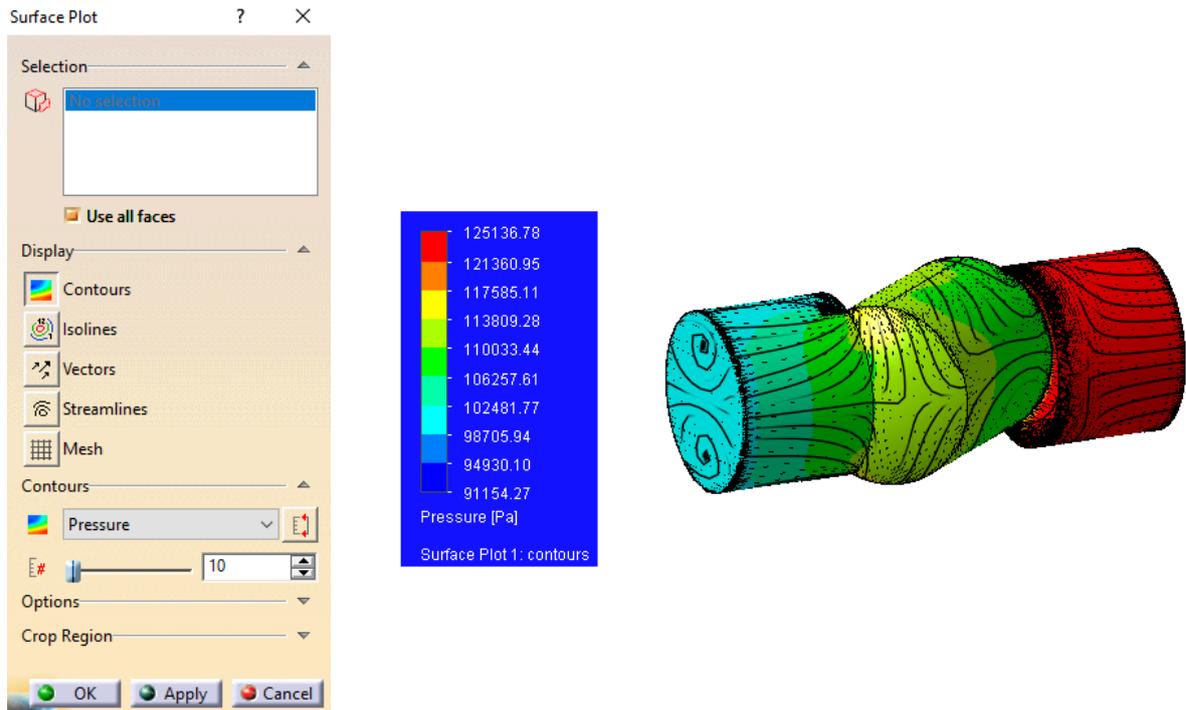


Figura 4.14. Ventana Surface Plot y resultados

4.5. Isosurfaces

La isosuperficie es una superficie tridimensional creada por FloEFD a un valor constante para una variable específica. Para verla, clic en **Isosurfaces > Isosurfaces Object > Isosurfaces**. En el menú podrás seleccionar el parámetro que se desea visualizar (**Appearance**), su valor constante (**Value**) y opciones de visualización (cuadrícula, transparencia, etc).

La isosuperficie es una forma útil de determinar el área 3D exacta dónde el dominio alcanza un cierto valor de presión, velocidad u otro parámetro. Para ello, se le añade un segundo valor en la ventana de Isosurfaces (**Value 2**).

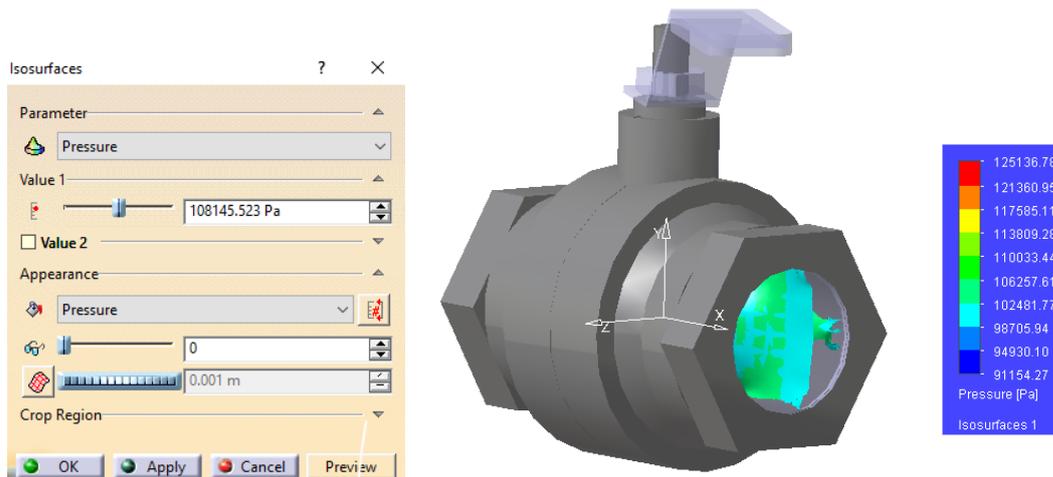


Figura 4.15. Ventana Isosurfaces y resultados

4.6. Flow Trajectories

A través de esta herramienta se pueden mostrar las líneas de corriente. Haciendo clic en **Flow Trajectories > Flow Trajectories Object > Flow Trajectories...** podemos configurarlas. Las trayectorias de flujo proporcionan una imagen muy buena del flujo de fluido en 3D. También puede verse cómo cambian los parámetros a lo largo de cada trayectoria exportando datos en Microsoft Excel. Además, puede guardar trayectorias como curvas de referencia.

En el menú tienes que seleccionar la superficie que atravesarán las líneas de corriente, el número de líneas a representar, la forma que adoptarán las líneas de corriente (en esferas, entubadas, bandas...), así como otras características específicas.

