



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIERÍA
INDUSTRIAL VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

DESARROLLO DE MODELO NUMÉRICO PARA LA DETECCIÓN DE CAVITACIÓN EN TUBOS VENTURI MEDIANTE TÉCNICAS CFD

AUTORA: MARIA RUIZ GARRIDO

TUTOR: ARNAU BAYON BARRACHINA

Curso Académico: 2019-20

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi
mediante técnicas CFD

RESUMEN

El objeto del presente trabajo de final de grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales es desarrollar un modelo numérico basado en técnicas de dinámicas de fluidos computacional (CFD) que permita la caracterización de la cavitación inducida por elementos singulares en instalaciones hidráulicas de flujo a presión, en concreto, en un tubo Venturi perteneciente a una instalación industrial. El objetivo de esta instalación industrial es garantizar la disolución de una sustancia en agua. Dicha tarea suele llevarse a cabo bajo un enfoque experimental, determinándose si ocurre y cómo ocurre la cavitación en laboratorio. No obstante, la construcción y ensayo de cada elemento supone unos costes elevados, especialmente, si se contempla un proceso de optimización de su geometría como parte del proceso de diseño. En estos casos, la combinación de esta metodología con un enfoque numérico permite agilizar el proceso, pudiendo descartarse ciertas geometrías antes de su construcción y ensayo en el laboratorio, con la reducción de costes que ello implica.

A tal efecto, el presente trabajo emplea un modelo numérico bidimensional basado en técnicas CFD. En particular, se emplea un modelo de cierre de turbulencia RANS RNG k- ϵ , de amplia aplicación en el ámbito ingenieril, y una malla estructurada para la discretización del elemento estudiado, cuya convergencia de resultados es también analizada. Todo ello es implementado en una plataforma de código abierto OpenFOAM, lo que permite, dadas unas condiciones de contorno de velocidad y presión determinadas, predecir la ocurrencia de cavitación en el dispositivo en cuestión. Posteriormente, todos los resultados son analizados y visualizados mediante la herramienta ParaView.

Finalmente, se repite el proceso con dos geometrías diferentes, con el fin de poder compararlas entre ellas, y analizar estos resultados.

Palabras clave: instalación industrial, modelo numérico, dinámica de fluidos computacional, tubo Venturi, cavitación.

RESUM

L'objecte d'aquest projecte de final de grau d'Enginyeria de Tecnologies Industrials és desenvolupar un model numèric basat en tècniques de dinàmica de fluids computacional (CFD) que permeta la caracterització de la cavitació induïda per elements singulars en instal·lacions hidràuliques de flux a pressió, en concret, en un tub Venturi pertanyent a una instal·lació industrial. L'objectiu d'aquesta instal·lació industrial és garantir la dissolució d'una substància en aigua. Aquesta tasca sol dur-se a terme baix un enfocament experimental, determinant-se si ocorre i com ocorre la cavitació en laboratori. No obstant això, la manufactura i assaig de cada element suposa uns costos elevats, especialment, si es contempla un procés d'optimització de la seua geometria com a part del procés de disseny. En aquests casos, la combinació d'aquesta metodologia amb un enfocament numèric permet agilitzar el procés, podent descartar-se certes geometries abans de la seua construcció i assaig en laboratori, amb la reducció de costos que això implica.

D'aquesta manera, el present treball planteja un model numèric bidimensional basat en tècniques CFD. En particular, s'empra un model de tancament de turbulència RANS RNG k-epsilon, d'àmplia aplicació en l'àmbit enginyeria, i una malla estructurada per a la desratització de l'element estudiat, la convergència de resultats del qual es també analitzada. Tot això és implementat a la plataforma de codi obert OpenFOAM, la qual cosa permet, donades unes condicions de contorn de velocitat i pressió determinades, predir l'ocurrència de cavitació en el dispositiu en qüestió. Posteriorment tots els resultats són analitzats i visualitzats mitjançant ParaView.

Finalment, es repeteix el procés amb dues geometries diferents, amb la finalitat de poder comparar-les entre elles, i analitzar aquests resultats.

Paraules clau: instal·lació industrial, model numèric, dinàmica de fluids computacional, tub Venturi, cavitació.

ABSTRACT

The aim of this Final Project of the Degree in Industrial Technology Engineering is to develop a numerical model based on computational fluid dynamics techniques (CFD) that allows the characterization of cavitation induced by singular elements in hydraulic pressure flow systems, specifically in a Venturi tube belonging to an industrial facility. The main purpose for this industrial facility is to ensure the dissolution of a substance in water. This task is usually carried out under experimental approach, determining whether and how laboratory cavitation occurs. However, the manufacturing and testing of each element involves high costs, especially if a geometry optimization process is envisaged as part of the design process. In these cases, the combination of this methodology with a numerical approach allows the process to be speeded up, and certain geometries can be discarded before construction and laboratory testing, with the resulting reduction in costs.

To this end, this work raises two-dimensional numerical model based on computational fluid dynamics (CFD) techniques. In particular, a RANS RNG k-epsilon turbulence closure model, widely applied in the engineering field, and a structured mesh for the discretization of the studied element, whose convergence of results is analyzed. All that is implemented on the open source platform OpenFOAM, which allows, given certain speed and pressure contour conditions, to predict the occurrence of cavitation in the subject object. All results are then analyzed and visualized using the ParaView tool.

Finally, the process is carried out again with two different geometries, in order to compare them and analyzed these results.

Keywords: industrial facility, numerical model, computational fluid dynamics, Venturi tube, cavitation.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi
mediante técnicas CFD

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TFG

I.MEMORIA
II.PRESUPUESTO

ÍNDICE

1.INTRODUCCIÓN	12
1.1 INTRODUCCIÓN	12
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.3 MOTIVACIÓN	13
1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO	13
2. DESARROLLO TEÓRICO	14
2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS	14
2.1.1 Introducción	14
2.1.2 Ecuación Bernoulli	14
2.1.3 Efecto Venturi.....	17
2.1.4 Tubo Venturi.....	17
2.1.5 Cavitación	18
2.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL	19
2.2.1 Introducción	19
2.2.2 CFD y SPH	19
2.2.3 Metodología CFD.....	21
2.2.4 Ecuaciones de flujo.....	21
2.2.5 Mallado.....	23
2.2.6 Calidad de la malla	27
2.3 MODELO DE TURBULENCIA	27
2.3.1 Funciones de pared	28
2.4 OPENFOAM	29
2.5 PARAVIEW	30
3.DESARROLLO PRÁCTICO	31
3.1. MODELADO DEL CASO DE ESTUDIO	31
3.1.1. Enunciado y elección del problema	31
3.1.2. Configuración del caso en el problema.....	32
3.2. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.....	41
3.2.1. Procedimiento para la estimación del error de discretización	42
3.2.2. Post-procesado y cálculo del error de discretización	44
3.2.3. Resultados	46
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	48
4.1. ANÁLISIS.....	48
4.1.1 Representación gráfica de los campos de velocidad, presión y líneas de corriente.	48
4.1.2. Cálculo de las pérdidas	50
4.1.3. Región susceptible de sufrir	51

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi
mediante técnicas CFD

4.2 COMPARACIÓN DEL CASO 1, CASO 2 Y CASO 3.	52
4.2.1 Comparación de campos de velocidades, presiones y líneas de corriente	52
4.2.2 Cálculo y comparación de pérdidas	57
4.2.3. Comparación de la región susceptible a sufrir cavitación.	59
5.CONCLUSIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	62
PRESUPUESTO	66

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1. Esquema del principio de Bernoulli.....	15
Figura 2. Diagrama descriptivo del tubo Venturi.	18
Figura 3. Presión de vapor del agua	19
Figura 4. Ejemplo de un modelo SPH	20
Figura 5. Ejemplo de un modelo CFD	20
Figura 6. Diferencia entre un modelo CFD y un modelo SPH.....	21
Figura 7. Discretización espacial.....	23
Figura 8. Malla estructurada	24
Figura 9. Malla no estructurada	24
Figura 10. Malla híbrida.....	25
Figura 11. Malla no adaptativa a la izquierda y malla adaptativa a la derecha	26
Figura 12. Malla uniforme a la izquierda y malla refinada a la derecha.	26
Figura 13. Flujo laminar y turbulento	28
Figura 14. Funciones de pared	29
Figura 15. Figura geométrica del tubo Venturi de este trabajo (acotado en metros).	31
Figura 16. Jerarquía directorios OpenFOAM.....	33
Figura 17. Condiciones de contorno de la presión.....	34
Figura 18. Condiciones de contorno de la velocidad.	35
Figura 19. Condiciones de geometría de la malla.	37
Figura 20. Representación gráfica de una zona ampliada de la malla	37
Figura 22. Residuos de la malla 1	39
Figura 23. Residuos malla 2	39
Figura 24. Residuos malla 3	40
Figura 25. Residuos de la malla 4	40
Figura 26. Resultados representados gráficamente.	45
Figura 27. Campo de velocidades del tubo Venturi	48
Figura 28. Líneas de corriente de la velocidad.	48
Figura 29. Campo de presiones del tubo Venturi.....	49
Figura 30. Líneas de corriente de la presión.	49
Figura 31. Zonas susceptibles de cavitación representadas en presión relativa	51
Figura 32. Geometría caso 1 (acotada en metros).....	52
Figura 33. Geometría caso 2 (acotada en metros).....	52
Figura 34. Geometría caso 3 (acotada en metros).....	53
Figura 35. Representación velocidad caso 1	53
Figura 36. Representación velocidad caso 2.	53
Figura 37. Representación velocidad caso 3.	54
Figura 38. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 1.	54
Figura 39. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 2.	54
Figura 40. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 3.	54
Figura 41. Representación presión caso 1.....	55
Figura 42. Representación presión caso 2.....	55
Figura 43. Representación presión caso 3.....	55
Figura 44. Representación líneas de corriente de presión caso 1.	56

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi
mediante técnicas CFD

Figura 45.Representación líneas de corriente de presión caso 2.	56
Figura 46.Representación líneas de corriente de presión caso 3.	56
Figura 47.Región susceptible a sufrir a cavitación caso 1	59
Figura 48.Región susceptible a sufrir cavitación caso 2	59
Figura 49.Región susceptible a sufrir cavitación caso 3	59

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Parámetros sobre la energía cinética turbulenta del caso	36
Tabla 2. Energía cinética turbulenta y disipación de esta	36
Tabla 3. Tipología malla tubo Venturi	37
Tabla 4. Tabla donde se muestran los tiempos de simulación.	41
Tabla 5. Tamaño de malla característico.....	42
Tabla 6. Relación entre los diferentes tamaños característicos de mallas	43
Tabla 7. Datos de velocidades y presiones en los diez puntos seleccionados.	46
Tabla 8. Resultados del orden aparente de los cuatro análisis de convergencia.	46
Tabla 9. Resultados del índice de convergencia de los cuatro análisis de convergencia. ...	46
Tabla 10. Orden aparente de malla e índice de convergencia del análisis de convergencia 124.	47
Tabla 11. Tamaño de la malla final.....	47
Tabla 12. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo	50
Tabla 13. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo	51
Tabla 14. Parámetros iniciales para cada caso.	53
Tabla 15. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo caso 2	57
Tabla 16. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo caso 2	57
Tabla 17. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo caso 3	58
Tabla 18. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo caso 3.	58
Tabla 19. Resultados de las pérdidas de los tres casos.	58
Tabla 20. Desglose de los costes de la mano de obra	66
Tabla 21. Desglose de los costes de material, equipo y herramientas utilizadas.	67
Tabla 23. Coste final	67

I.MEMORIA

1.INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

En este trabajo de final de grado se pretende abordar el desarrollo de un modelo numérico basado en técnicas de dinámicas de fluidos computacional (CFD) que permita la caracterización de la cavitación en un tubo Venturi perteneciente a una instalación industrial. Dicha instalación pretende garantizar la disolución de una sustancia en agua.

Este modelo numérico permite, con unas condiciones de contorno de velocidad y presión determinadas, predecir la ocurrencia de cavitación en el dispositivo en cuestión. Posteriormente se cambia la geometría del tubo y se vuelven a sacar los mismos resultados para una posterior comparación entre ellos. Para ello se utilizan cuatro tamaños de mallas diferentes para la simulación. Tras la simulación, se hace un análisis de convergencia para comprobar si los tamaños de malla están correctamente seleccionados, y si el error de los resultados son lo suficientemente pequeños para darlos por válidos.

Finalmente se selecciona el tamaño de malla más adecuado para llegar al objetivo del presente trabajo que es visualizar los resultados mediante la herramienta ParaView para analizarlos y comentarlos.

1.2 OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo de final de grado son los siguientes:

- Contribuir al desarrollo de un modelo numérico basado en técnicas de dinámicas de fluidos computacional (CFD) que permite la caracterización de la cavitación en un tubo Venturi perteneciente a una instalación industrial que pretende garantizar la disolución de una sustancia en agua. Para llegar a este objetivo se utiliza el software OpenFOAM:
 - Calcular e introducir las características físicas del flujo
 - Mallas el dominio según la geometría del sólido objetivo
 - Imponer las condiciones de contorno
 - Simular
 - Estudio de convergencia de la simulación
- Visualizar los resultados mediante la herramienta Paraview con el fin de poder analizarlos.
- Repetir el proceso con una geometría diferente y comparar los resultados para comprobar si el cambio de geometría mejora el estudio.

1.3 MOTIVACIÓN

La principal motivación de este trabajo de final de grado es el estudio de un problema clásico de la Mecánica de Fluidos como es la detección de la cavitación en un tubo Venturi mediante técnicas CFD. Esto se debe a la importancia, que cada vez es mayor, de la mecánica de fluidos computacional dentro de la rama de Mecánica de fluidos, ya que, con los avances tecnológicos actuales, cada vez se está apostando más por el cálculo y análisis de problemas de fluidos mediante técnicas CFD dentro del mundo de la tecnología. Cada vez se van incorporando nuevos avances que reducen los tiempos de cálculo y con resultados más próximos a la realidad. Uno de los principales objetivos de utilizar esta técnica es poder simular un problema mediante este software con unos resultados tan próximos a la realidad que no haga falta resolverlo de manera experimental. De ahí la importancia que tiene, ya que hacerlo de esta manera da lugar a un gran ahorro de tiempo y de dinero, sin la necesidad de la inversión inicial de la fase de construcción, de realizar el ensayo experimental, posteriormente cambiar la geometría si no ha funcionado, y volver a hacer el estudio experimental. Siendo mucho más sencillo poder simularlo mediante un ordenador, cambiar la geometría o cualquier parámetro que se necesite y obtener resultados muy próximos a la realidad.

1.4. ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El presente trabajo de final de grado está organizado en dos documentos principales: la memoria y el presupuesto.

Dicha memoria está formada por cinco apartados:

1. Introducción: incluye una breve introducción al problema, con los objetivos de este trabajo y la motivación para realizarlo.
2. Desarrollo teórico: se pone en contexto el problema con los conceptos básicos de Mecánica de fluidos y las herramientas utilizadas, OpenFOAM y ParaView.
3. Desarrollo práctico: Se explica paso a paso como se ha ejecutado la parte práctica acompañado de explicaciones con las herramientas utilizadas.
4. Discusión de resultados y conclusión: se muestran los resultados gráficamente y se analizan.

2. DESARROLLO TEÓRICO

2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

2.1.1 Introducción

En este trabajo se aborda un estudio de detección de cavitación de un tubo Venturi. El efecto Venturi es uno de los problemas más abordados de la Mecánica de Fluidos. Para poder llevar a cabo este proyecto, se deben tener claros los principios teóricos en los que se basa. El tubo Venturi se basa en el efecto Venturi, que se explica teniendo en cuenta principalmente la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad de la masa. Además, el principal objetivo es la detección de la cavitación. La cavitación es un fenómeno complejo, pero es esencial conocerlo y tenerlo en cuenta cuando se trabaja con fluidos.

A continuación, se van a explicar los principales puntos básicos, ya citados, sobre los que se apoya este trabajo.

Un fluido es un medio continuo que se deforma fácilmente cuando se le aplica cualquier esfuerzo cortante o tangencial por pequeño que sea. La mecánica de Fluidos estudia el movimiento de los fluidos utilizando las leyes de la mecánica clásica. Es una parte de la Mecánica de los Medios Continuos, que está al mismo tiempo es una de las ramas de la Física. (1)(2)

2.1.2 Ecuación Bernoulli

La dinámica de los fluidos es una de las partes más interesantes de la mecánica de fluidos, ya que estudia la causa del movimiento de estos y tiene muchas aplicaciones prácticas. Las ecuaciones más importantes de la dinámica de fluidos son las ecuaciones de conservación de la masa, de conservación de la energía, de conservación de la cantidad de movimiento, y de conservación del momento cinético.

Planteando un balance de energía en la trayectoria de una partícula a lo largo de una línea de corriente, para uno de los casos de flujos más sencillos que es un flujo ideal, incompresible, unidimensional y estacionario, se deduce la ecuación de Bernoulli. El principio de Bernoulli es uno de los más importantes de la hidrodinámica, con numerosas aplicaciones prácticas. (1)

Hay varias formas de representar la ecuación de Bernoulli, pero una de las más utilizadas es representando la energía por unidad de peso (ecuación 1).

$$\left[\frac{P_1}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \right]_1 = \left[\frac{P_2}{\gamma} + z + \frac{v^2}{\gamma} \right]_2 \quad (\text{Ecuación 1})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

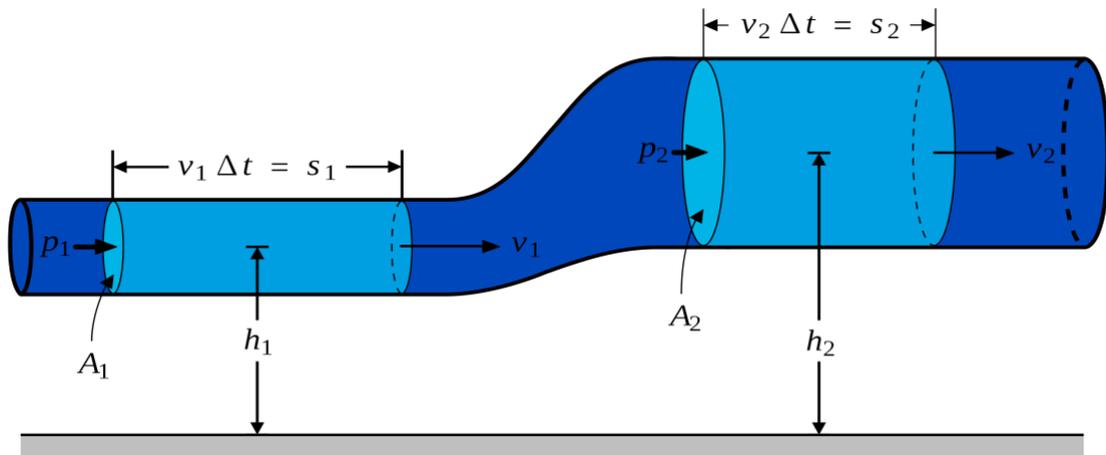


Figura 1. Esquema del principio de Bernoulli.

Fuente:(3)

La ecuación de Bernoulli consta de tres términos para cada uno de los dos puntos (A_1 y A_2) considerados entre los cuales se está realizando el balance de energía, como se puede ver en la figura 1. Estos tres términos son:

P/γ : Es el término debido a la energía de presión o elástica

z : Este término representa la cota (altura geométrica), debido a la energía potencial.

$v^2/2g$: Es el término debido a la energía cinética

Hasta ahora se ha hablado de la ecuación de Bernoulli para un flujo ideal, es decir, sin viscosidad. En la realidad, ningún flujo es ideal, cualquier flujo tiene una viscosidad por pequeña que sea. Por lo tanto, un fluido a través de una tubería sufrirá el rozamiento de la viscosidad del flujo con la tubería, de la turbulencia o al pasar por zona especiales lo que en términos de energías se habla de que el fluido perderá energía.

Así pues, la ecuación de Bernoulli aplicada a un fluido real debe tener en cuenta estas pérdidas de energía, como se puede ver en la ecuación 2.

$$\left[\frac{P_1}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \right]_1 = \left[\frac{P_2}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \right]_2 + \sum h \quad (\text{Ecuación 2})$$

siendo $\sum h$ el sumatorio de las diferentes pérdidas. Existen dos tipos de pérdidas como se va a explicar a continuación: pérdidas continuas y pérdidas localizadas.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Las pérdidas continuas son las que se producen a causa del rozamiento a lo largo de toda la tubería. Estas pérdidas dependen de muchos factores. Los principales son, por una parte, los que tiene que ver con la geometría de la tubería: el diámetro, la longitud y la rugosidad del material. Por otra parte, están los factores que tienen que ver con el fluido y su flujo: la velocidad que lleva el fluido (a mayores velocidades, mayores pérdidas), el régimen del fluido (régimen turbulento o régimen laminar), y la viscosidad y peso específico del fluido. (1)(4)

Una de las formas de representar las pérdidas continuas es con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (\text{Ecuación 3})$$

f → Coeficiente de fricción. Depende de ε , la rugosidad de la tubería, y de Re , el número de Reynolds (indica el régimen de funcionamiento del flujo).

L → Longitud de la tubería, por tanto, a mayor longitud, mayores pérdidas.

D → Diámetro de la tubería, a menor diámetro, menores pérdidas.

V → Velocidad del fluido, por tanto, a mayor velocidad, mayores pérdidas. Lo que también significa, que al ser la velocidad directamente proporcional al caudal (Q), a mayor caudal mayores pérdidas.

El segundo tipo de pérdidas, son las pérdidas localizadas. Estas son debidas a la perturbación del flujo cuando este pasa por algunos elementos como válvulas, codos, ensanchamientos o estrechamientos que son muy comunes en un sistema a presión. (5)

Con la ecuación 4, se puede calcular este tipo de pérdidas.

$$h_L = k \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (\text{Ecuación 4})$$

siendo k un coeficiente adimensional que cambia según para que elemento singular se esta calculando las pérdidas.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

2.1.3 Efecto Venturi

El efecto Venturi es un fenómeno muy utilizado en Mecánica de Fluidos en el que un fluido a presión que circula por un tubo, al pasar de una sección mayor a una sección menor disminuye su presión aumentando su velocidad. Depende de cuánto aumente la velocidad, puede dar lugar a una depresión muy grande, llegando a presiones negativas. Si en ese momento, se conecta en el estrechamiento otro tubo con otro fluido, se producirá una aspiración del fluido del segundo tubo mezclándose ambos fluidos. (6)

El fenómeno Venturi se explica teniendo en cuenta las ecuaciones de Bernoulli (ecuación 1) y de continuidad de la masa (ecuación 5)

$$Q_1 = Q_2 \rightarrow A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Por tanto, se puede ver como al llegar a un estrechamiento, la velocidad va a aumentar al disminuir la sección, ya que el caudal se mantiene constante. Por tanto, el término cinético de la ecuación de Bernoulli aumenta, de manera que se tiene que compensar con la disminución del resto de términos. El término de cota es constante, por tanto, la disminución para compensar el aumento del término cinético es en el término de la presión. En algunos casos, en los que el estrechamiento sea muy grande, la velocidad aumenta tanto, que la presión puede llegar a valores negativos, es decir, inferior a la presión atmosférica.

2.1.4 Tubo Venturi

Para poder utilizar este efecto Venturi en muchas aplicaciones prácticas se ha diseñado la construcción del tubo Venturi.

Se trata de un tubo formado por dos secciones cónicas idénticas y unidas por una sección cónica menor. Aprovechando el efecto Venturi que se produce, se suele utilizar para medir velocidades. Se conecta un tubo en forma de U, un extremo conectado a la parte ancha, y el otro extremo a la parte estrecha, y observando la diferencia de alturas del fluido en el tubo en U, se puede saber la presión de ambas zonas. Como la cota es constante en todo momento, conociendo la presión se puede conocer la velocidad. (7)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

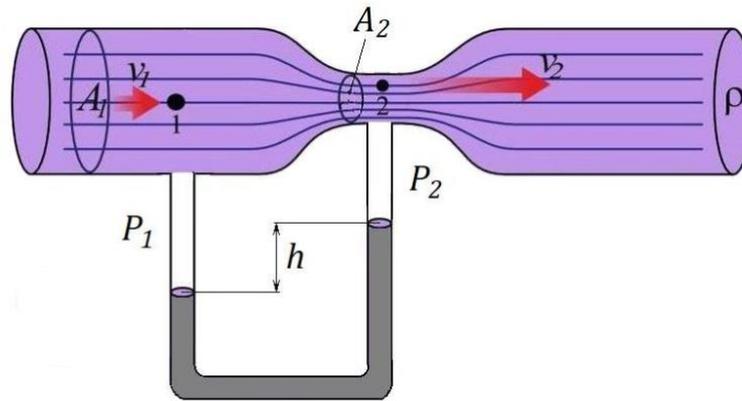


Figura 2. Diagrama descriptivo del tubo Venturi.

Fuente: (8)

2.1.5 Cavitación

El objetivo de este trabajo es la caracterización de la cavitación del tubo Venturi del que se dispone en el laboratorio. Para ello hay que entender bien qué es el fenómeno de la cavitación.

La cavitación es un fenómeno hidrodinámico que se produce cuando hay una depresión y la presión del fluido se encuentra por debajo de la presión de vapor. Si esto ocurre, se da lugar a la formación de unas burbujas (cavidades) de vapor. Estas cavidades se mueven hacia presiones mayores y cambian rápidamente a estado líquido otra vez (implosionan). Este fenómeno significa una gran pérdida de energía, y puede llegar a dañar los elementos donde está ocurriendo lugar como, por ejemplo, las tuberías o bomba hidráulicas.(4) (9)

Para conocer cuando el fluido con el que se trabaja puede llegar a alcanzar esa conocida presión de vapor, se debe conocer que es la presión de vapor, que normalmente se nombra p_v .

La presión de vapor o presión de saturación es aquella en la cual a una temperatura dada se encuentran en equilibrio la fase líquido y vapor. Este valor depende de la temperatura, pero es indistinto de cuánta cantidad haya de cada fase mientras se encuentren presentes las dos. Es una propiedad de los fluidos y depende de la naturaleza del fluido.(10)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

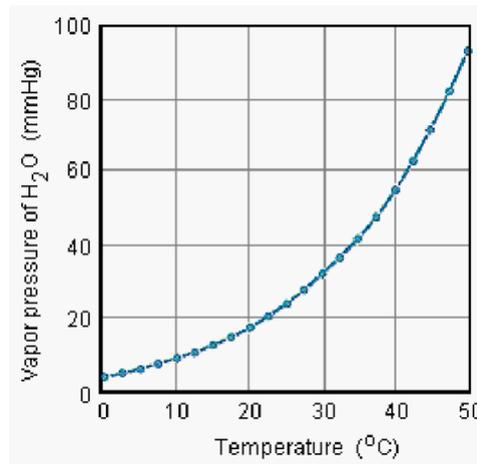


Figura 3. Presión de vapor del agua

Fuente: (11)

Como se puede observar en la figura 3, la relación entre la temperatura y la presión no es lineal.

2.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

2.2.1 Introducción

En el siguiente apartado se habla de los modelos numéricos, y especialmente del modelo numérico que se sigue en este caso y qué ecuaciones básicas sigue para la resolución del problema.

Además, se habla de la metodología de este modelo y su funcionamiento interno, comentando todos los tipos de mallas que se puede dar y cuál es la malla utilizada en este trabajo.

2.2.2 CFD y SPH

El modelado numérico es una herramienta matemática muy utilizada para dar solución a problemas físicos en el ámbito de la ingeniería que tienen una compleja resolución. La gran ventaja de utilizar esta herramienta es la posibilidad de dar una solución simulando un problema sin la necesidad de tener que construir ese mismo escenario en la realidad. Por lo que esto permite un gran ahorro de coste y unos grandes avances en la investigación. Además, gracias a esta modelo se puede obtener unos resultados que sería prácticamente imposibles de obtener en la realidad.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Estos modelos numéricos están basados en las ecuaciones del fenómeno físico al que se quiere dar solución, y existen principalmente dos aproximaciones basadas en las ecuaciones físicas que se basan en estos métodos. El enfoque Euleriano y el enfoque Lagrangiano. (12)

- El enfoque Lagrangiano es un enfoque en el que el observador estudia una partícula en concreto a lo largo de todo su recorrido. Los modelos numéricos que trabajan siguiendo este tipo de enfoque son los modelos sin malla, en lugar de utilizar nodos, utilizan puntos para la representación del cuerpo. Uno de los más utilizados de este método es el SPH.(12)



Figura 4. Ejemplo de un modelo SPH

Fuente: (13)

- El enfoque Euleriano es un enfoque, en el que a diferencia de enfoque Lagrangiano, el observador en lugar de fijarse en una partícula, se fija una zona concreta, y estudia lo que pasa en esa zona según van pasando las diferentes partículas del fluido. No es tan importante una partícula en sí, sino más bien lo que ocurre en esa zona del espacio. Los modelos numéricos que trabajan con este enfoque son los modelos con malla (elementos finitos, diferencias y volúmenes finitos) que son actualmente modelos muy bien desarrollados y con muchas aplicaciones prácticas. Uno de los más conocidos es CFD. (12)

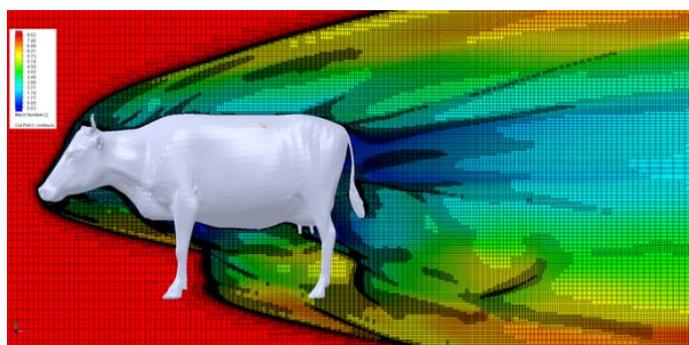


Figura 5. Ejemplo de un modelo CFD

Fuente: (13)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

En este trabajo se va a trabajar con un modelo CFD con enfoque Euleriano. Se pretende estudiar lo que pasaría, si cavitara o no el tubo Venturi de la instalación industrial. De manera que se ahorrarían costes y tiempo de tener que hacerlo experimentalmente.

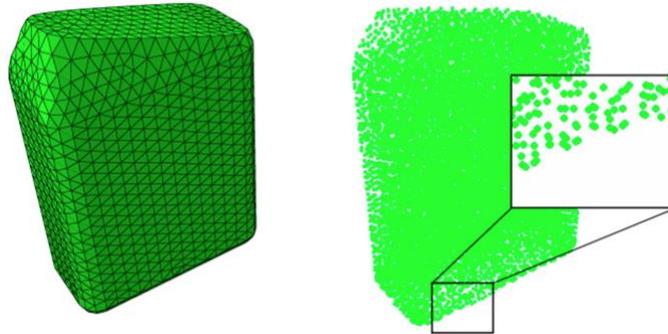


Figura 6. Diferencia entre un modelo CFD y un modelo SPH

Fuente:(14)

2.2.3 Metodología CFD

A continuación, se explica cuál es la metodología que sigue un modelo CFD para la resolución. Principalmente se basa en tres etapas: pre-proceso, etapa de resolución del problema y post-proceso.

En el pre-proceso se definen todos los parámetros que se necesitan para acotar el problema. Se tiene que definir la geometría del elemento y dividirlo en elementos finitos, es decir, se tiene que discretizar el espacio geométrico espaciotemporalmente. También hay que definir las condiciones de contorno iniciales que se necesitan saber para poder empezar a simular, lo que significa especificar el comportamiento del fluido con el que se trabaja. Posteriormente, se da paso a la etapa de resolución. En esta etapa empieza la simulación y las ecuaciones se resuelven iterativamente. Finalmente, una vez se ha obtenido la solución se pasa al post-proceso, es decir a la visualización y análisis de los resultados.(15)

2.2.4 Ecuaciones de flujo

Todos los métodos numéricos empiezan con el modelo numérico del problema físico que se quiere resolver, que normalmente es de resolución muy compleja ya que se suele basar en ecuaciones diferenciales con derivadas parciales. En el caso de la dinámica de fluidos, estas ecuaciones suelen ser las ecuaciones de Navier-Stokes.(16)

Las ecuaciones de Navier-Stokes son las ecuaciones que gobiernan el movimiento de cualquier flujo de fluido. Son ecuaciones de resolución sumamente compleja ya que son ecuaciones diferenciales, con derivadas parciales y no lineales.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (\text{Ecuación 6})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

$$\rho(\vec{A} - \vec{X}) = -\nabla p + \frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{V}) + \mu\Delta\vec{V} \quad (\text{Ecuación 7})$$

La ecuación 6 es un balance de masa (o ecuación de la continuidad). Esta ecuación se deriva de imponer que la masa es un invariante, entonces se iguala a cero la suma de la variación de masa en el interior del volumen seleccionado.

$\frac{\delta\rho}{\delta t}$ → Es la variación de la masa por unidad de volumen del volumen de control diferencial.

$\rho\vec{V}$ → es el flujo unitario de masa que atraviesa una superficie elemental. De manera que al añadirle a divergencia del vector (∇), representa el balance de flujo másico a través de la superficie elemental que encierra el volumen diferencial. Es decir, lo que sería el flujo saliente menos el entrante.

La ecuación 7, es la ecuación que se obtiene tras relacionar la hipótesis de Stokes sobre la viscosidad del fluido, las causas y los efectos, con la segunda Ley de Newton (la suma de todas las fuerzas es igual a su masa por su aceleración).

\vec{A} : es la aceleración del fluido.

$\rho\vec{X}$: es la resultante de las fuerzas exteriores por unidad de volumen.

∇p : gradiente de presiones

$1/3\mu\nabla(\nabla \cdot \vec{V})$: son las pérdidas por disipación viscosa derivadas de la dilatación (si $\nabla \cdot \vec{V} > 0$) o de la contracción si el signo es negativo.

$\mu\Delta\vec{V}$: es la disipación viscosa por excelencia, presente siempre en cualquier fluido real.

Para estas ecuaciones solo se puede encontrar una solución analítica en ciertos casos muy simplificados, de manera que apenas tienen aplicación en la realidad. La mayoría de los flujos reales son turbulentos y todos los fluidos tiene algo de viscosidad (por mínima que sea), por lo tanto, para poder resolverlos, se necesita o bien un modelo numérico o bien un modelo experimental.

2.2.5 Mallado

La primera etapa de pre-proceso de la dinámica de fluidos computacional consiste en la creación de la malla y para eso se necesita discretizar el dominio espaciotemporalmente.