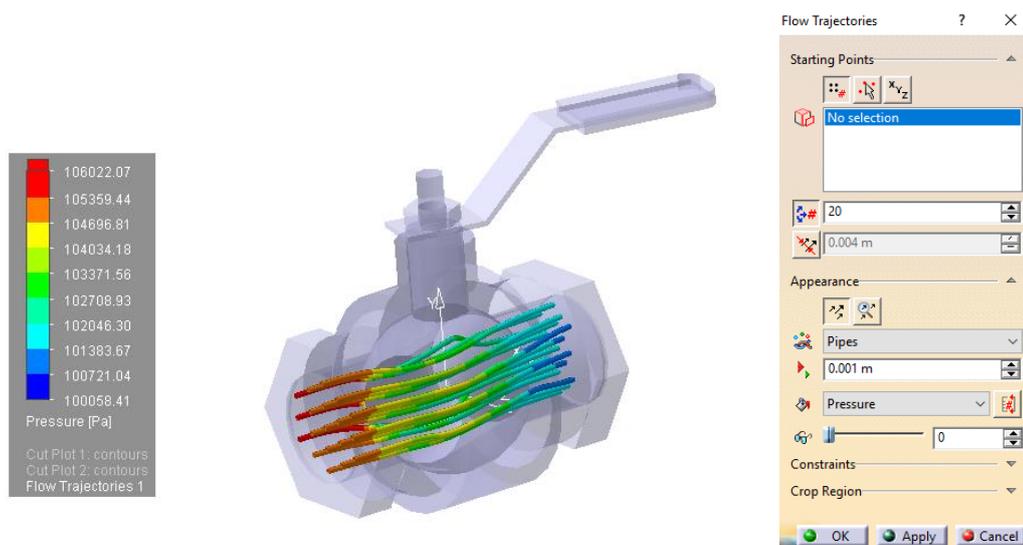


Figura 4.16. Ventana Flow Trajectories y resultados

4.7. Particle Studies

A través de esta herramienta se puede visualizar la trayectoria de las partículas con una animación. Haciendo clic en **Particle Studies > Particle Studies Object > Flow Wizard...** podemos configurar el estudio de la partícula a través de seis ventanas, donde se pide especificar:

- El nombre del estudio (*Ventana 1*)
- Qué partículas (propiedades de las partículas tales como el tamaño, número de líneas a representar y tipo de fluido), dónde empiezan (superficie normal que atraviesan al inicio), cómo empiezan (temperatura y velocidad inicial) y con qué intensidad empiezan (ratio de flujo másico). (*Ventana 2*)
- Si está interesado en determinar la erosión de la pared causada por las partículas o en considerar el vector de aceleración de gravedad para ver como la masa de las partículas influye en sus trayectorias (*Ventana 3*)
- Qué pasa cuando las partículas chocan con la pared (absorción, reflexión o reflexión ideal) . La condición de pared por defecto se aplica a todas las paredes del modelo, pero si desea especificar una condición diferente a una pared determinada, también es posible. (*Ventana 4*)
- Si desea obtener datos estadísticos de la interacción de la partícula con las paredes junto con la visualización de las trayectorias, o sólo datos estadísticos. (*Ventana 5*)

Haga clic en **Run** para calcular el estudio de la partícula. (*Ventana 6*).

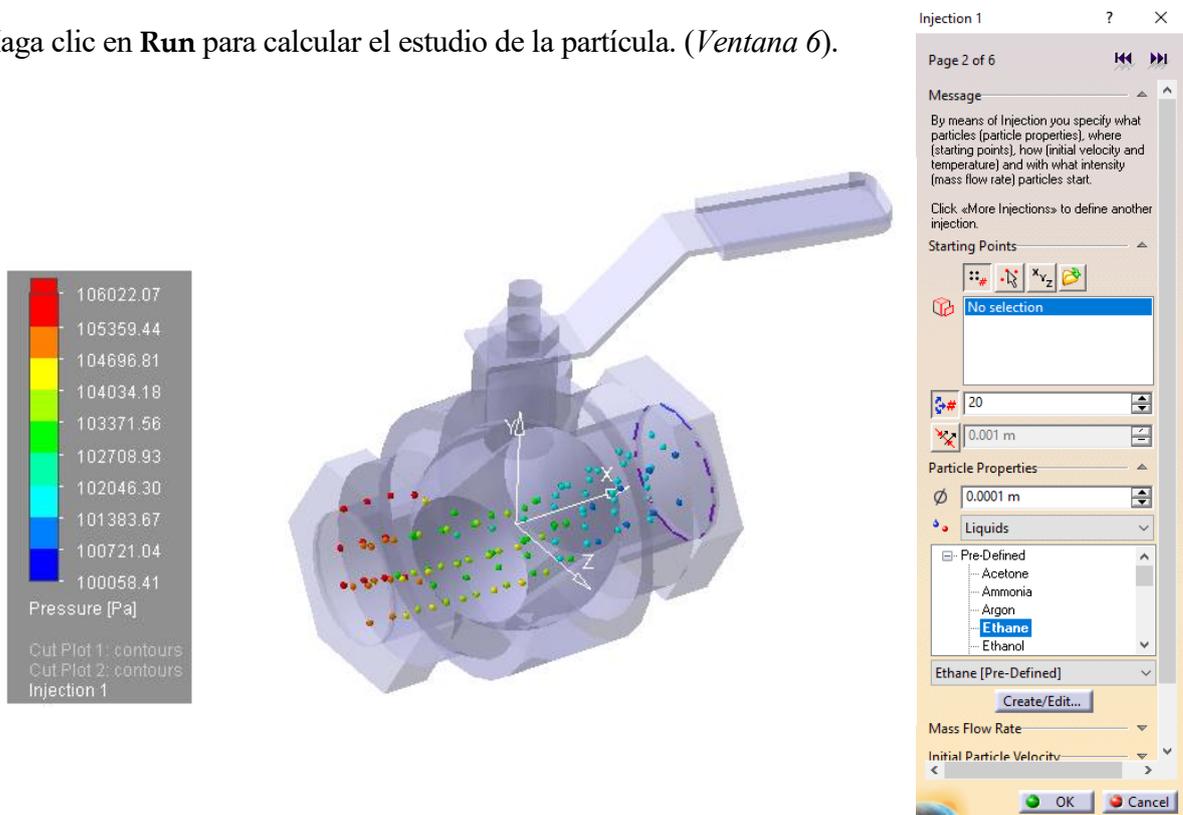
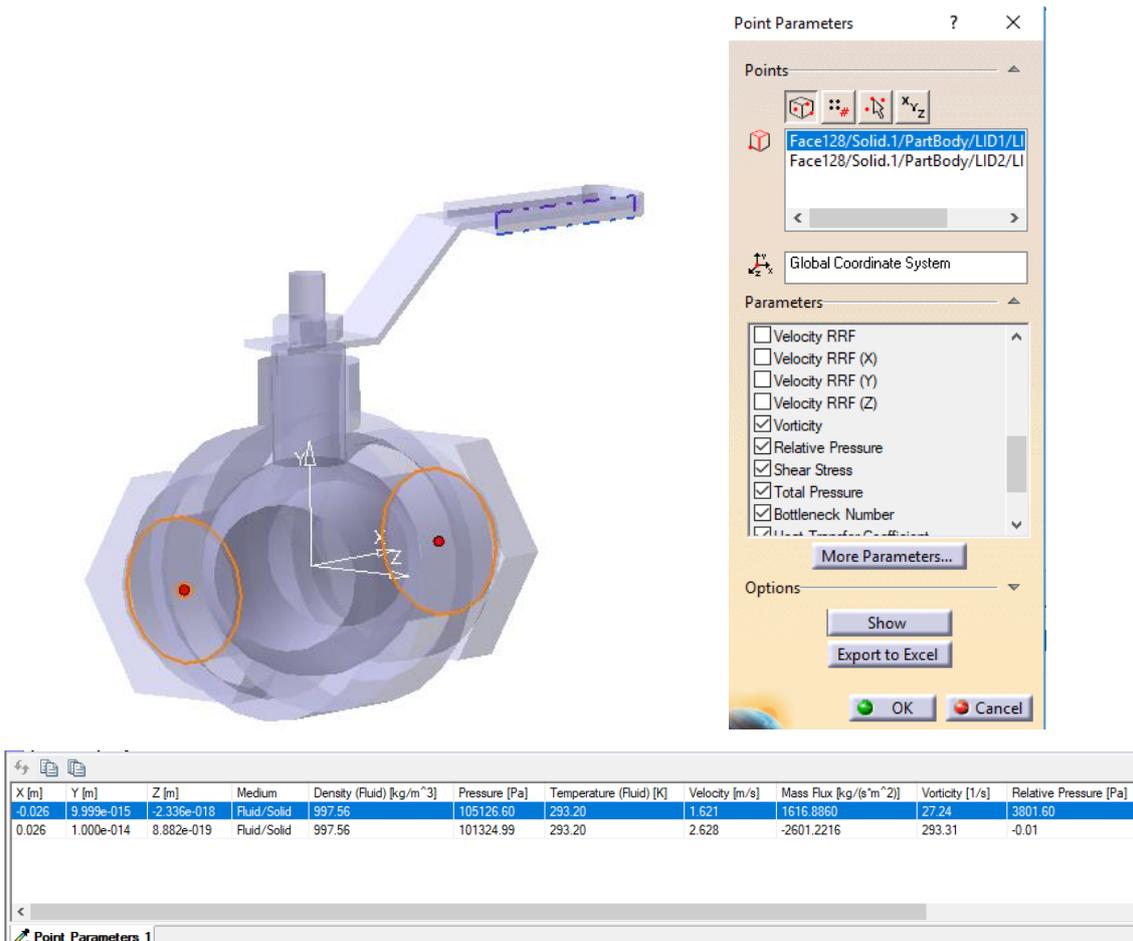