La discretización temporal se debe llevar a cabo solo en los flujos no estacionarios. Sin embargo, la discretización espacial se debe realizar tanto para flujos estacionarios como no estacionarios. En el caso de este trabajo, se trabaja con un fluido estacionario por lo que solo se tiene en cuenta la discretización espacial. La región de estudio representada por la malla numérica se debe discretizar representando el dominio geométrico del problema, lo que significa que la malla se divide en un número finito de subdominios como elementos o nodos. La discretización espacial es más compleja que la discretización temporal, ya que hay que llevarla a cabo en las tres dimensiones.(16)

Es muy importante saber de qué manera se debe hacer la discretización espacial, ya que cuánto menor sea el tamaño de subdominios en los que se divida el espacio geométrico, mayor será la precisión.

En los siguientes apartados se van a explicar que diferencias existen entre las diferentes maneras de llevar a cabo una discretización espacial.

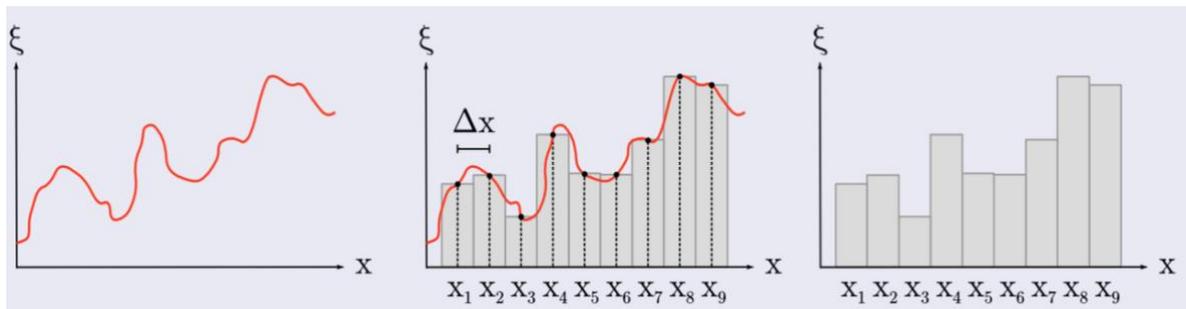


Figura 7. Discretización espacial

Fuente: (17)

2.2.5.1 Mallado según la relación tipológica entre celdas

La primera clasificación del tipo de malla es en la unión con las celdas vecinas. Puede ser malla estructurada o malla no estructurada.

- Malla estructurada → en este tipo de mallas la unión con las celdas vecinas es totalmente regular. Esto facilita su almacenamiento ya que se puede expresar como matrices 2x2 y 3x3. Este tipo de mallas están formadas por subdominios en forma de cuadriláteros si es 2D o de hexaedros si es 3D.(18)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

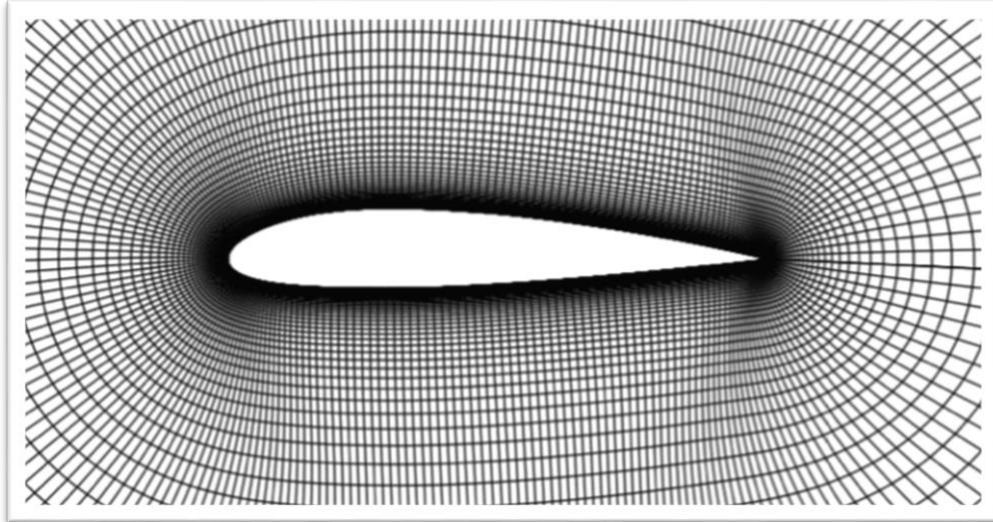


Figura 8. Malla estructurada

Fuente: (18)

- Malla no estructurada → se caracteriza por una unión con las celdas vecinas irregular lo que requiere una gran capacidad de almacenamiento en el ordenador, ya que se debe almacenar cada celda explícitamente. Este tipo de mallas son más complejas para poder almacenarlas en una matriz de 2x2 o de 3x3. (18)

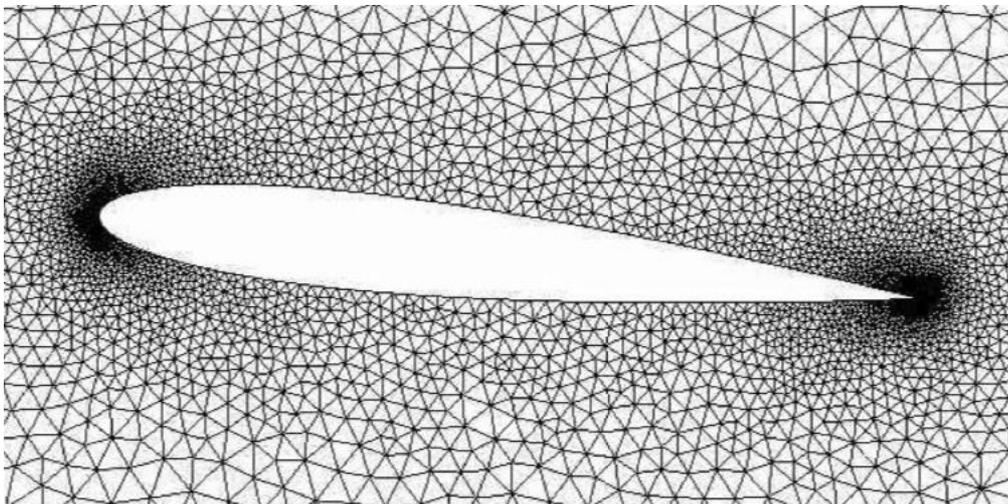


Figura 9. Malla no estructurada

Figura:(18)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

- Malla híbrida → También se puede dar la situación de poder utilizar una combinación de ambas.

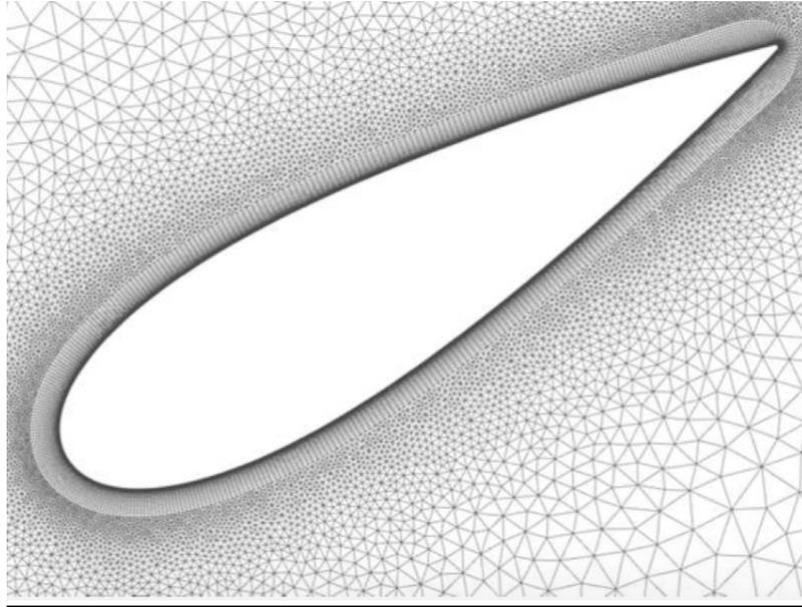


Figura 10.Malla híbrida

Fuente:(18)

2.2.5.2. Mallado según la dirección de sus ejes con respecto a objetos

Esta es una de las características de las mallas según el orden y la forma que adopten los contornos de cada celda.

- Mallas adaptativas: son aquellas mallas que los ejes se adaptan al contorno del objeto de estudio.
- Mallas no adaptativas: por el contrario, los ejes de estas no cambian, caiga donde caiga el objeto de estudio.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

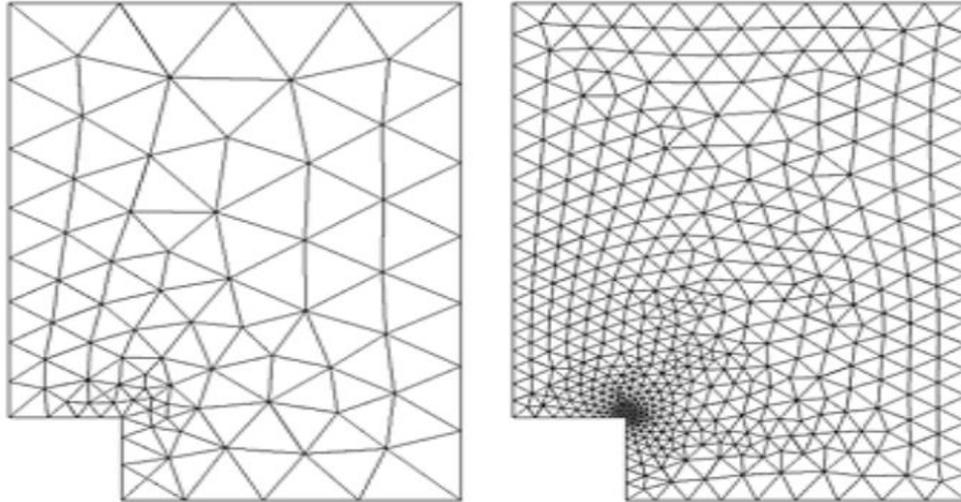


Figura 11. Malla no adaptativa a la izquierda y malla adaptativa a la derecha

Fuente: (19)

2.2.5.3 Mallado según la distribución de mallado

Según la distribución de mallado también se puede tener otra clasificación para las mallas.

- Mallas refinadas: son mallas que van reduciendo el tamaño de las celdas en las zonas de interés, para aumentar en estas zonas la precisión y ahorrar tiempo de cálculo del resto de zonas que no son de interés.
- Mallas uniformes: son las mallas que mantienen el tamaño de las celdas este donde este el objeto y no varían.

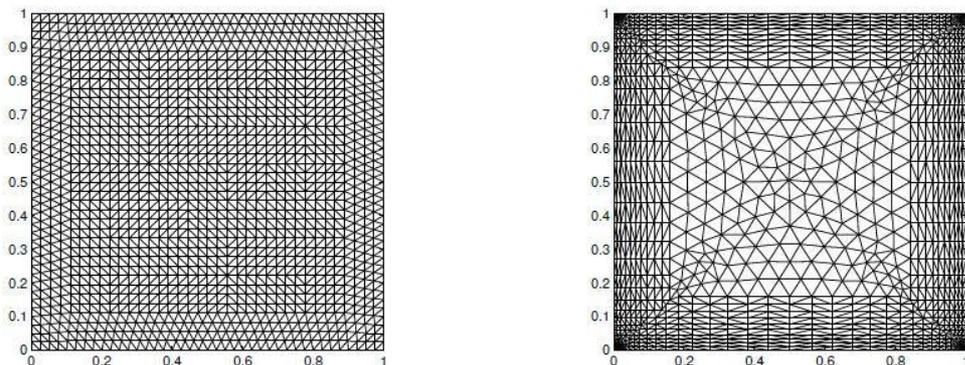


Figura 12. Malla uniforme a la izquierda y malla refinada a la derecha.

Figura: (19)

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

2.2.6 Calidad de la malla

Una malla de calidad debe calcular una solución rápidamente y que sea precisa y estable. Cuánto más pequeño sea el tamaño de una malla tiene más precisión, pero también tarda más en encontrar la solución. Lo idóneo es una malla con buena calidad pero sin llegar a tiempos de resolución demasiado largos. Es muy importante la densidad y la distribución de los nodos, ya que, aunque a priori a veces es difícil saber cual es la zona más crítica, una zona crítica con una malla poco densa o refinada puede dar una solución muy alejada de la realidad. Sin embargo, refinar por igual toda la malla y con la misma densidad puede dar tiempos de resolución demasiado largos.(20)(21)

Las tres medidas más importantes para saber si es una malla de calidad son la asimetría, la suavidad y la relación de aspecto.

- Asimetría: una medida importante para saber si se trabaja con la malla adecuada y con una buena calidad es cómo de asimétrica es la cuadrícula de la malla. La asimetría es la diferencia que existe entre la forma de las celdas de la malla con una celda cuadrilátera del mismo volumen.
- Suavidad: el cambio de tamaño entre celdas debe ser gradual y no repentino. Ya que un cambio de tamaño demasiado drástico puede dar soluciones muy lejanas de la realidad en los nodos de alrededor.
- Relación de aspecto: es la relación entre el lado más largo y el lado más corto de la celda. Para celdas triangulares o cuadradas el resultado ideal es uno, aunque en la realidad es difícil de conseguir, se debe conseguir un valor muy cercano a 1. Además, la relación entre una celda y la celda de al lado debería ser alrededor del 20%, para obtener resultados realistas.(20)(21)

2.3 MODELO DE TURBULENCIA

Otra clasificación muy importante de los fluidos es si el régimen de funcionamiento es laminar (el fluido transcurre de manera ordenada) o turbulento (el fluido transcurre de manera desordenada). La diferencia entre uno u otra se calcula a través del número de Reynolds (Re). Para $Re < 2300$ es laminar, y para $Re > 4000$ es turbulento. En el caso de $2300 < Re < 4000$, es una zona de transición de laminar a turbulento en el que no se sabe a priori cuál es el carácter del fluido.

En el caso de este trabajo, y como en la mayoría de los fluidos a presión, se trabaja en régimen turbulento.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

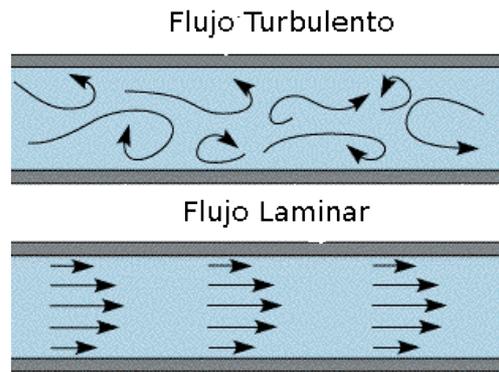


Figura 13. Flujo laminar y turbulento

Fuente:(22)

Existen tres tipos de modelo de turbulencia dependiendo en que grado se modele la turbulencia.

- Direct Numerical Simulation(DNS): Se resuelve completamente la turbulencia, por lo que conlleva un gran gasto computacional.
- Large Eddy Simulation (LES): para ahorrar coste computacional solo se procede a resolver las grandes estructuras.
- Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS): se resuelve calculando un promedio de las fluctuaciones turbulentas, conlleva un coste computacional muy pequeño. La peculiaridad de estos modelos es que deben añadir unas ecuaciones de transporte para representar el transporte de la turbulencia: energía cinética turbulenta (TKE) k ; tasa específica de disipación de TKE ε ; tasa específica de disipación de TKE ω , viscosidad turbulenta ν_t . Algunos modelos RANS más empleados son el k - ε Standard, Realizable o RNG; o el k - ω Standard SST.(17)

En este trabajo se emplea un modelo de cierre de turbulencia RANS RNG k-epsilon, ya que es uno de los más utilizados en el ámbito ingenieril.

2.3.1 Funciones de pared

En la capa límite se suele producir grandes gradientes que su resolución es muy compleja. Para evitar resolver esa capa límite, generalmente se utiliza las funciones de pared. Von Kármán(1996) propone las funciones de pared que consisten en adimensionalizar los perfiles de velocidad:(17)

$$y^+ = y \frac{u_t}{\nu} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$u^+ = \frac{u}{u_t} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

- y^+ : la distancia a la pared adimensional.

- y : la distancia real a la pared.

- u^+ : velocidad adimensional

- u : velocidad real

- ν : viscosidad cinemática, calculada como μ/ρ donde μ es la viscosidad dinámica.

- u_t : velocidad de corte (o de agitación turbulenta) y se calcula: $u_t = \sqrt{\tau/\rho}$ donde τ es la tensión de corte.

Teniendo en cuenta que la capa límite puede dividirse en:

- Subcapa viscosa: $y^+ < 5 \rightarrow u^+ = u^*$
- Subcapa intermedia: $y^+ \in [5, 30] \rightarrow$ (impredecible)
- Subcapa logarítmica: $y^+ > 30 \rightarrow u^+ = (1/\kappa) \ln y^+ + C$

Una clasificación de las funciones de pared es:

- Alta Re: primer elemento en subcapa intermedia.
- Bajo Re: primer elemento en subcapa viscosa.(17)

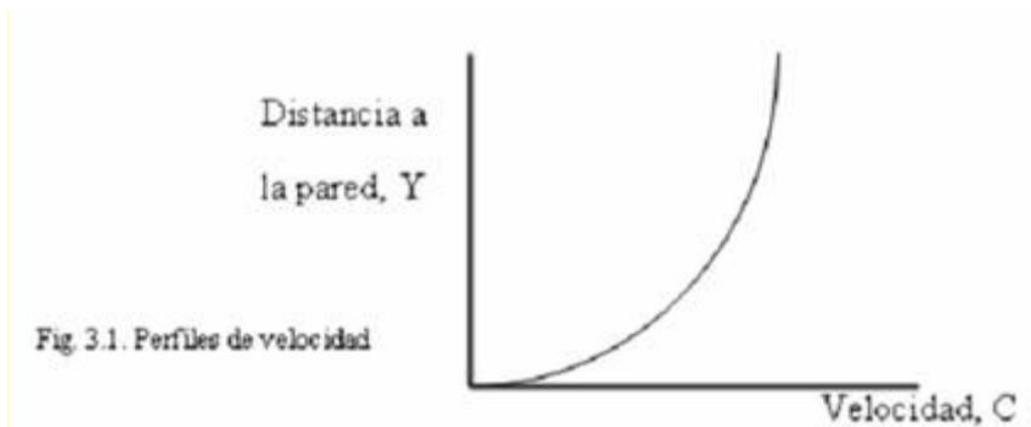


Figura 14. Funciones de pared

Fuente: (23)

2.4 OPENFOAM

OpenFOAM es un software CFD gratuito y de código abierto basado en C++ promovido por OpenCFD Ltd desde 2004. Es un software muy utilizado por una gran comunidad de usuarios pertenecientes a áreas de ingeniería y ciencia. OpenFOAM tiene la capacidad de resolver una gran variedad de flujos y entre ellos algunos flujos muy complejos.

(24)

Dada la gran ventaja de ser un código libre y gratuito, Openfoam ha sido el software elegido para llevar a cabo la resolución de este trabajo.

2.5 PARAVIEW

Para la última fase de post-procesado se utiliza la herramienta gráfica de Paraview para poder visualizar y analizar los resultados.

ParaView es una herramienta para poder visualizar y analizar datos provenientes de diferentes softwares de código abierto. Esta aplicación da la posibilidad de poder analizar los datos tanto de manera cualitativa como cuantitativa.(25)

3.DESARROLLO PRÁCTICO

3.1. MODELADO DEL CASO DE ESTUDIO

3.1.1. Enunciado y elección del problema

En este apartado se habla sobre el modelado del caso de estudio, condiciones iniciales y la simulación que se ha hecho.

Se ha elegido el caso de estudio de un tubo Venturi porque es uno de los casos más clásicos de la Mecánica de Fluidos y con muchas aplicaciones en la vida real.

Se resuelve mediante técnicas de mecánica de fluidos computacional con el objetivo de poder conseguir unos resultados lo más cercanos a la realidad posible y fiables sin la necesidad de tener que disponer de unos resultados experimentales para compararlos. Se pretende estudiar como varia la velocidad y la presión a lo largo del tubo y analizar si se puede dar el fenómeno de la cavitación.

La figura 15 representa la geometría que se ha utilizado para este caso de estudio. El tubo del caso de estudio de este trabajo tiene un ancho de 0.14 m a la entrada y a la salida, la anchura del estrechamiento es de 0.04 m y el tubo en total mide 0.8 m de largo.

A la hora del modelado se ha utilizado solo la mitad del tubo, ya que al tener simetría horizontal los resultados también son simétricos a cada lado. De esta manera se hace el modelo la mitad de sencillo y en consecuencia es más rápido a la hora de simularlo.

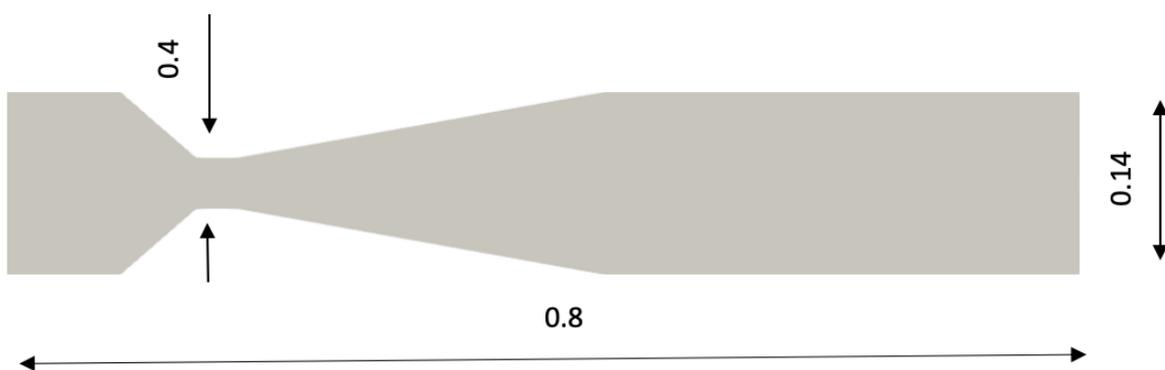


Figura 15. Figura geométrica del tubo Venturi de este trabajo (acotado en metros).

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

3.1.2. Configuración del caso en el problema

3.1.2.1 Definición del entorno

Una vez explicado como es el caso de estudio de este trabajo, se explica que herramientas se han utilizado. Los softwares de CFD tienen una licencia excesivamente cara, lo que imposibilitaría su utilización para este trabajo ya que sería un coste inadmisibles. Por esto, es una de las razones más importantes por las que se ha elegido el software OpenFOAM, ya que es un software gratuito y de código abierto basado en programación C++.

Para utilizar este software se necesita el sistema operativo Linux. En este caso, se ha utilizado la máquina virtual Ubuntu, para dentro de ella poder trabajar con el sistema operativo de Linux y así poder trabajar con OpenFOAM de manera gratuita. Esta máquina virtual lo que pretende es simular un ordenador para poder trabajar con prácticamente cualquier sistema operativo dentro de cualquier ordenador.

3.1.2.2 Entradas de datos y modelado

OpenFoam trabaja sobre una estructura general de directorios y archivos de texto que constituyen un caso estándar. A partir de esta estructura general, se debe ir cambiando los archivos de texto y adaptándolos al caso de estudio. Se debe cambiar la geometría de la figura, el modelo de turbulencia y el tamaño de la malla, es decir, completar todos los parámetros necesarios de la fase de pre-proceso antes de la simulación.

Para cada caso de estudio se requiere un directorio, que a su vez incluye tres directorios. En la figura 16 se muestra de que manera están organizados estos directorios en OpenFOAM.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

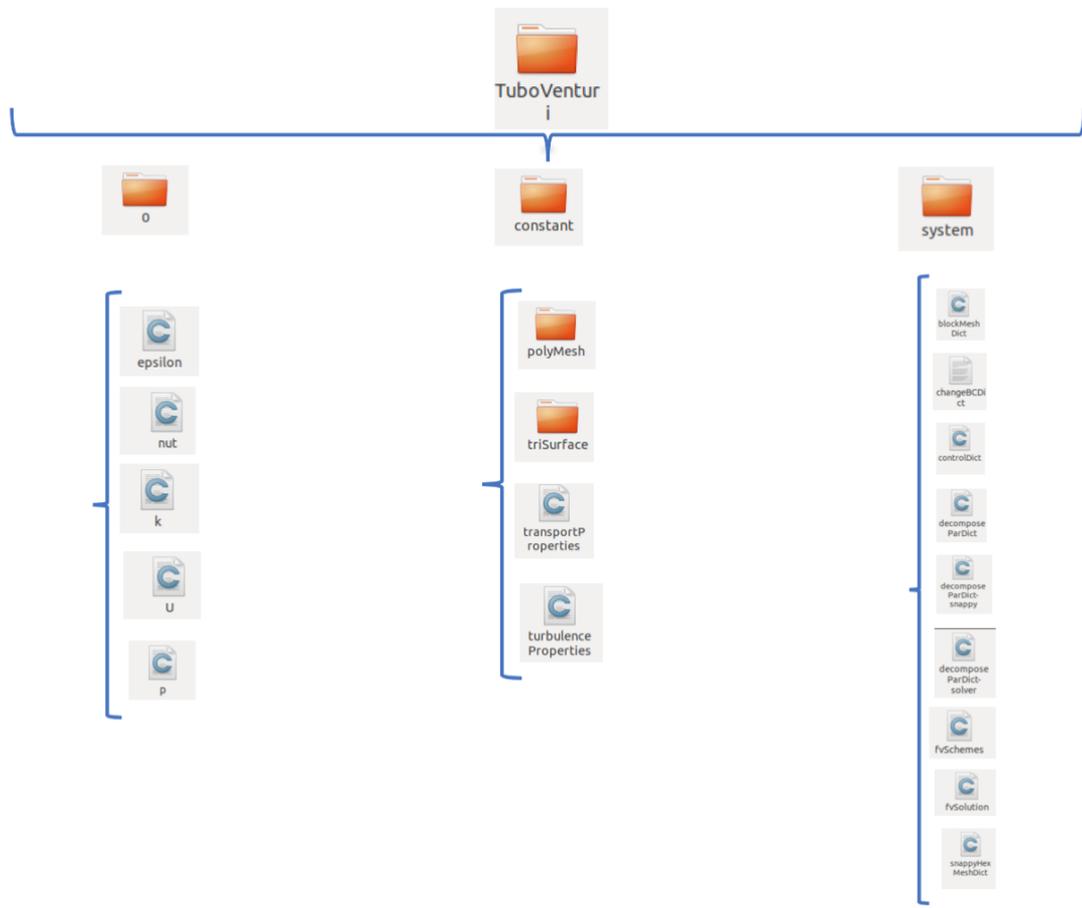


Figura 16. Jerarquía directorios OpenFOAM

El directorio 0 guarda las condiciones de contorno e iniciales. Dentro de este directorio hay diferentes documentos de texto para cada una de las variables físicas del caso.

Dentro de cada documento de texto se cambian las condiciones de contorno.

En primer lugar, se hace referencia a las condiciones de contorno de la presión que están recogidas en el documento p. Como se puede ver en la figura 17, a las condiciones de contorno de la pared de arriba, de abajo y de la izquierda se les asigna un gradiente de presión cero. Asignar un gradiente de presión cero en estas localizaciones significa que se conoce que ahí hay una presión no nula pero no se conoce su valor. Por tanto, es la forma de decirle a OpenFOAM que calcule él la presión en ese punto. Mientras que para la pared de la derecha se ha impuesto la condición de presión cero, ya que esta parte es el final de la tubería que desemboca al exterior y por tanto la presión es igual a la presión atmosférica, que hablando en términos de presión relativa es nula.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

```
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    outlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 0;
    }

    "top.*"
    {
        type            zeroGradient;
    }

    "bottom.*"
    {
        type            zeroGradient;
    }

    "(front.*|back.*)"
    {
        type            empty;
    }

    "symmetry.*"
    {
        type            symmetryPlane;
    }
}
```

Figura 17. Condiciones de contorno de la presión.

Del mismo modo, ahora se muestra el documento `u` (figura 18), que hace referencia a las condiciones de contorno de la velocidad. En el caso de la velocidad se impone la condición de velocidad de entrada que es de 4,707 m/s ya que es la única velocidad que se conoce. A la salida del tubo, se impone el gradiente de velocidad cero, como ya se ha explicado, se conoce que hay una velocidad no nula pero no se conoce cuál es. En la pared de abajo se impone la velocidad nula, ya que, por la condición de adherencia, el fluido en contacto con la pared del tubo no desliza sobre esta, sino que adopta su velocidad que en este caso es cero. Sin embargo, en la pared de arriba, se impone la condición de simetría, ya que realmente no es una pared, sino que es el eje de simetría del caso de estudio, y en la otra parte simétrica dará unos resultados idénticos.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

```
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (4.707 0 0);
    }

    "bottom.*"
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0 0 0);
    }

    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    "(front.*|back.*)"
    {
        type            empty;
    }

    "symmetry.*"
    {
        type            symmetryPlane;
    }
}
```

Figura 18. Condiciones de contorno de la velocidad.

La carpeta de nut, hace referencia a lo que es la viscosidad turbulenta. Se sabe que la viscosidad del fluido genera una disipación de energía que se está teniendo en cuenta a la hora del cálculo del caso. Pero la viscosidad, no es lo único que genera disipación de energía. También se sabe que la turbulencia del fluido disipa energía. Para tener esta disipación de energía en cuenta, se asocia con la viscosidad, y de ahí sale el término de la viscosidad turbulenta.

Por último, quedan los directorios k y épsilon. Estos hacen referencia a la energía cinética turbulenta y la disipación de esta, respectivamente.

$$K = \frac{3}{2}(UI)^2 \quad (\text{Ecuación 10})$$

- K: es la energía cinética turbulenta
- U: velocidad a la entrada del dominio modelado
- I: intensidad turbulenta

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

- ϵ : ratio de disipación turbulenta
- C_μ : constante empírica del modelo turbulento
- l : es 0,7 del radio hidráulico.

Todos estos datos para el caso de estudio son:

U(m/s)	4,707
l	0,1
L(m)	0,098
C_μ	0,085

Tabla 1. Parámetros sobre la energía cinética turbulenta del caso

Por tanto, resulta en unos valores para la energía cinética turbulenta y para la disipación de la energía cinética turbulenta de:

k	0,3323
ϵ	0,3077

Tabla 2. Energía cinética turbulenta y disipación de esta

El siguiente directorio de OpenFOAM es el de constant. Dentro de esta carpeta está el directorio de polyMesh, y unos archivos de texto que guardan las propiedades del fluido como el modelo de turbulencia. El directorio de polyMesh contiene nueve documentos de texto referidos a la malla. De estos nueve archivos cabe destacar la importancia de los archivos "points" y "faces". El documento de texto que se llama "points", que son una serie de vectores cada uno correspondiente a una celda, donde cada vector representa un vértice. Otro documento importante, que cabe mencionar dentro del directorio de polyMesh es el documento llamado "faces", donde se describe cada cara del objeto las cuales están formadas por un grupo de vértices.

Por último, el tercer directorio de OpenFOAM es system.

En caso de cambiar la malla es este documento llamado blockMeshDict el que será necesario modificar para estipular un tamaño diferente de malla.

En blockMeshDic el usuario crea todo un rectángulo, y con el documento de snappyHexMeshDict lo se recortar la parte de la geometría sobrante para que así quede finalmente la geometría deseada del tubo Venturi.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

```

vertices
(
  ( 0.000000 0.137600 0.025000 ) // point 0
  ( 0.800000 0.137600 0.025000 ) // point 1
  ( 0.000000 0.206400 0.025000 ) // point 2
  ( 0.800000 0.206400 0.025000 ) // point 3
  ( 0.000000 0.137600 0.075000 ) // point 4
  ( 0.800000 0.137600 0.075000 ) // point 5
  ( 0.000000 0.206400 0.075000 ) // point 6
  ( 0.800000 0.206400 0.075000 ) // point 7
);

blocks
(
  hex ( 0 1 3 2 4 5 7 6 ) ( 1440 124 1 ) simpleGrading ( 1.00000 1.00000 1.00000 ) // block 0
);

```

Figura 19. Condiciones de geometría de la malla.

La figura 19 es un ejemplo de la manera en la que se describe la geometría cuadrada antes de ser recortada.



Figura 20. Representación gráfica de una zona ampliada de la malla

En la figura 20 se puede ver una como sería la malla de este trabajo. Según la clasificación del punto 2.2.5 se utiliza una malla estructurada, no adaptativa y uniforme.

Con el comando checkMesh, OpenFOAM devuelve los datos correspondientes a la tipología de la malla. En este caso la tipología de la malla correspondiente al tubo Venturi es la siguiente:

Points	306028
Faces	607615
Internal faces	301413
Cells	151534
Faces per cells	5.99
Hexaedre	151358
Prism	176

Tabla 3. Tipología malla tubo Venturi

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

En la tabla 3, se puede observar que, debido al tipo de malla en este caso, casi todas las celdas son hexaédricas. Hay algunos prismas, que son el resultado de algunas celdas al recortar la geometría del tubo.

Además, dentro del directorio de system se encuentran tres ficheros muy importantes que son los que OpenFOAM denomina diccionarios y son:

1. controlDict: Es el diccionario donde se indica cosas como el tiempo inicial, final de simulación, el intervalo de tiempo para cada una o cada cuanto tiempo graba la solución de cada iteración.
2. fvSolution: Es el diccionario que contiene los métodos de resolución y las tolerancias para cada una de las ecuaciones definidas en el problema.
3. fvSchemes: Es el diccionario que contiene los esquemas de interpolación para término de cada ecuación definida. (26)

3.1.2.3. Simulación

En este trabajo se van a simular cuatro tamaños de malla y posteriormente se explicará cual es el tamaño seleccionado finalmente. Para proceder a la simulación de cada tamaño de malla, se tiene que crear un directorio en cada caso de malla que contenga dentro todos los directorios que se han comentado anteriormente. Dentro de cada directorio se cambia el tamaño de la malla, en el documento BlockMesh.

Una vez se tienen los distintos casos, hay que llamar al caso desde el terminal y después ejecutar el script *Allrun*, como se puede observar en la figura 23. Este script únicamente contiene todos los pasos explicados hasta el momento, de manera que al ejecutarlo completa todos los pasos automáticamente sin tener que hacerlo manualmente, además borra los directorios con resultados que pueda haber y empieza a simular. En el script se puede especificar cuantas iteraciones se desea que haga antes de que se corte la simulación. En este caso el script está configurado para que itere hasta llegar a la iteración número 100000 y guarde los resultados cada 5000 iteraciones. Como 100000 es un número muy alto de iteraciones, lo que se ha hecho es ir representando los residuos con el comando gnuplot mientras seguía iterando. Cuando se ha observado que ha llegado un valor estable y suficientemente pequeño, que se puede dar por convergido, la iteración se cortaría sin llegar a 100000 necesariamente. Después de la simulación, se tiene un directorio nuevo por cada 5000 iteraciones donde guarda los resultados en un archivo de texto y una imagen donde se puede observar gráficamente estos residuos.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

A continuación, se pueden ver los resultados de los residuos para cada caso.