Figura 4.17. Ventana Particle Studies y resultados

4.8. Point Parameters

Esta herramienta nos permite conocer cualquier parámetro en cualquier punto del dominio fluido. Para acceder a ella, haga clic con el botón derecho en **Point Parameters > Point Parameters Object > Definition...** y en la ventana que sale a continuación puede especificar los puntos que desee y los parámetros a conocer. La información puede ser mostrada en pantalla o exportada a un archivo Excel.



X [m]	Y [m]	Z [m]	Medium	Density (Fluid) [kg/m ³]	Pressure [Pa]	Temperature (Fluid) [K]	Velocity [m/s]	Mass Flux [kg/(s*m ²)]	Vorticity [1/s]	Relative Pressure [Pa]
-0.026	9.999e-015	-2.336e-018	Fluid/Solid	997.56	105126.60	293.20	1.621	1616.8860	27.24	3801.60
0.026	1.000e-014	8.882e-019	Fluid/Solid	997.56	101324.99	293.20	2.628	-2601.2216	293.31	-0.01

Figura 4.18. Ventana Point Parameters y resultados

4.9. Surface Parameters

Los parámetros de superficie son una característica utilizada para determinar los valores de presión, fuerzas, flujos de calor, así como muchas otras variables en cualquier cara de su modelo en contacto con el fluido. Para acceder a esta herramienta, haga clic con el botón derecho en **Surface parameters > Surface parameters Object > Surface parameters...** y le aparecerá la siguiente ventana:

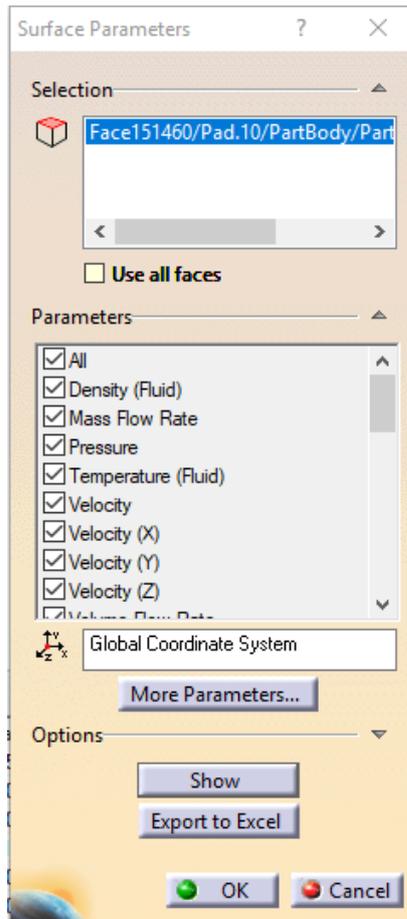


Figura 4.19. Ventana Surface Parameters

Seleccione la superficie, los parámetros a representar y, por último, seleccione **Show**. Los valores de los parámetros calculados se muestran en el panel situado en la parte inferior de la pantalla. Los parámetros locales se muestran en el lado izquierdo del panel inferior, mientras que los parámetros integrales se muestran en el lado derecho. Si desea exportar estos datos a Excel, seleccione **Export to Excel**.

Tomando todos los parámetros, aparecerá una ventana como la que se muestra a continuación:

Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m ²]
Pressure [Pa]	101428.65	101432.01	101430.28	101430.28	0.0095
Density (Fluid) [kg/m ³]	997.56	997.56	997.56	997.56	0.0095
Velocity [m/s]	0.053	0.053	0.053	0.053	0.0095
Velocity (X) [m/s]	0.053	0.053	0.053	0.053	0.0095
Velocity (Y) [m/s]	0	0	0	0	0.0095
Velocity (Z) [m/s]	0	0	0	0	0.0095

Surface Parameters 1

Figura 4.20. Resultados de los parámetros

4.10. Volume Parameters

Para acceder a esta herramienta, haga clic con el botón derecho en **Volume parameters** > **Volume parameters Object** > **Volume parameters...** De nuevo, los parámetros locales se muestran en el lado izquierdo del panel inferior, mientras que los parámetros integrales se muestran en el lado derecho.