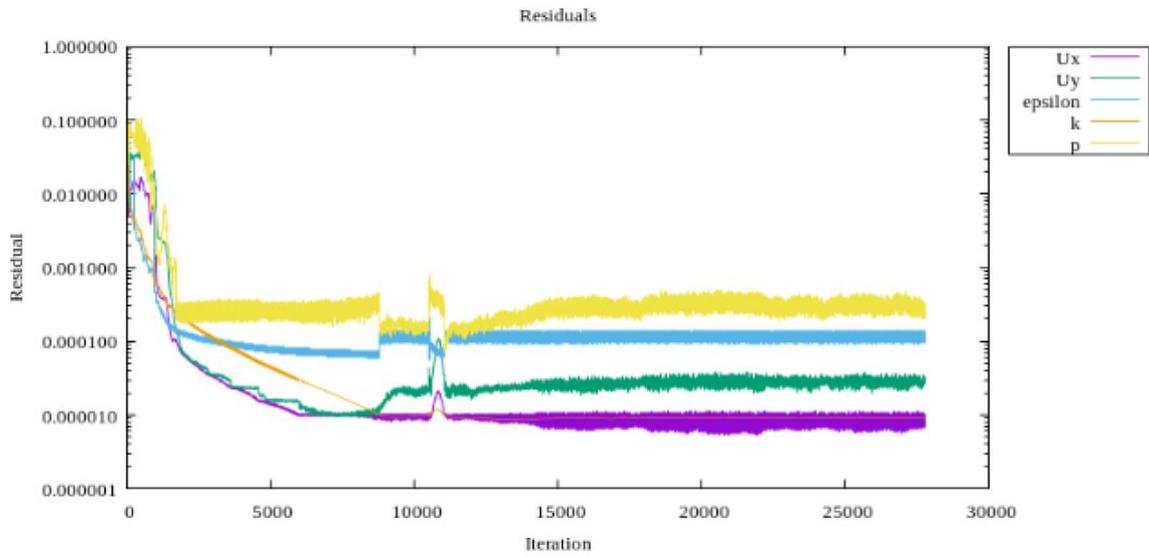


Figura 21. Residuos de la malla 1

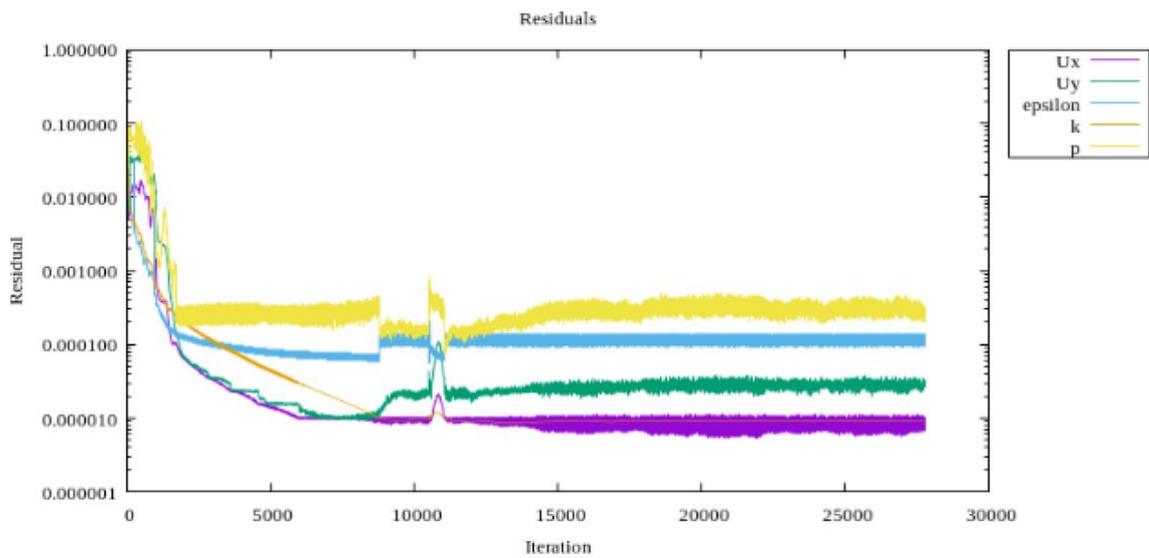


Figura 22. Residuos malla 2

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

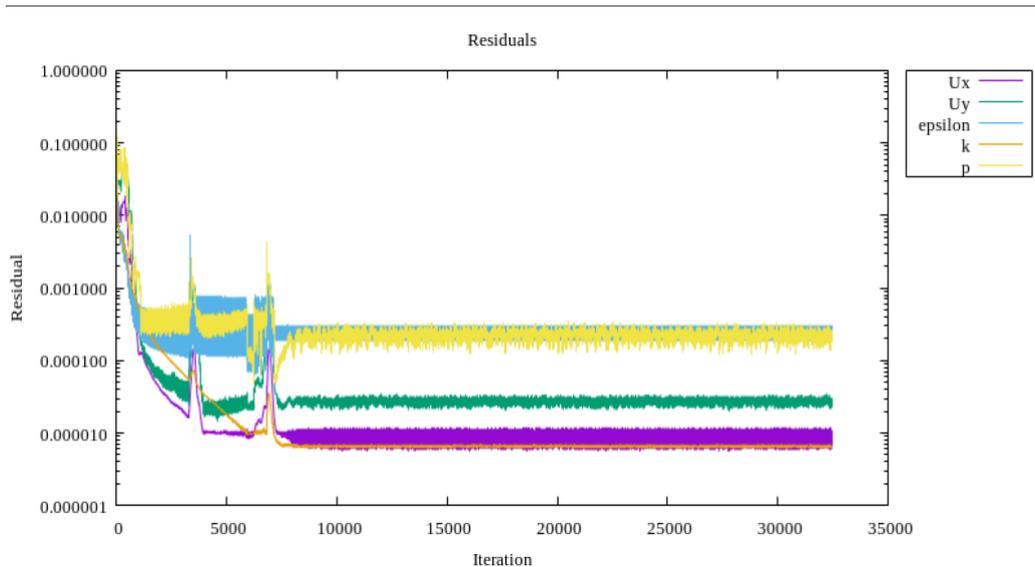


Figura 23. Residuos malla 3

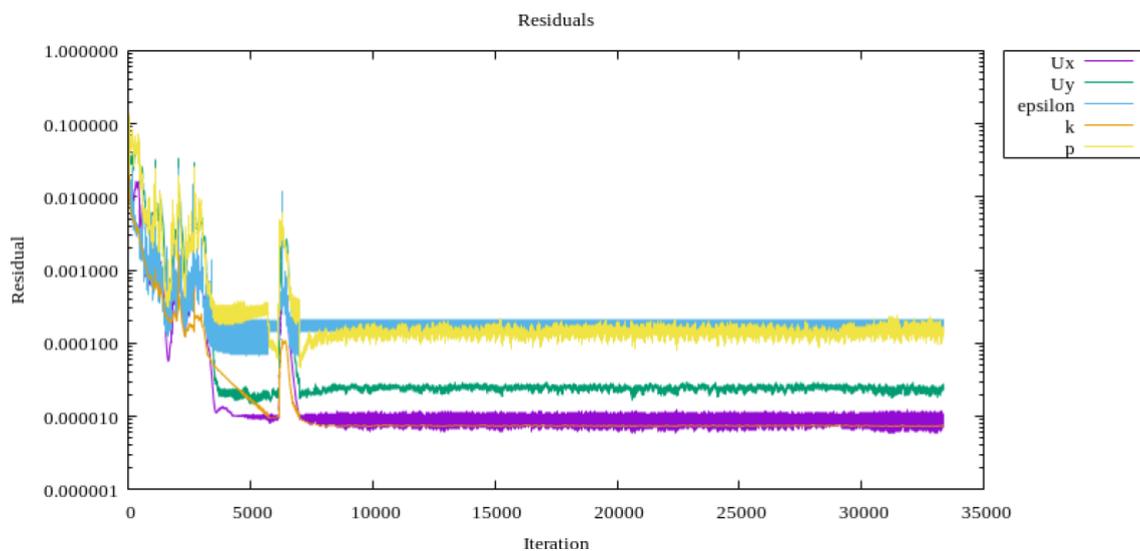


Figura 24. Residuos de la malla 4

De estas imágenes se puede observar que la malla 1 y la malla 2 tardan más en convergir ya que son mallas más finas, por tanto, es un resultado esperado. En todos los casos, tanto la ϵ como la presión son los parámetros que obtienen un residuo más alto, aunque aún así están por debajo de 0,001 y llegando casi a 0,0001 por lo que son valores bastante pequeños, y por tanto se pueden dar por convergidos. Realmente, lo que quieren decir estas gráficas es que es muy difícil llegar al valor exacto del resultado, entonces se utiliza el método iterativo de residuos, de manera que en cada iteración se acerque más a un resultado estable, se va acercando en forma de asíntota, hasta que llega un momento que el residuo es tan pequeño que el resultado se puede considerar real.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

También es importante fijarse en los tiempos de cálculo y como cambian para cada malla.

A continuación, se puede ver una tabla con los tiempos que tarda en convergir cada malla.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3	Malla4
Nº de iteraciones	15000	15000	15000	15000
Tiempo (h)	2,22	1,79	1,2	0,87

Tabla 4. Tabla donde se muestran los tiempos de simulación.

En la tabla 4 se observa como en las mallas 1 y 2 (mallas más finas) ha convergido más tarde, con más iteraciones, y a su vez la malla 2 lo ha hecho en menos tiempo que la malla 1. Las mallas 3 y 4, mallas más gruesas, han convergido con menos iteraciones, y a su vez la malla 4 lo ha hecho en menos tiempo. Por tanto, se puede decir que, a menor tamaño de celdas, es decir, malla más fina utiliza más iteraciones para llegar a la convergencia y por tanto lo hace en más tiempo.

Para la simulación hay varias opciones de trabajar con la máquina virtual. Se puede utilizar la máquina virtual trabajando en serie, es decir con un procesador o trabajando en paralelo, es decir con n procesadores, o directamente enviarlo al centro de cálculo para hacer las simulaciones mucho más rápidas. La primera opción utilizada, ha sido utilizar la máquina virtual trabajando en serie, y de esta manera la simulación más larga dura menos de 3 horas que es un tiempo totalmente aceptable. Por lo tanto, no ha hecho falta recurrir a ninguna de las otras opciones, que a priori hubieran sido más rápidas, pero también más complejas.

3.2. ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

Posteriormente a la simulación de las diferentes mallas se debe elegir cual es la más apropiada para el modelo. Para esto, tal y como proponen la división de Ingeniería de Fluidos de ASME (American society of Mechanicals Engineers) se debe realizar un análisis de malla como explican en el artículo *Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications* (Procedimiento de Estimación e Informe de Incertidumbre Debido a la Discretización en las Aplicaciones CFD). Este análisis de malla es lo que se llama análisis de convergencia. La propuesta de este análisis se hizo con la intención de poder mejorar la calidad de las publicaciones, ya que cada vez son más las publicaciones mediante técnicas CFD, y cada vez son más los avances en esta tecnología informática. De manera que con este análisis se pueda obtener información sobre los errores en la discretización de la malla, sin tener la necesidad de tener los datos experimentales. Porque en muchos casos no se pueden tener estos datos, y uno de los objetivos del uso de CFD es poder predecir resultados sin la necesidad de tener los resultados experimentales.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

El objetivo del análisis de convergencia de malla es determinar el grado de refinamiento de ésta que asegura la independencia de los resultados. El análisis se realiza para una determinada variable indicadora (Φ).

En los siguientes apartados, se explica paso a paso, este análisis sobre este modelo siguiendo los pasos del artículo anteriormente mencionado de los ingenieros de ASME.(27)

3.2.1. Procedimiento para la estimación del error de discretización

En primer lugar, se calcula el primer tamaño de la malla que se cree adecuado para este modelo. Posteriormente, se irá variando la densidad de la malla para hacer la simulación con otros tamaños.

El refinado de la malla debe hacerse de forma que se mantenga la proporcionalidad entre el tamaño de todas las celdas. Lo normal es que a menor tamaño de la celda de la malla aumenta la precisión del resultado y esta tienda a un valor asintótico.

Para variar el tamaño de malla, se cambia el número de elementos sobre los que se divide el eje:

$$h_i = \frac{L_i}{n_i} \quad (\text{Ecuación 12})$$

- n_i : número de elementos del eje i

- L_i : longitud del eje i

- h_i : tamaño de la malla característico

	Nº de celdas eje i	Longitud eje i	h
Malla 1	1440	0,8	0,0005
Malla 2	1067	0,8	0,00075
Malla 3	800	0,8	0,001
Malla 4	616	0,8	0,0013

Tabla 5.Tamaño de malla característico.

Para hacer este análisis se necesita un mínimo de tres de mallas, ya que se analizan de tres en tres.

El siguiente paso es calcular las ratios de las mallas, que es la relación entre una malla y la inmediatamente inferior. También se calcula la ratio global, la relación entre la malla más grande y la más pequeña. Este valor debería ser como mínimo 1,3.

$$r = \frac{h_{gruesa}}{h_{fina}} > 1 \quad (\text{Ecuación 13})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

r	
r _{global}	2
r ₁₂	1,5
r ₂₃	1,33
r ₃₄	1,3

Tabla 6. Relación entre los diferentes tamaños característicos de mallas

A continuación, se debe elegir las variables indicadoras para este análisis (variables significativas en nuestro modelo). Se debe coger la misma variable, en el mismo punto en las diferentes mallas y hacer los análisis de convergencia de tres en tres, análisis ijk (siendo ijk la malla i, j y k). Cuando se está realizando el análisis ijk, realmente se comprueba si la malla más fina, en este caso la i, es correcta. Es importante saber que se deben tener en cuenta todas las opciones posibles de combinación con las mallas que hay. Es decir, si se tienen $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4$, y se realizan los análisis 123, 124, 134, 234.

Posteriormente se calcula ε , los errores absolutos de Φ_i entre dos mallas (ecuación 14), y s , el signo de los errores (ecuación 15).

$$\varepsilon_{ij} = \Phi_i - \Phi_j \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$s_{ijk} = \text{signo} \left(\frac{\varepsilon_{kj}}{\varepsilon_{ji}} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Con todos estos valores calculados se puede pasar a calcular el orden aparente de la malla (p_{kji}) (ecuación 16). Uno de los valores más importantes del análisis y que debe asemejarse al orden formal del modelo, y según esta comparación se comprueba si los datos están en el rango asintótico.

$$p_{kji} = \frac{1}{\ln(r_{ji})} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{kj}}{\varepsilon_{ji}} \right| + \ln \left(\frac{(r_{ji})^{p_{kji}} - s_{kji}}{(r_{kj})^{p_{kji}} - s_{kji}} \right) \right| \quad (\text{Ecuación 16})$$

Esta ecuación se calcula por iteración al no estar p_{kji} explícita.

Las ecuaciones 17 y 18 son el cálculo del error relativo aproximado y el error relativo extrapolado respectivamente.

$$e_{a,21} = \left| \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{\Phi_1} \right| \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$e_{ext,21} = \left| \frac{\Phi_{ext,21} - \Phi_1}{\Phi_{ext,21}} \right| \quad (\text{Ecuación 18})$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Además del orden aparente de la malla, otro de los datos que se deben reportar es el índice de convergencia de la malla (ecuación 19) como indicador de la incertidumbre numérica. Este error debe ser menor del 10% para poder considerarse aceptable en el análisis. Por debajo del 5% se está ante un error más que admisible.

$$GCI_{321} = \frac{1.25e_{a,21}}{(r_{21})^{p_{321}} - 1} \quad (\text{Ecuación 19})$$

3.2.2. Post-procesado y cálculo del error de discretización

Tras la simulación de las cuatro mallas se utiliza la herramienta de visualización ParaView para visualizar los resultados de manera gráfica.

Para poder abrir ParaView desde el terminal, se tiene que seleccionar en el terminal el caso que se quiere abrir y ejecutar el comando paraFoam. De esta manera se abrirá automáticamente ParaView con el caso que se ha elegido.

Una vez se haya abierto ParaView se procede a analizar los resultados. Se debe utilizar la herramienta Plot Over Line, para mostrar los resultados de las variables seleccionadas sobre una línea en la zona de interés. También es importante seleccionar una resolución, esto son las divisiones que se hacen para cada punto. Se ha elegido una resolución de 100 para poder ver cómo evolucionan los resultados con la posición poca a poco. Pero en este caso, ya que el eje horizontal es de 0,8m con una resolución menor también hubiera sido suficiente.

Una vez hecho todo lo explicado, el programa muestra una gráfica, donde se pueden ver los resultados de las variables seleccionadas que van variando según la distancia del eje x. En este caso las variables seleccionadas son la presión relativa (p) y la velocidad (v).