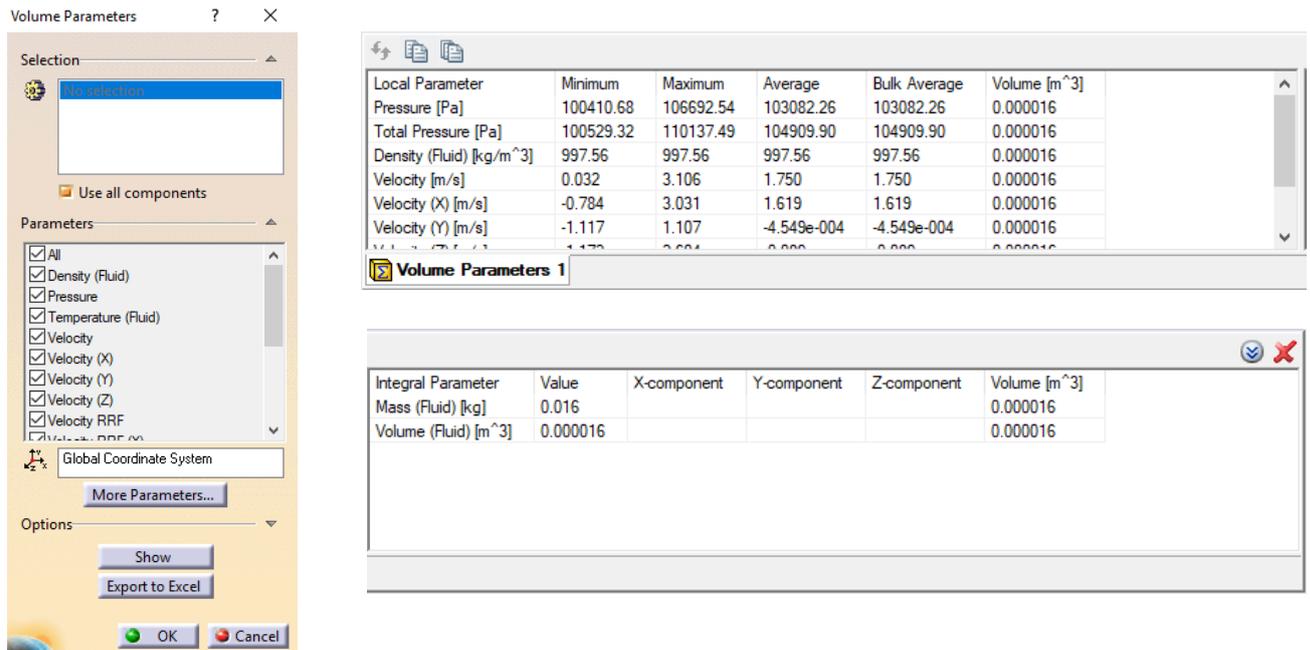


Figura 4.21. Ventana de Volume Parameters y resultados

4.11. XY Plots

Nos permite graficar la distribución de un parámetro a lo largo del modelo usando un sketch creado previamente. Para ello, haga clic con el botón derecho en **XY Plots** > **XY Plots Object** > **XY Plots...** y le aparecerá una ventana donde:

- En *Selection*, haga clic en el sketch convenientemente creado previamente.
- En cuanto al sistema de referencia, Global Coordinate System, seleccione el eje de referencia que desea utilizar.
- En *Parameters*, seleccione los parámetros cuya evolución desea conocer.
- En *Resolution*, puede seleccionar la resolución de la geometría y el número de puntos que desea escoger a lo largo del sketch para la representación. Cuanto mayor sea este número, mayor precisión obtendrá en los resultados.

- Por último, en *Options*, puede mostrar directamente el resultado en una ventana en CATIA haciendo clic en Show, o bien, exportar los datos a Excel en Export to Excel, donde aparecerá una hoja de cálculo con las tablas de datos y los gráficos XY que le permiten ver cualquier resultado a lo largo de las líneas esbozadas.

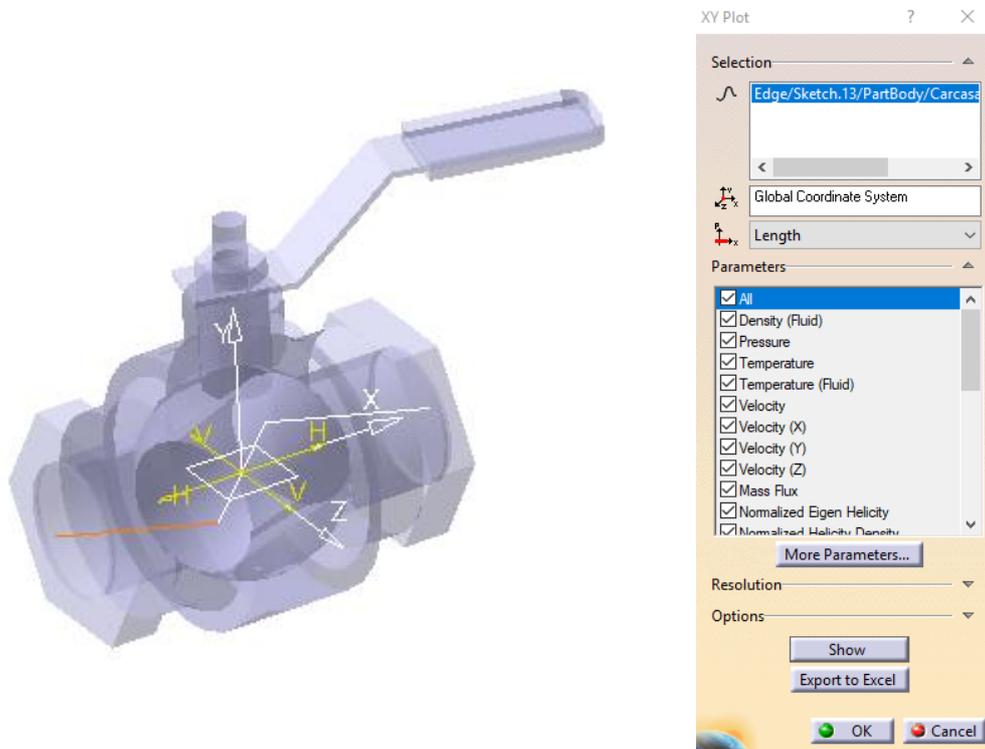


Figura 4.22. Ventana de XY Plots y vista del Sketch

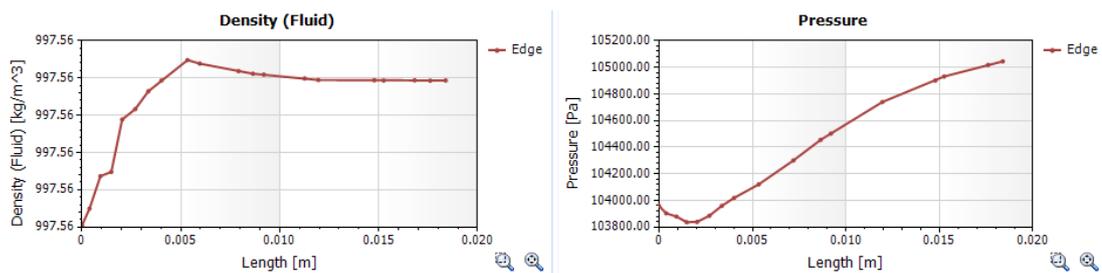


Figura 4.23. Gráficos XY

4.12. Goal Plots

Esta herramienta permite estudiar cómo ha cambiado el valor del goal definido previamente en el transcurso del cálculo. Para acceder a ella, haga clic con el botón derecho del ratón en Goal Plots > Goals Plots Object > Goal Plot... y aparecerá la siguiente ventana:

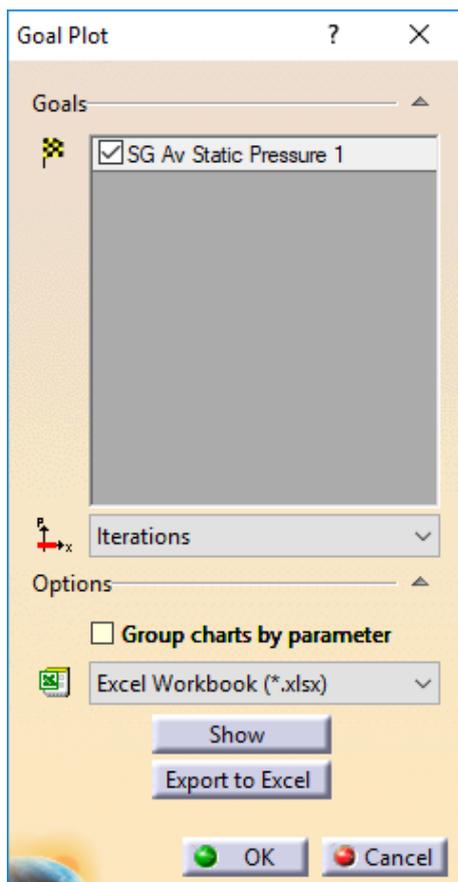


Figura 4.24. Ventana Goal Plot

Si selecciona los goals involucrados y hace clic en **Export to Excel**, verá que cada goal se muestra graficado en una hoja separada en Excel. Además, los valores convergentes de todos los goals del proyecto se muestran en la hoja **Summary** de dicho Excel creado automáticamente:

[Project [Project]]						
Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
SG Av Static Pressure 1	[Pa]	101325,0003	101325,0002	101324,9975	101325,0017	100

Figura 4.25. Resultados en Excel

4.13. Report

Es una herramienta que te permite crear documentos Word y Excel, así como guardar imágenes y capturas del modelo directamente. Para acceder a ella, haga clic con el botón derecho en el **Report > Report Object > Report**.

4.14. Animations

Haciendo clic en el botón derecho en **Animations > Animations object > Animation...** accedemos a una herramienta que permite visualizar modelos rotativos. Puede especificar el tiempo de la animación, los ejes de rotación y el sentido de giro.

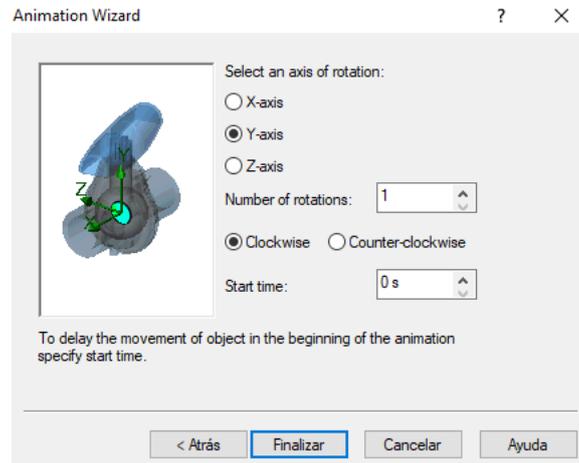


Figura 4.26. Ventana Animation Wizard

4.15. Export Results

Esta herramienta permite la exportación de archivos a otros programas de gran aplicación como NASTRAN para el análisis de la estructura.

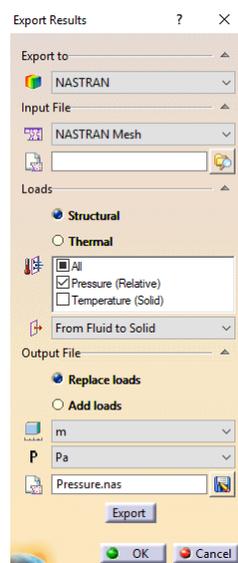


Figura 4.27. Ventana Export Results

4.16. Customize tree

A lo largo del tutorial, hemos estudiado las herramientas básicas que aparecen en el programa cuando se crea el proyecto. Sin embargo, puede acceder al resto de ellas y cambiar la visualización de las mismas pulsando con el botón derecho en el **nombre del proyecto** > ***name* object** > **Customize Tree**. Aparecerá una ventana como la de a continuación, donde puede tildar los módulos que considere conveniente tener en cuenta en su proyecto.

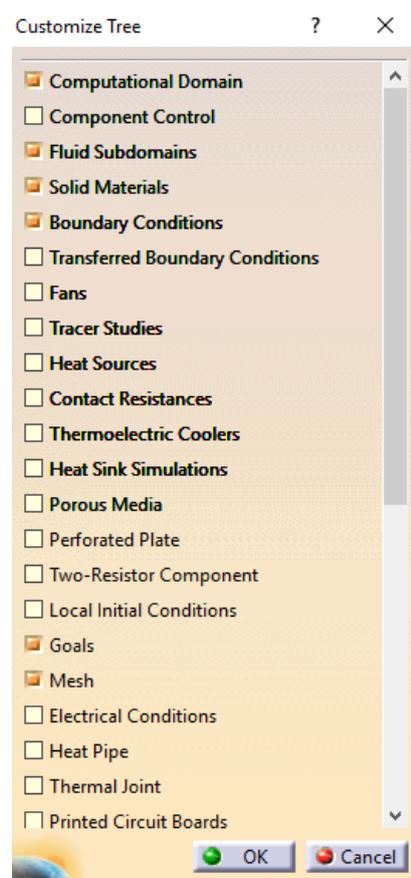


Figura 4.28. Ventana Customize Tree

Capítulo 5

Aplicaciones prácticas

En este apartado se trata un ejemplo específico de un fenómeno de conducción de calor, que permite conocer opciones avanzadas de FloEFD que no tenían aplicación lógica con el ejemplo de la válvula de bola.