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

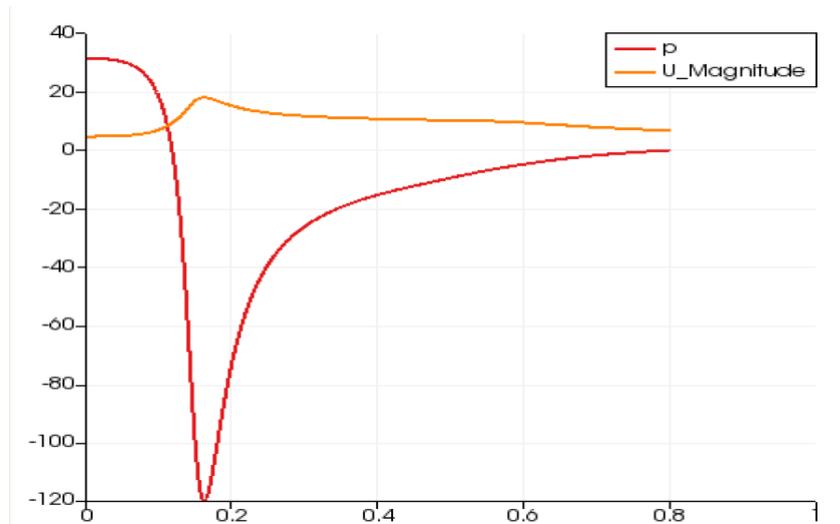


Figura 25. Resultados representados gráficamente.

Cabe destacar, que lo que la gráfica muestra como p no es la presión, sino es p/ρ , ya que es como trabaja Paraview. Para tener la presión, los resultados de la gráfica hay que multiplicarlos por 1000, ya que es la densidad del agua, que es con el fluido que se trabaja en este caso. $U_magnitudo$ hace referencia a la velocidad.

Con ParaView se puede guardar la información del gráfico directamente en un documento Excel. De esta manera se seleccionan los puntos que de interés para realizar el análisis de convergencia. Se puede realizar este proceso para las cuatro mallas, y seleccionar los mismos puntos.

En este caso se han utilizado como variables indicadoras la presión y la velocidad. Se han elegido 10 puntos para cada variable situados a lo largo del eje horizontal. Se han descartado directamente tanto el punto $x=0$ y el punto $x=0,8$, ya que por las condiciones de contorno que se han impuesto al modelado inicialmente en $x=0$ la velocidad es el mismo valor para las cuatro mallas, y en $x=0,8$ la presión es nula (desemboca fuera con presión atmosférica) y por tanto no se puede realizar el análisis con los tres valores iguales (daría un resultado incoherente).

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

x	Malla 1		Malla 2		Malla 3		Malla 4	
	v	p	v	p	v	p	v	p
0,08	5,7374	26,055	5,7373	25,005	5,737	22,615	5,7376	25,142
0,16	18,007	-119,68	17,802	-117,07	17,476	-113,72	17,555	-112,62
0,24	13,071	-42,947	12,973	-42,724	12,706	-41,676	12,98	-42,678
0,32	11,432	-22,866	11,339	-22,869	11,034	-21,829	11,366	-23,0190
0,4	10,743	-15,221	10,614	-15,007	10,344	-14,459	10,679	-15,446
0,48	10,295	-10,506	10,176	-10,4080	9,9003	-9,9626	10,226	-10,714
0,56	9,8896	-6,4425	9,7742	-6,3946	9,5034	-6,1085	9,8136	-6,5767
0,64	8,7756	-3,3692	8,8128	-3,3962	8,872	-3,2412	8,8933	-3,4587
0,72	7,5795	-1,2936	7,6245	-1,3006	7,7464	-1,2555	7,6747	-1,3260
0,76	7,0983	-0,57037	7,1193	-0,5604	7,2622	-0,5473	7,1747	-0,5767

Tabla 7. Datos de velocidades y presiones en los diez puntos seleccionados.

3.2.3. Resultados

Se ha decidido realizar el análisis con cuatro tamaños distinto de mallas, por tanto, se debe hacer análisis de tres en tres teniendo en cuenta todas las opciones posibles. Así pues, se realizan los análisis: 123,124,134,234.

Cuando ya se tienen los análisis, se recogen en las siguientes tablas los parámetros más significantes del análisis para poder compararlos y así decidir si la malla más fina es la adecuada. Estos parámetros son el orden aparente, que se comparan con el orden formal del modelo, y el índice de convergencia.

ρ_{123}	ρ_{124}	ρ_{134}	ρ_{234}
4,9731	2,121	359,3865	1,615

Tabla 8. Resultados del orden aparente de los cuatro análisis de convergencia.

GCI_{123}	GCI_{124}	GCI_{134}	GCI_{234}
0,64%	4,39%	6,078%	27,23%

Tabla 9. Resultados del índice de convergencia de los cuatro análisis de convergencia.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

El orden formal de este modelo es de 2, por tanto, lo esperado es que el orden este cerca de 2. En primer lugar, se puede observar en los resultados que la malla 3 quedaría directamente descartada, ya que los resultados no son los recomendados. En el análisis p_{123} , el orden aparente no es un valor disparatado, pero si es bastante mayor al orden formal de este modelo. El análisis p_{134} , da un orden formal disparatado ya que da varios puntos anómalos con un orden aparente demasiado alto, se podrían eliminar estos puntos anómalos, pero teniendo otra malla que se ajusta mejor, es mejor descartarla. Por último, el orden aparente del análisis p_{234} si se asemeja bastante al orden formal, sin embargo, el índice de convergencia es 27% cuando lo recomendable es estar por debajo del 10%. Por tanto, de los cuatro análisis el único que queda es el análisis p_{124} . Fijándose únicamente en este análisis, se resumen los resultados en tabla 10.

p_{124}	CGI_{124}
2,121	4,39%

Tabla 10. Orden aparente de malla e índice de convergencia del análisis de convergencia 124.

Como se puede apreciar estos resultados son muy buenos. Ya que el orden formal del modelo es 2, y por tanto, el resultado del orden aparente es 2,121 por lo que está muy cerca. Por otra parte, el índice de convergencia no es solo menor del 10% sino también del 5%, lo que es un valor muy recomendable.

Como ya se ha explicado, cuando se hace el análisis de la malla p_{124} , se está comprobando si se puede dar por válida la malla más fina, en este caso la malla 1.

Se concluye entonces, que el tamaño de malla final es:

	Nº de celdas eje i	Longitud eje i	h
Malla 1	1440	0,8	0,0005

Tabla 11. Tamaño de la malla final.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS

En este apartado se representan y se analizan los resultados obtenidos con la malla finalmente elegida. Se va a representar el campo de velocidades y de presiones del tubo. También se procede a calcular las pérdidas y analizar si existe alguna región susceptible a cavitación.

4.1.1 Representación gráfica de los campos de velocidad, presión y líneas de corriente.

En primer lugar, se puede ver representado el campo de velocidades del tubo Venturi y sus correspondientes líneas de corriente.

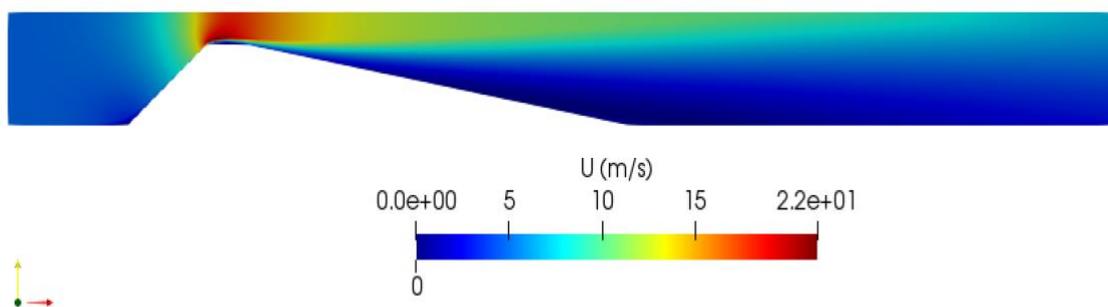


Figura 26. Campo de velocidades del tubo Venturi

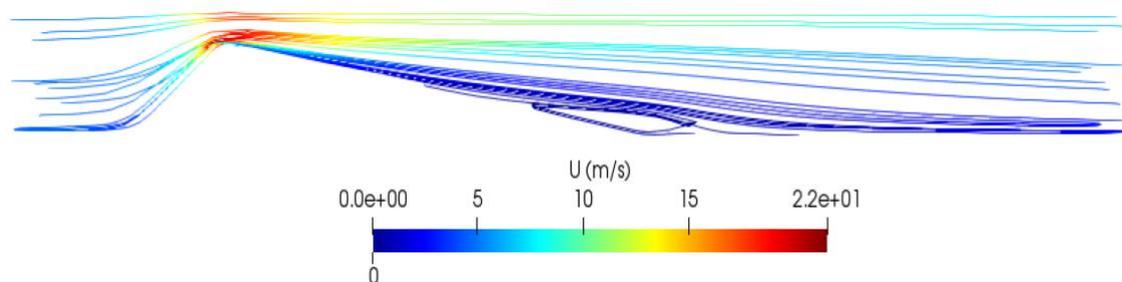


Figura 27. Líneas de corriente de la velocidad.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

En las figuras 29 y 30 se puede ver como varía la velocidad a lo largo del tubo Venturi. Se puede apreciar como a la entrada del tubo hay una velocidad cerca de 5 m/s (exactamente 4,707 m/s) esto es una de las condiciones de contorno que se ha impuesto al modelo. Además, se puede observar como al acercarse a la zona del estrechamiento va aumentando la velocidad, hasta que la velocidad máxima se encuentra en el punto más estrecho. Esto es debido a la ecuación de continuidad (ecuación 5). Por tanto, a mismo caudal si disminuye la sección, aumenta la velocidad.

También se puede ver que la velocidad del fluido que está en contacto con las paredes del tubo es nula. Esto es debido a la condición de adherencia, que quiere decir que un fluido en contacto con un sólido no desliza sobre él, sino que adopta su velocidad, que en este caso es cero.

A continuación, se representa el campo de presiones y sus líneas de corriente.

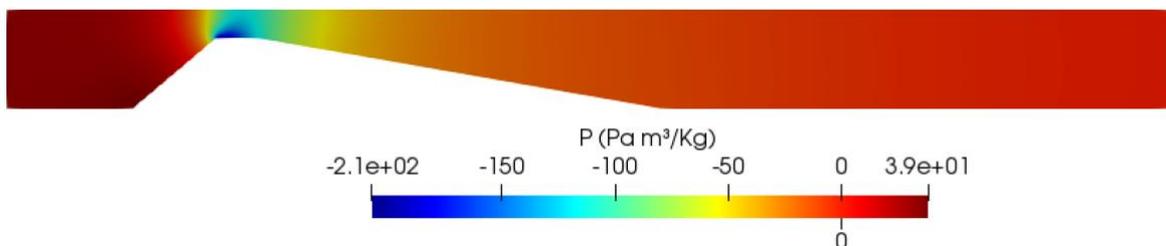


Figura 28. Campo de presiones del tubo Venturi.

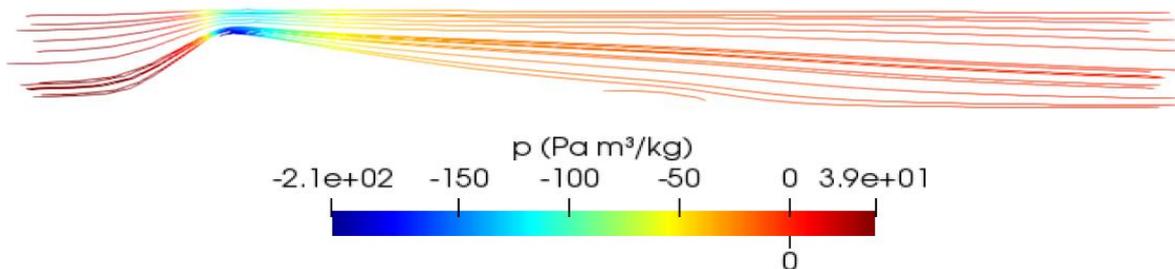


Figura 29. Líneas de corriente de la presión.

En las figuras 31 y 32 se puede observar cómo cambia la presión a lo largo del tubo. Entra a una presión de 31504 Pa. Conforme se va estrechando el tubo la presión empieza a disminuir tanto que llega a presiones negativas. Esto es debido a que, como ya se ha visto por la ecuación de la continuidad, la velocidad va a aumentar en el estrechamiento y como la cota es la misma, por la ecuación de Bernoulli (ecuación 1) se puede ver como al aumentar el término cinético y mantenerse la cota, el término de la presión tiene que disminuir. Esta depresión será menor o mayor en función de cuánto sea el estrechamiento del tubo y por tanto cuánto aumenta la velocidad. Esta depresión será la responsable de si puede haber o no cavitación (más adelante se comprueba). Conforme se vuelve a aumentar la sección se puede ver que empieza a aumentar de nuevo la presión. Al final del tubo la

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

presión es nula. Esto es una de las condiciones de contorno que se ha impuesto inicialmente, y esto es debido a que el tubo desemboca en el exterior y por tanto tiene presión atmosférica, que en términos de presión relativa es cero.

Otro dato interesante que se puede apreciar en las imágenes 30 y 32, gracias a las líneas de corrientes, es el despegue del flujo que se produce después del estrechamiento. El despegue de flujo es sinónimo de depresión. Cuanto menos hidrodinámico es un perfil, es decir, cuanto menos paralelas son los a las líneas de corriente más se produce este despegue de flujo, y por tanto más depresión existe.

4.1.2. Cálculo de las pérdidas

Si se estuviera ante un fluido ideal, sin viscosidad, y en un tubo con un material en el que no hubiese rozamiento, el trinomio de Bernoulli se mantendría a lo largo de todo el tubo. De manera que cuando aumentase la velocidad de un punto a otro disminuiría la presión de manera proporcional si se mantiene la cota constante. Esto no pasa así, porque en la realidad ningún fluido es ideal, todos tienen algo de viscosidad y cualquier tubo tiene un mínimo de rozamiento por pequeño que sea. Por tanto, existen las pérdidas que hacen que el trinomio de Bernoulli no sea constante, como se ha visto anteriormente en la ecuación 2.

Para calcular las pérdidas se cogen los datos del punto de $x=0\text{m}$ y los de $x=0.8\text{m}$. Para sacar un dato más realista se saca un promedio de varios puntos a lo largo del eje y para $x=0\text{m}$ y para $x=0.8\text{m}$.

Los diferentes valores son:

x (m)	v(m/s)	p (Pa)
0	4,707	31432
0	4,707	31495
0	4,707	31661
0	4,707	31872
0	4,707	32056
0,8	6,7101	0
0,8	6,2163	0
0,8	5,1905	0
0,8	4,1207	0
0,8	3,2006	0

Tabla 12. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

A continuación, se muestra el promedio de estos valores para $x=0\text{m}$ y para $x=0,8\text{m}$

x(m)	p(Pa)	v(m/s)
0	317032	4,707
0,8	0	5,08764

Tabla 13. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo

Nótese que en la velocidad del punto $x=0\text{m}$ y en la presión del punto $x=0,8\text{ m}$ no hay variación entre los diferentes puntos ya que son las condiciones iniciales impuestas.

Teniendo en cuenta que las cotas son iguales y sustituyendo en la ecuación 2 vista anteriormente, se pueden sacar las pérdidas:

$$\frac{317032}{9810} + z + \frac{(4,707)^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{0}{9810} + z + \frac{(5,08764)^2}{2 \cdot 9,81} + \sum h$$

$$\sum h = 3,04 \text{ m}$$

En este caso, prácticamente todas las pérdidas corresponden a las pérdidas locales debidas al estrechamiento. Esto es debido a que es un tubo muy corto, por tanto, las pérdidas continuas darían un valor totalmente despreciable al lado de las pérdidas locales.

4.1.3. Región susceptible de sufrir

Como ya se ha explicado, la cavitación ocurre cuando se da que $p < p_v$.

En este caso, se está trabajando con el agua, la p_v a una temperatura ambiente es de 0,023 bar que es igual a 2300 pascales en términos de presión absoluta.

Al pasar esta presión a términos de presión relativa resulta $p_v = -99095 \text{ Pa}$. Por tanto, todo rango que tenga una presión menor de -99095 Pa es susceptible de cavitarse.

Mirando todas las presiones de los puntos del eje x se puede ver como desde el punto $x=0,1496$ con una presión de -101190Pa hasta $x=0,18\text{m}$ con una presión de -995610 Pa , están por debajo de la p_v , por tanto, todas las zonas comprendidas entre esos dos puntos estarían en peligro de que cavitase.

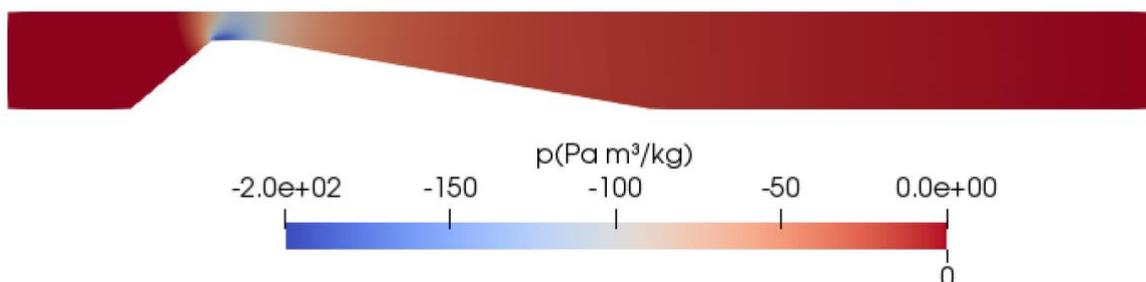


Figura 30. Zonas susceptibles de cavitación representadas en presión relativa

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Con la imagen 30 se puede apreciar perfectamente cuál es la zona susceptible de sufrir cavitación que corresponde con la zona azul y coincide con la zona más estrecha del tubo.