5.1. Intercambiador de calor

Un intercambiador de calor es un radiador diseñado para transferir calor entre dos fluidos, o entre la superficie de un sólido y un fluido en movimiento. Son elementos fundamentales en los sistemas de calefacción, refrigeración, acondicionamiento de aire, producción de energía y procesamiento químico, además de en aparatos de la vida cotidiana como calentadores, frigoríficos, calderas, ordenadores, el radiador del motor de un automóvil, etc.

En este caso vamos a tratar el estudio de un intercambiador de tubo en forma de U, en el que la separación entre los fluidos es siempre la pared de un tubo cilíndrico, por cuyo interior circula uno de ellos (aire), mientras el otro lo hace por el exterior (agua). El objeto del estudio será el cálculo del rendimiento, definido como:

$$\epsilon: \frac{\text{transferencia de calor actual}}{\text{transferencia de calor máxima posible}}$$

Dependiendo de la capacidad del fluido caliente y el frío, pueden distinguirse dos definiciones:

$$- C_{caliente} > C_{frío}$$

$$\epsilon = \frac{T_{frío}^{salida} - T_{frío}^{entrada}}{T_{caliente}^{entrada} - T_{frío}^{entrada}}$$

$$- C_{caliente} < C_{frío}$$

$$\epsilon = \frac{T_{caliente}^{entrada} - T_{caliente}^{salida}}{T_{caliente}^{entrada} - T_{frío}^{entrada}}$$

5.1.1. Apertura del conjunto.

El modelo por analizar va a ser el siguiente:

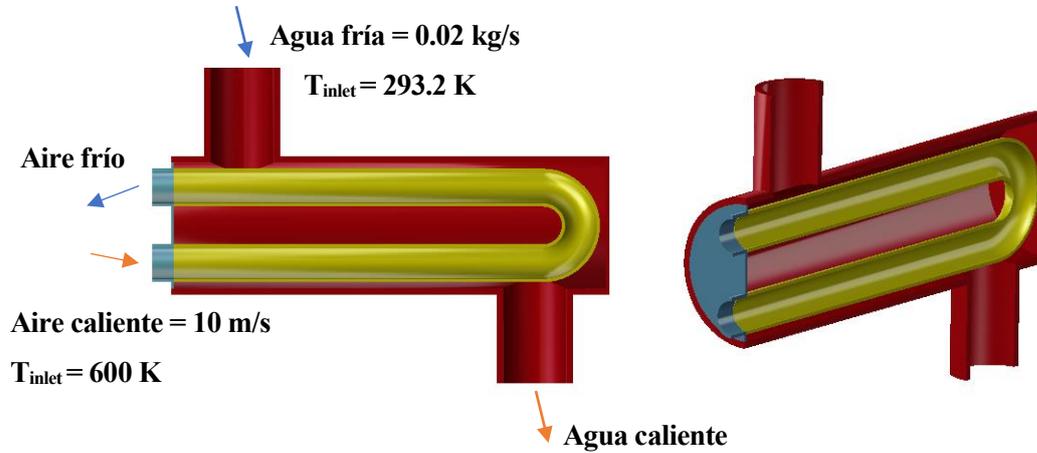


Figura 5.1. Intercambiador de calor

5.1.2. Configuración del asistente.

<i>Nombre del proyecto</i>	Intercambiador
<i>Sistema de unidades</i>	SI
<i>Tipo de análisis</i>	Internal
<i>Características físicas</i>	Heat conduction in solids
<i>Tipo de fluido</i>	Gases / Air Liquids / Water Default fluid type: Liquids
<i>Tipo de sólido</i>	Steel Stainless 321
<i>Condiciones de pared</i>	Heat transfer coefficient $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ Temperature of external fluid 293.2 K
<i>Condiciones iniciales</i>	Pressure 2 atm Temperature 293.2 K

Tabla 5.1. Configuración del asistente

5.2. Árbol de FloEFD

5.2.1. Computational Domain

Al ser un intercambiador no simétrico, dejamos el dominio computacional establecido por defecto.

5.2.2. Fluid Subdomains

Al haber seleccionado Líquidos como fluido por defecto y agua como ejemplo, necesitamos especificar el otro tipo de fluido (el aire) para la región del modelo que se encuentra en el interior del tubo con el flujo de aire caliente. Para hacer esto, necesitamos establecer subdominios, donde especificaremos el Gas como el tipo de fluido para la región seleccionada, y el Aire como fluido determinado.

Para ello, haga clic en la barra de herramientas superior en **Insert > Fluid Subdomain** y rellene los campos tal como se adjunta en la imagen de la ventana a continuación:

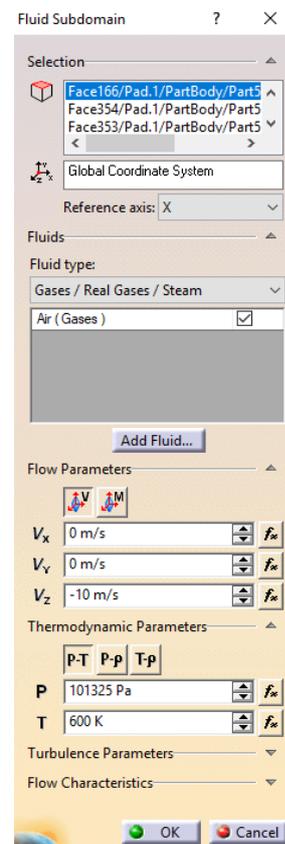
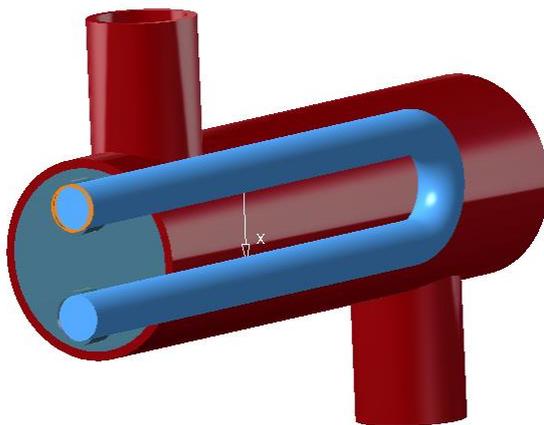


Figura 5.2. Ventana Fluid Subdomain y dominio fluido

5.2.3. Boundary Conditions

<i>Entrada aire caliente</i>	Inlet velocity $\vec{v} = 10 \text{ m/s}$ $T = 600 \text{ K}$ $P = 1 \text{ atm}$
<i>Entrada agua fría</i>	Inlet Mass Flow $\dot{m} = 0.02 \text{ kg/s}$ $T = 293.2 \text{ K}$
<i>Salida aire frío</i>	Environment Pressure $P = 101325 \text{ Pa}$ $T = 600 \text{ K}$
<i>Salida agua caliente</i>	Environment Pressure $P = 202650 \text{ Pa}$ $T = 293.2 \text{ K}$