4.2 COMPARACIÓN DEL CASO 1, CASO 2 Y CASO 3.

4.2.1 Comparación de campos de velocidades, presiones y líneas de corriente

En este punto se ha variado la geometría a dos diferentes, y así poder estudiar la comparación entre ellas.

El objetivo de este análisis es poder ver cómo cambiando la geometría del tubo Venturi cambian tanto los parámetros básicos, la velocidad y la presión, así como la zona susceptible de sufrir cavitación.

La diferencia es solo geométrica, ya que los tres tubos tienen la misma anchura a la entrada y a la salida. Como se puede ver en las figuras 31,32 y 33, el caso 1 es el caso intermedio, en el caso 2 el estrechamiento es mucho más radical y en el caso 3 el estrechamiento es progresivo.

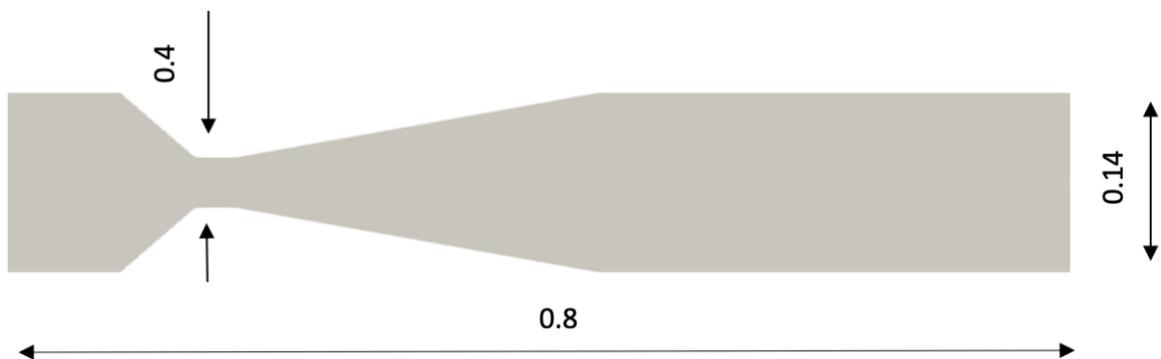


Figura 31. Geometría caso 1 (acotada en metros).

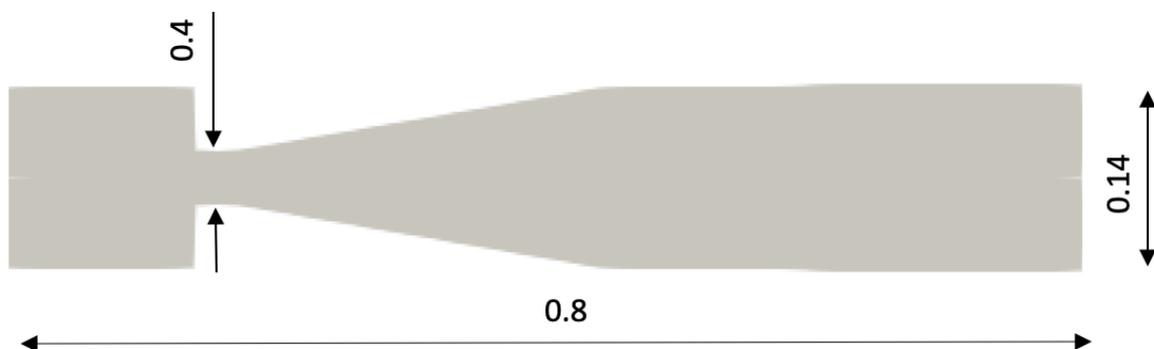


Figura 32. Geometría caso 2 (acotada en metros).

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

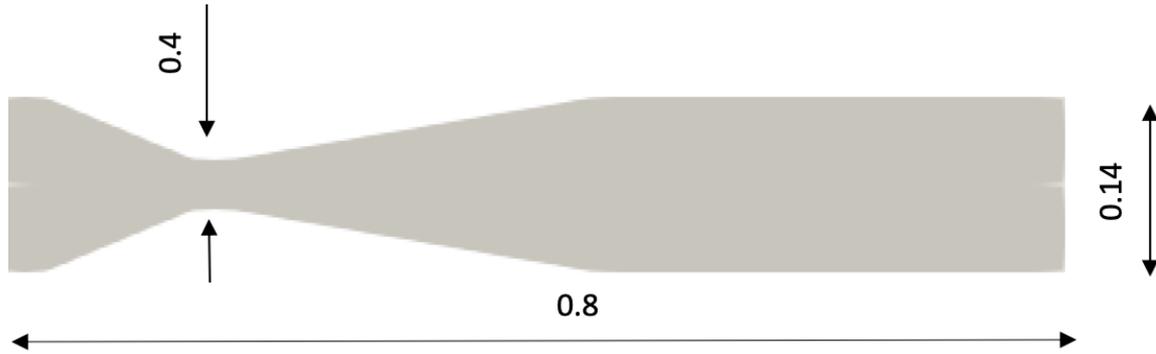


Figura 33. Geometría caso 3 (acotada en metros).

En primer lugar, se comparan los parámetros iniciales para cada caso.

	x=0		x=0.8	
	v(m/s)	p(Pa)	v(m/s)	p(Pa)
Caso 1	4.707	31434	6.7091	0
Caso 2	4.707	127520	5.4051	0
Caso 3	4.707	7000	6.03	0

Tabla 14. Parámetros iniciales para cada caso.

Tanto la velocidad de entrada, como la presión a la salida siguen siendo condiciones iniciales y por tanto coincide en los tres casos.

A continuación, se comparan la velocidad en los tres casos distintos.

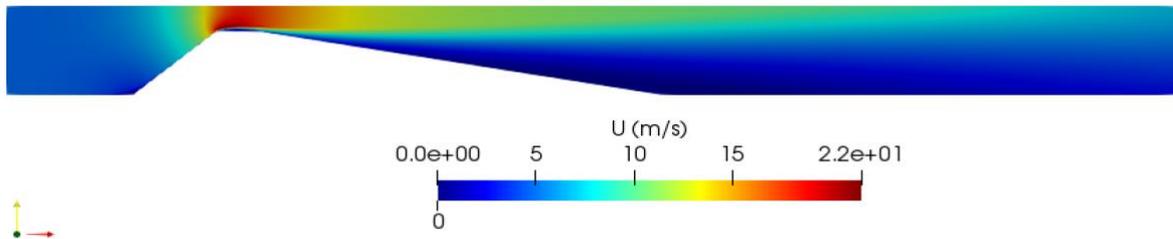


Figura 34. Representación velocidad caso 1

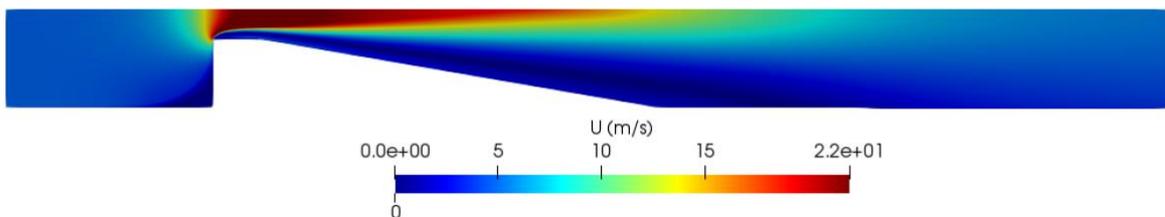


Figura 35. Representación velocidad caso 2.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

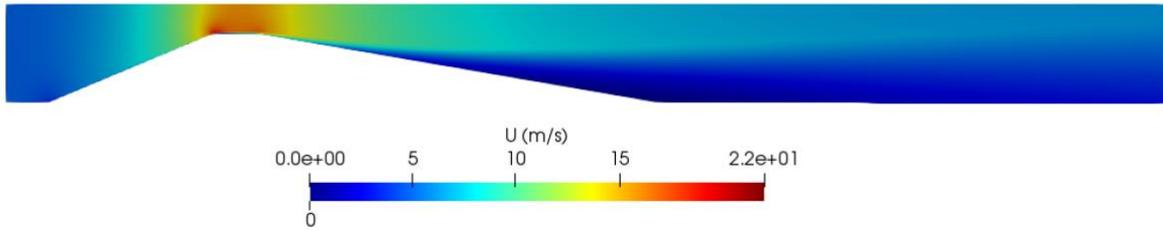


Figura 36. Representación velocidad caso 3.

Entre estas imágenes, se distingue como la velocidad en el estrechamiento en el caso 2, es mucho mayor, ya que el cambio de sección se produce de manera brusca, por lo tanto, eso hace que el fluido se acelere de manera drástica.

Por el contrario, en el caso 3 el cambio es mucho más gradual, y el estrechamiento es el menor de los tres casos, y por esta razón se observa que en la zona más estrecha se llega a velocidades mucho menores.

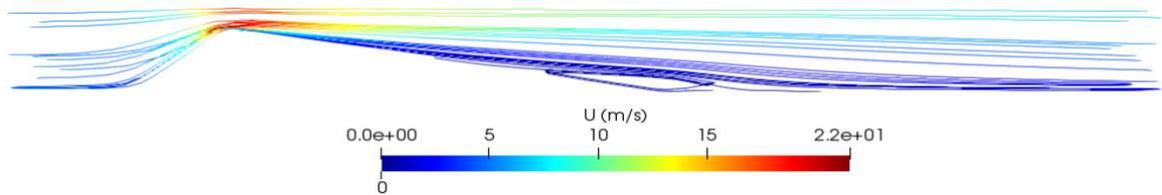


Figura 37. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 1.

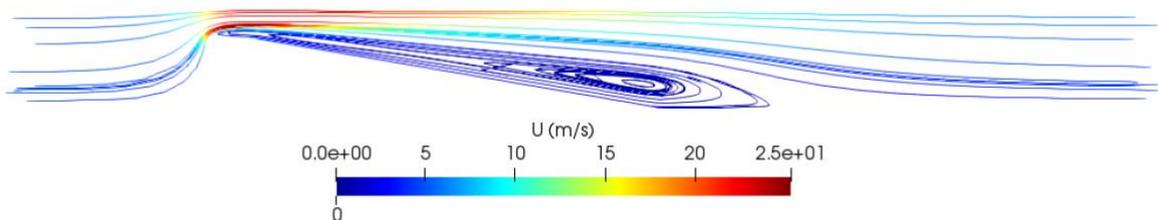


Figura 38. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 2.

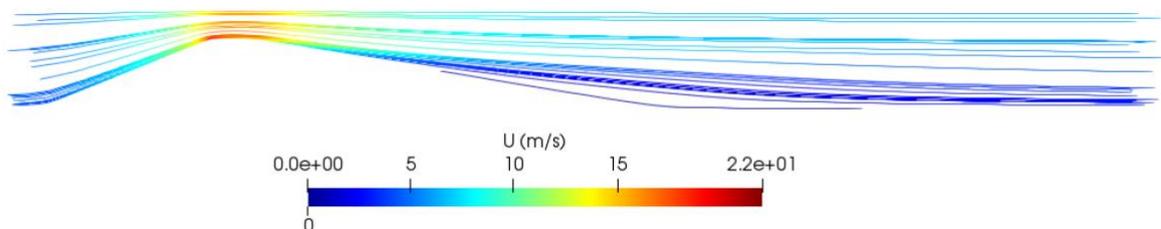
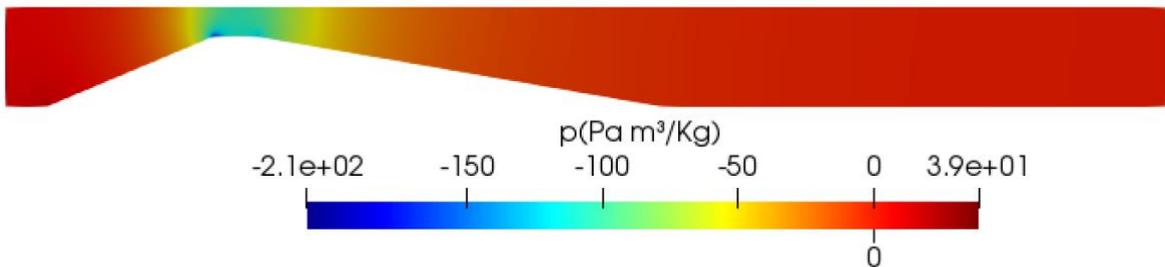
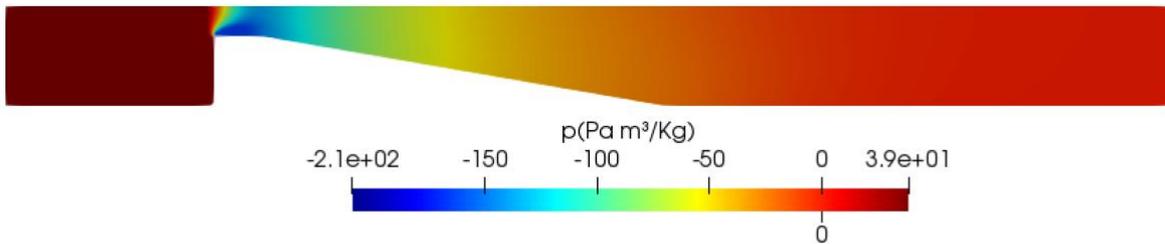
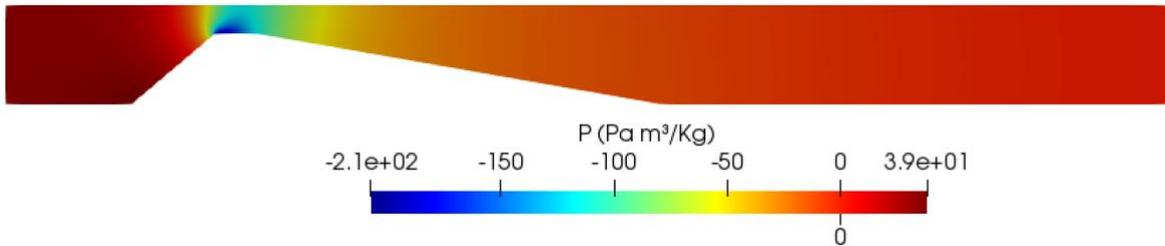


Figura 39. Representación de las líneas de corriente de la velocidad caso 3.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Representación de las presiones en los diferentes casos.



De la representación de las presiones se puede observar como en el caso 2 se da la mayor presión de entrada con unos 127502Pa. Esta gran presión de entrada es debida a que como el flujo es subsónico, la información viaja aguas arriba. Por lo tanto, cuando hay parada del fluido, la energía cinética pasa a una sobrepresión que se ve repercutidas aguas arriba. Por el contrario, en el caso 3 la presión de entrada es mucho menor que en el resto de los casos, debido a que el estrechamiento es más progresivo, por lo que no hay una parada del flujo tan radical por lo que la energía cinética que pasa a una sobrepresión es menor.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

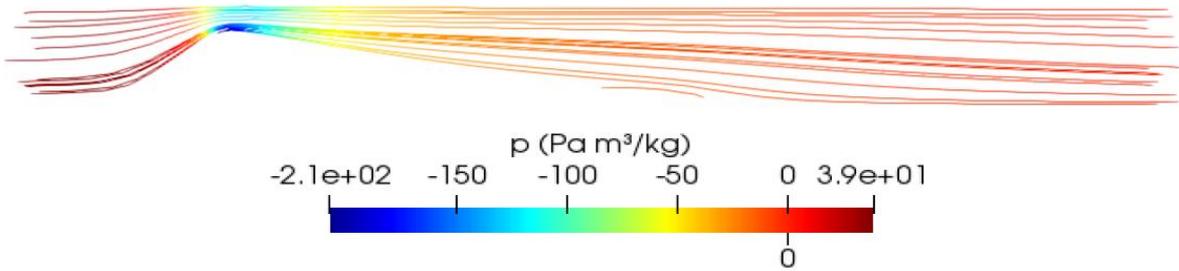


Figura 43. Representación líneas de corriente de presión caso 1.

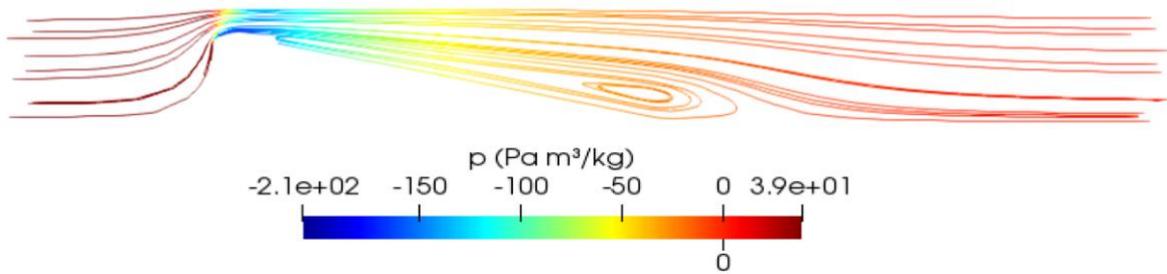


Figura 44. Representación líneas de corriente de presión caso 2.

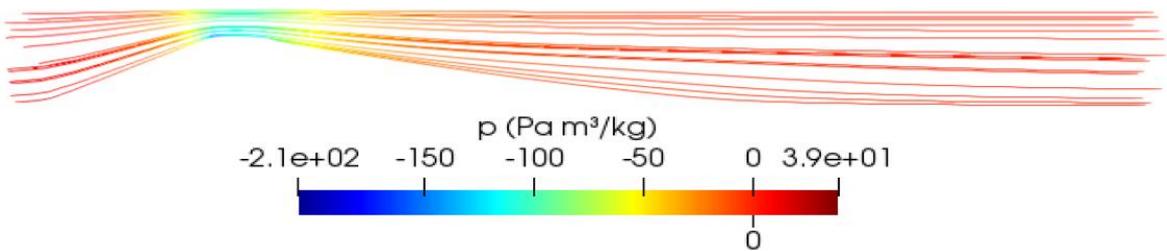


Figura 45. Representación líneas de corriente de presión caso 3.

Como ya se ha explicado anteriormente, el despegue del flujo es sinónimo de depresión, y cuanto menos hidrodinámico es un perfil, más despegue se produce y por tanto más depresión existe. Tras analizar la representación de líneas de corriente, se puede ver como el mayor despegue de flujo se produce en el caso 2. Esto se debe a que el caso 2 tiene un cambio de sección radical con un ángulo de 90 grados, por tanto, el contorno no presenta ningún paralelismo con las líneas de corriente. Es decir, es el perfil menos hidrodinámico de los tres casos y en consecuencia, el que presenta mayor despegue de flujo y mayor depresión. Por lo contrario, en el caso 3, el casi paralelo a las líneas de corriente y por tanto es un perfil más hidrodinámico, de manera que prácticamente no se aprecia despegue de flujo y una depresión mucho menor.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

4.2.2 Cálculo y comparación de pérdidas

En el siguiente apartado se muestra el cálculo de las pérdidas del caso 2 y 3 y se comparan con las pérdidas ya calculadas del caso 1.

4.2.2.1 Cálculo pérdidas caso 2 y caso 3

Como se ha hecho anteriormente, se cogen los datos del punto $x=0$ m y $x=0.8$ m. Para obtener un resultado más realista se cogen varios puntos a lo largo del eje y, y se trabaja con un dato promedio.

Los diferentes valores para el caso 2 son:

x (m)	v(m/s)	p (Pa)
0	4,707	127520
0	4,707	127570
0	4,707	127690
0	4,707	127810
0	4,707	129080
0,8	5,4051	0
0,8	5,013	0
0,8	4,09	0
0,8	3,68	0
0,8	3,037	0

Tabla 15. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo caso 2

A continuación, se muestra el promedio de estos valores para $x=0$ m y para $x=0,8$ m

x(m)	p(Pa)	v(m/s)
0	127934	4,707
0,8	0	4,245

Tabla 16. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo caso 2

$$\frac{127934}{9810} + z + \frac{(4,707)^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{0}{9810} + z + \frac{(4,245)^2}{2 \cdot 9,81} + \sum h$$

$$\sum h = 13,25 \text{ m}$$

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Los diferentes valores para el caso 2 son:

x (m)	v(m/s)	p (Pa)
0	4,707	7000
0	4,707	7636
0	4,707	8355
0	4,707	10158
0	4,707	11072
0,8	6,029	0
0,8	6,02	0
0,8	5,919	0
0,8	5	0
0,8	4,321	0

Tabla 17. Valores de presión y velocidad al principio y final del tubo caso 3

A continuación, se muestra el promedio de estos valores para x=0m y para x=0,8m

x(m)	p(Pa)	v(m/s)
0	8844,2	4,707
0,8	0	5,4578

Tabla 18. Resultados de velocidad y presión en dos puntos del tubo caso 3.

$$\frac{8844,2}{9810} + z + \frac{(4,707)^2}{2 \cdot 9,81} = \frac{0}{9810} + z + \frac{(5,4578)^2}{2 \cdot 9,81} + \sum h$$

$$\sum h = 0,512 \text{ m}$$

4.2.2.2. Comparación pérdidas

En la 19 se puede ver las diferentes pérdidas de los tres casos.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$\sum h$	3,04 m	13,25 m	0,512 m

Tabla 19. Resultados de las pérdidas de los tres casos.

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Como se observa en la tabla, las pérdidas están muy relacionadas con la presión y la velocidad. Sobre todo, en el caso 2, hay mucha diferencia de presión de la entrada y de la salida, debido a que el estrechamiento es mucho más significativo hay unas pérdidas mucho mayores. Sin embargo, en el caso 3, la diferencia de presión es mucho menor, y el estrechamiento más gradual las pérdidas son mucho menores. El caso 1, continúa siendo el caso intermedio. Son unos datos que se podían prever, ya que cuánto más acentuado y drástico sea el estrechamiento como en el caso 2, mayor es la parada del flujo y por tanto más pérdidas van a haber. Sin embargo, en el caso 3 al ser un estrechamiento mucho más gradual hace que esas pérdidas localizadas sean menores.

4.2.3. Comparación de la región susceptible a sufrir cavitación.

Con las siguientes imágenes se compara la zona susceptible a sufrir cavitación en cada caso.

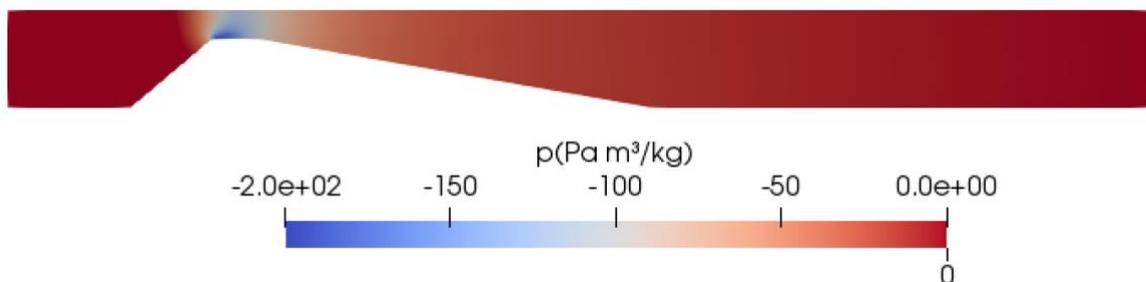


Figura 46. Región susceptible a sufrir a cavitación caso 1

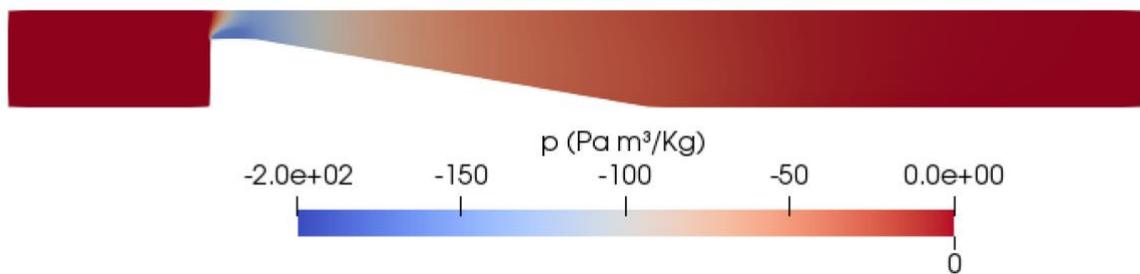


Figura 47. Región susceptible a sufrir cavitación caso 2

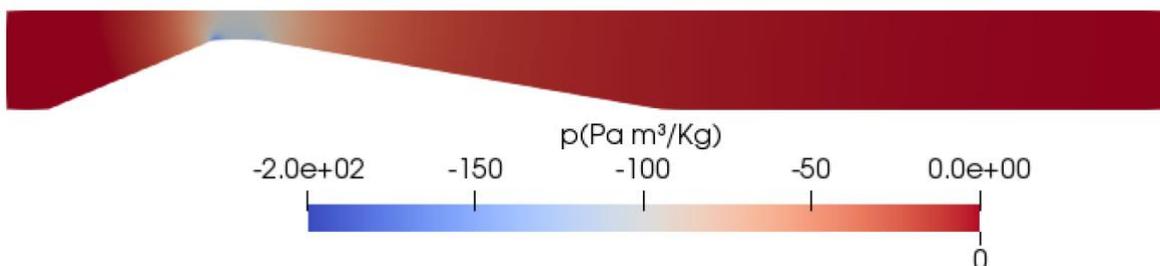


Figura 48. Región susceptible a sufrir cavitación caso 3

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Se puede ver como la zona azul (zona donde la presión es menor a la presión de vapor), es mucho más grande en el caso 2, como era de esperar. Como se ha podido ver, el caso que mayor depresión presenta es el caso 2 por ser el perfil menos hidrodinámico, y al contrario el caso 3 donde menos depresión existe.

Por tanto, la zona susceptible a sufrir cavitación es mayor en el caso 2 alcanzando presiones más bajas. Por el contrario, en el caso 3, casi donde se alcanzan presiones menos bajas, la zona susceptible a sufrir cavitación es menor.

5.CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo de final de grado ha sido el desarrollo de un modelo numérico basado en técnicas de dinámicas de fluidos computacional (CFD) que permita la caracterización en un tubo Venturi perteneciente a una instalación industrial. En esta instalación industrial se pretende garantizar la disolución de una sustancia en agua.

En este trabajo se ha utilizado un tipo de malla estructurada, adaptativa y uniforme y un modelo de cierre de turbulencia RANS RNG k- ϵ , de amplia aplicación en el ámbito ingenieril. Se han simulado cuatro mallas de diferente tamaño y se ha hecho el conveniente análisis de convergencia de malla para elegir finalmente el tamaño de malla adecuado. En este caso, se ha elegido la malla más fina con un tiempo de simulación menor a 3 horas.

Una vez con la malla final simulada se ha pasado a visualizar y analizar los resultados con ParaView. Finalmente, se ha repetido el proceso con dos geometrías de tubo diferentes, para poder analizarlos y compararlos entre si.

Debido a que el principal objetivo es conseguir la disolución de una sustancia en agua, lo ideal es que el dispositivo cavite al máximo posible. Como se han podido ver en los resultados, con la geometría del caso inicial, ya se estaría consiguiendo esta cavitación. Viendo los resultados del caso 2 y del caso 3, se observa que una buena alternativa de mejora sería cambiar la geometría inicial a la geometría correspondiente al caso 2. De esta forma, se conseguiría una mayor zona de cavitación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Francisco Javier A de la C, Cabrera Rocher E, Cobacho Jordán R, Gómez Sellés E, Soriano Olivares J. Apuntes de mecánica de fluidos [Internet]. 2017th ed. València UP de, editor. Valencia; Available from: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/78258/PDF-Arregui%3BCabrera%3BCobacho - Apuntes de mecánica de fluidos.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
2. García-Prats A, Cobacho-Jordán R. Fundamentos de mecánica de fluidos [Internet]. 2012th ed. Politècnica EU, editor. Valencia; Available from: https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/70729/TOC_0318_05_01.pdf?sequence=5&isAllowed=y
3. Pitot Tube [Internet]. Available from: http://www.speedace.info/pitot_tube.htm
4. Martín Diego A. Apuntes de Mecánica de Fluidos [Internet]. Available from: <http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>
5. Nahid V. Dinámica de los fluidos reales [Internet]. Available from: http://www.edutecne.utn.edu.ar/guias_de_estudio/dinamica_fluidos_reales.pdf
6. Ortega HAro RA. Diseño construcción y operación de un banco hidráulico y venturímetro para pruebas hidráulicas [Internet]. Universidad Central del Ecuador; 2013. Available from: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/1123/1/T-UCE-0011-35.pdf>
7. Efecto Venturi. Física termodinámica. [Internet]. Available from: <https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/marco-teorico/efecto-venturi/>
8. Cristobal Perez S. Diagrama descriptivo del tubo Venturi [Internet]. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Diagrama-descriptivo-del-tubo-Venturi_fig4_328080878
9. Conocimientos básicos cavitación [Internet]. Available from: https://www.gunt.de/images/download/cavitation-in-pumps_spanish.pdf
10. Gómez Meléndez KA, González Locarno MC, Vega González LP, Zambrano Jiménez LE. Presión de vapor de un líquido [Internet]. Puerto Colombia; 2015. Available from: https://www.academia.edu/18882461/Presión_de_vapor_corregido
11. Presión de vapor [Internet]. Available from: <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Liquid3/node6.html>
12. Sara FC. Validación del modelo SPH para problemas de ingeniería [Internet]. Vigo; 2014. Available from: https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/04/TFG_Sara_Ferreiro.pdf
13. Estruch Francés R. Desarrollo de una metodología de análisis del microemplazamiento de parques eólicos mediante técnicas CFD. [Internet]. Univesidad Politècnica de Valencia; Available from: https://ephyslab.uvigo.es/wp-content/uploads/2019/04/TFG_Sara_Ferreiro.pdfisAllowed=y
14. ¿Cual es la diferencia entre SPH o CEL y CFD en abaqus? [Internet]. Available from: <https://www.4realsim.com/es/cual-es-la-diferencia-entre-los-metodos-sph-o-cel-y-cfd-en-abaqus/>
15. García Hevia B. Validación y estudio comparativo de metodología CFD aplicada a emplazamientos eólicos reales. [Internet]. Universidad de Oviedo; 2015. Available from:

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi mediante técnicas CFD

- https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK Ewje1aLewfzpAhV0QkEAHcDoDa8QFjAAegQIBRAB&url=http%3A%2F%2Fdigibuo.u niovi.es%2Fspace%2Fbitstream%2F10651%2F33748%2F1%2FTD_BibianaGarciaHe via.pdf&usq=AOvVaw3o3CwWUMhZQHWMJ6hgbO_Q
16. Lozano Durán A. Apuntes sobre dinámica de fluidos computacional [Internet]. 2019. Available from: <https://torroja.dmt.upm.es/media/adrian/publications/notas.pdf>
 17. Bayón Barrachina A. Apuntes de dinámica de fluidos computacional (CFD).
 18. Gómez González S. Mallado y simulación CFD de Automóvil [Internet]. Universitat Politècnica de Catalunya; 2017. Available from: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/108947/Mallado_y_simulacion_CFD_de_automovil_-_GOMEZGONZALEZsamuel.pdf
 19. Frei W. How to Identify and Resolve Singularities in the Model when Meshing [Internet]. 2013. Available from: <https://www.comsol.com/blogs/how-identify-resolve-singularities-model-meshing/>
 20. Bakker A. Lecture 7- Meshing: Applied Computational Fluid Dynamics [Internet]. Available from: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>
 21. ANEXO I: Influencia de la Calidad de Malla en las Simulaciones. Uso de condiciones de Contorno Periódicas [Internet]. Available from: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3848/fichero/Volumen+Único%252F07.ANEXO+I.pdf>
 22. González M. Flujo laminar y flujo turbulento [Internet]. 2011. Available from: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>
 23. Gradiente de Velocidad. Esfuerzo Cortante. [Internet]. Available from: http://ocwus.us.es/arquitectura-e-ingenieria/operaciones-basicas/contenidos1/tema3/pagina_05.htm
 24. OpenFOAM [Internet]. Available from: <https://www.openfoam.com/>
 25. ParaView [Internet]. Available from: <https://www.paraview.org/>
 26. Parras L, Bohórquez P. Apuntes de Mecánica de Fluidos Computacional Aplicada. Workshop 1: Introducción a OpenFOAM [Internet]. Jaen; Available from: <http://blogs.ujaen.es/prmedina/wpcontent/uploads/2014/04/workshop1.pdf>
 27. Celik IB, Ghia U, Roache PJ, Freitas CJ, Coleman H, Raad PE. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications [Internet]. Available from: <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434171>

Desarrollo de modelo numérico para la detección de cavitación en tubos Venturi
mediante técnicas CFD

II.PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

En este apartado habla del coste de este trabajo teniendo en cuenta la mano de obra, el equipo y herramientas utilizadas, así como los materiales consumibles.

1. Mano de obra

Se estima un precio de 50€/hora para un ingeniero recién titulado. Para calcular el coste de la mano de obra se utiliza la ecuación (1)

$$\text{Coste (€)} = \text{Precio} \left(\frac{\text{€}}{\text{hora}} \right) \cdot N^{\circ} \text{horas}(\text{hora}) \quad (\text{Ecuación 1})$$

En la tabla 20 se puede ver el desglose de los costes de la mano de obra.

Descripción de la tarea	Precio(€/hora)	Horas (hora)	Coste (€)
<i>Recopilación información</i>	50	60	3000
<i>Virtual Box y preparación de OpenFOAM</i>	50	20	1000
<i>Programación en OpenFOAM</i>	50	80	4000
<i>Visualización y análisis de resultados</i>	50	60	3000
<i>Redacción de la memoria</i>	50	85	4250
TOTAL		305	15250

Tabla 20.Desglose de los costes de la mano de obra

2. Costes materiales, equipo y herramientas utilizadas.

Se calcula el coste de los materiales, equipos y herramientas utilizadas según su período de amortización. Para ello se utiliza la ecuación 2.

$$\text{Coste}(\text{€}) = \frac{\text{Precio}(\text{€})}{\text{período de amortización}(\text{meses})} \cdot \text{período de uso}(\text{meses}) \quad (\text{Ecuación 2})$$

En el caso del período de amortización del hardware y el software se ha elegido 3 años, es decir 36 meses, y un tiempo de uso de 6 meses (duración de creación de este trabajo).

Materia/equipo/herramienta	Precio (€)	Tiempo de uso (meses)	Período amortización (meses)	Coste (€)
Ordenador portátil Mac Pro	1000	6	36	166,67
MacOS	100	6	36	16,67
Ubuntu	0	6	36	0
Paraview	0	6	36	0
OpenFOAM	0	6	36	0
TOTAL				183,34

Tabla 21. Desglose de los costes de material, equipo y herramientas utilizadas.

3. Presupuesto final

Mano de Obra	15250
Material, equipos, herramientas	183,34
TOTAL	15433.34

Tabla 22. Coste final