Tabla 5.2. Condiciones de contorno

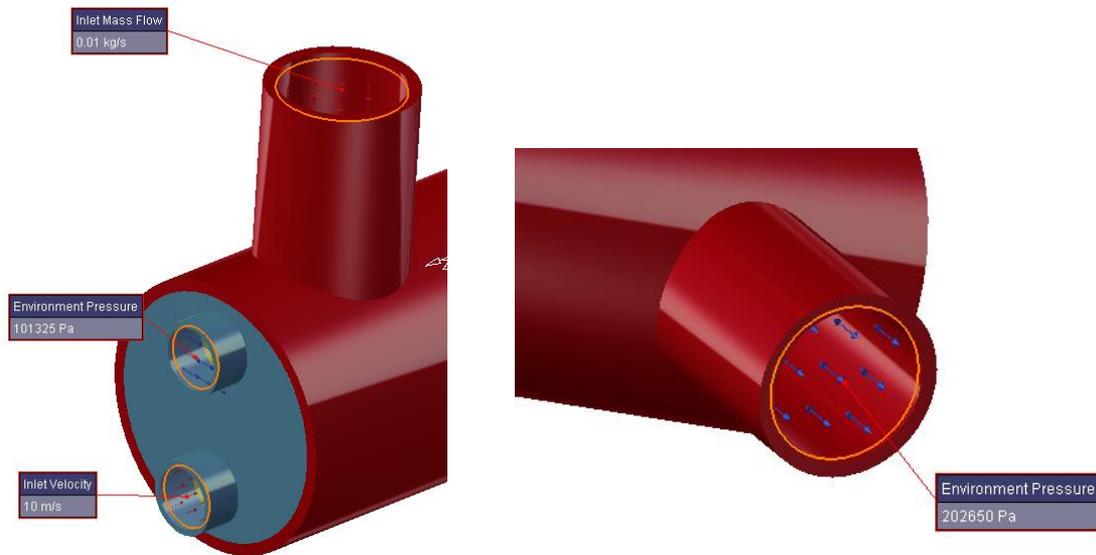


Figura 5.3. Aplicación de condiciones de contorno

5.2.4. Goals

<i>Volume Goal</i>	VG Min Temperature (Solid)
--------------------	----------------------------

Tabla 5.3. Goals

5.2.5. Mesh

<i>Global Mesh</i>	Type Automatic Level of initial mesh 3 Minimum gap size 0.2202 m
--------------------	--

Tabla 5.4. Mesh

5.3. Results

5.3.1. Cut Plot

Usando esta herramienta para la visualización de la temperatura en el plano XZ, encontramos representado la transferencia de calor que se produce entre los dos fluidos: cómo el calor se transfiere del fluido con mayor temperatura hacia el fluido de menor temperatura, es decir, uno disminuye su temperatura y el otro la aumenta tratando de alcanzar el equilibrio térmico entre ellos. Debe quedar claro que el fluido con menor temperatura nunca alcanza la temperatura del fluido más caliente, como se observa en la imagen.

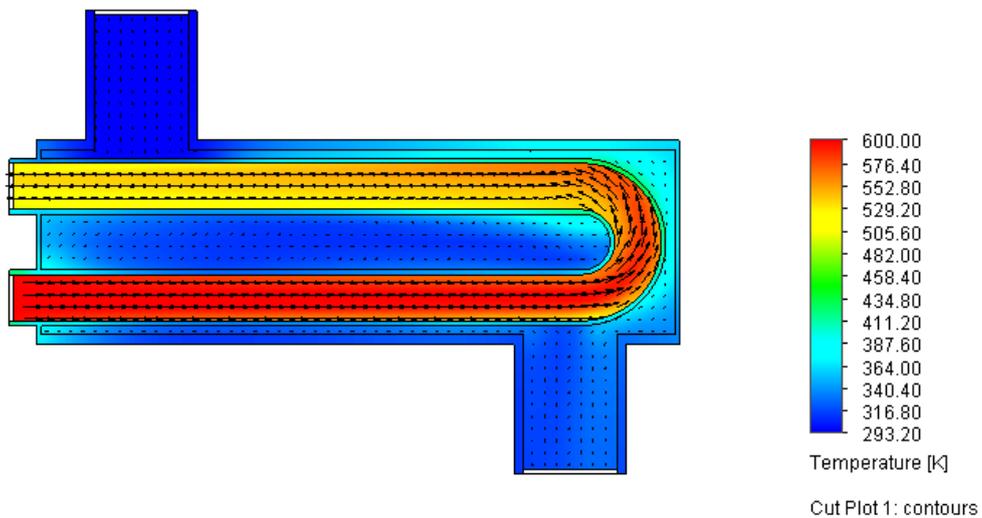


Figura 5.4. Temperatura en el plano medio

5.3.2. Flow Trajectories

Con la ayuda de esta herramienta podemos visualizar las líneas de corriente en función de un parámetro seleccionado, que varía el color de las trayectorias del fluido. Para este caso, hemos seleccionado la temperatura.

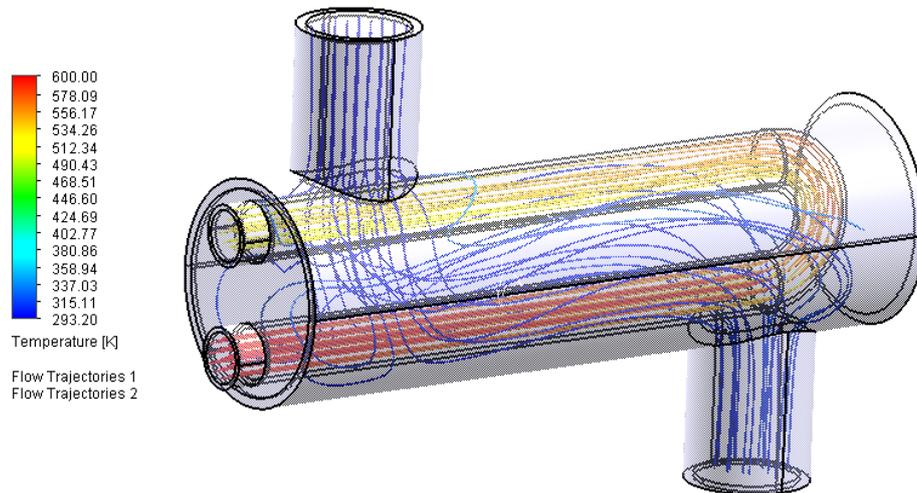


Figura 5.5. Líneas de corriente en el rango por defecto

Dado que el rango de temperaturas del agua es menor que el que viene por defecto, todas las líneas se presentan azules. Sería interesante poder cambiar el rango para ver cómo cambia realmente la temperatura en el flujo frío, de forma que, ajustando valores mínimos y máximos, se obtiene la siguiente imagen:

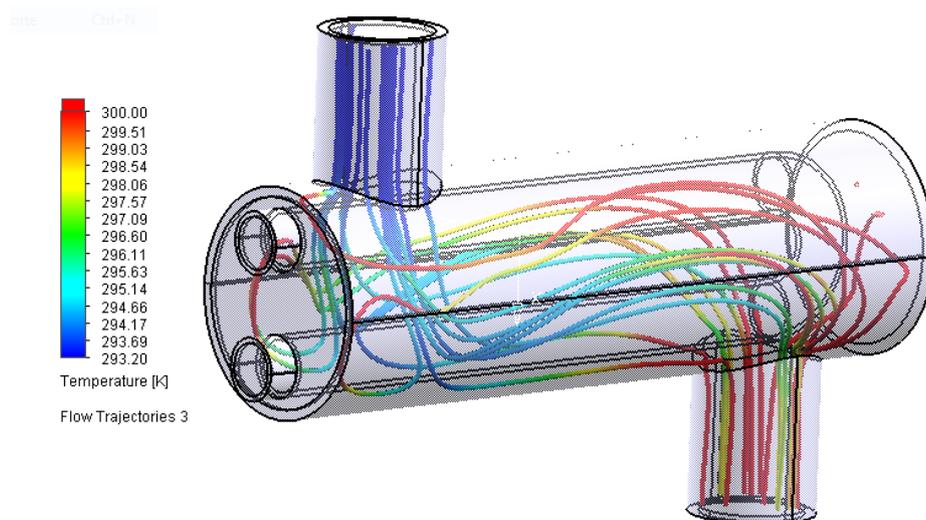


Figura 5.6. Líneas de corriente en un rango determinado

5.3.3. Surface Parameters

Con objeto de calcular la eficiencia, vamos a necesitar el cálculo de la temperatura en las entradas y en las salidas. Una buena forma de proceder es a través de esta herramienta, donde podemos especificar la superficie de entrada o salida y el parámetro a representar. En este caso, escogemos la salida de agua y la visualización de todos los parámetros, de forma que encontremos la temperatura media en la salida:

Local Parameters					
Local Parameter	Minimum	Maximum	Average	Bulk Average	Surface Area [m^2]
Pressure [Pa]	202650	202650,0002	202650	202650	0,007764259
Total Pressure [Pa]	202650	202650,009	202650,0041	202650,0055	0,007764259
Density (Fluid) [kg/m^3]	991,6035953	996,5068398	994,5212176	994,2497444	0,007764259
Velocity [m/s]	9,38865E-05	0,004266783	0,002597085	0,003168412	0,007764259
Velocity (X) [m/s]	9,08084E-05	0,004259073	0,0025927	0,003164037	0,007764259
Velocity (Y) [m/s]	-0,000169352	0,00023155	3,65927E-06	3,28197E-06	0,007764259
Velocity (Z) [m/s]	-0,000142627	0,000232714	5,37835E-05	6,4507E-05	0,007764259
Mass Fraction of Water []	1	1	1	1	0,007764259
Volume Fraction of Water []	1	1	1	1	0,007764259
Temperature (Fluid) [K]	297,2524541	312,663969	303,7764714	304,6227655	0,007764259
Mass Flux [kg/(s*m^2)]	-4,223788608	-0,091596689	-2,575896405	-3,143779822	0,007764259
Relative Pressure [Pa]	0	0,00018412	4,72115E-05	3,7885E-05	0,007764259

Tabla 5.5. Parámetros en la salida del agua

De igual forma, para la salida de aire encontramos que la temperatura media es de 513,5 K.

5.3.4. Cálculo de la eficiencia

Para ello, dado que la capacidad del aire es menor que la del agua, usaremos la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{T_{caliente}^{entrada} - T_{caliente}^{salida}}{T_{caliente}^{entrada} - T_{frío}^{entrada}}$$

La temperatura a la entrada la conocemos, 600 K, mientras que la salida del aire caliente ha sido calculada en el capítulo anterior, 513,5 K. Sabiendo que a la entrada del fluido frío era a 293 K, la fórmula queda como sigue:

$$\epsilon = \frac{600 - 513.5}{600 - 293.2} = 0.28$$

Capítulo 6

Conclusiones

Tal y como se aventura en la introducción, FloEFD ha demostrado a lo largo del proyecto ser una gran herramienta computacional de análisis de dinámica de fluidos, debido a las siguientes características:

- **Es versátil.** Permite trabajar con modelos complejos formados por un conjunto de piezas, así como modelos simplificados de un sólo elemento. Permite cambios instantáneos en el modelo sin la necesidad de transferir la geometría desde otro software. Además, permite la resolución de una gran cantidad de casos de flujo, cubriendo desde la distribución de calor hasta los procesos de combustión.
- **Es completo.** Cuenta con una gran base de datos integrada que permite conocer las características de cualquier tipo de sólido, líquido, gas o medio poroso, así como la creación de nuevos fluidos. Asimismo, cuenta con todo tipo de herramientas para la muestra de resultados, que permiten dar una visión bastante global del análisis.
- **Es cómodo.** Al ser un módulo más de CATIA, el entorno nos resulta familiar, intuitivo y manejable. Cuenta con elementos visuales que conocemos y que ayudan a un mejor entendimiento del software.
- **Es capaz** de generar la malla automática y manualmente, permitiendo una mejor adecuación para cada caso. Para problemas de flujo, puede hacerse un caso simple con baja resolución de la malla, mejorar la geometría como consecuencia y volver a ejecutar el modelo directamente para analizar los resultados.

Por lo tanto, se concluye diciendo que FloEFD es la solución perfecta para el ingeniero que desee desarrollar un modelo que cumpla con ciertos requisitos de diseño, debido a que, gracias a la simulación, puede examinar las tendencias y desechar ideas de diseño más costosas o ineficientes.

Capítulo 7

Bibliografía

- Agustín Martín Domingo. “*Apuntes de Mecánica de Fluidos*” 1997-2011. [En línea] Disponible aquí: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
- Jaime Beneyto Gómez de Barreda. “*Mecánica de Fluidos I*” 2011-2012. [En línea]. Disponible aquí: <http://servidor-da.aero.upm.es/wip/apuntes/tercero/mecanica-de-fluidos-i/Mec%20I%20de%20Fluidos%20I%20-%20Beneyto.pdf>
- Jesús Sánchez Vázquez. “*Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida. Aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas*” 2004. [En línea]. Disponible aquí: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/>
- Mentor Graphics Corporation. “*FloEFD Tutorial*” 2016. [En línea]. Disponible aquí: <http://hebergement.u-psud.fr/master2dfe/IMG/pdf/Tutorial.pdf>