



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA
SUPERIOR INGENIEROS
INDUSTRIALES VALENCIA

TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ANÁLISIS PÉRDIDAS DE CARGA EN TUBOS VENTURI MEDIANTE TÉCNICAS CFD

AUTOR: JOSÉ MARÍA GRACIA ANDRÉS

TUTOR: ARNAU BAYÓN BARRACHINA

Curso Académico: 2017-18

AGRADECIMIENTOS

A mi madre por su cariño incondicional, paciencia y en general todo lo que ha luchado por que hoy pueda estar redactando este TFG.

A mi padre por quererme, creer en mí y apoyarme en todo.

A mi pareja por apoyarme en los momentos más complicados y no dejar de creer en mí.

A mi tutor por haberme mostrado este nuevo campo profesionalmente, y sobretodo por su tiempo, dedicación y experiencia.

A mis compañeros de facultad y de trabajo por transmitirme sus conocimientos y experiencias relacionadas con este tipo de proyectos.

RESUMEN

El presente Proyecto Final de Grado pretende abordar un novedoso método de estudio a partir de un modelo CFD implementado dentro de un software de código abierto y libre disposición denominado OpenFOAM perteneciente al Sistema Operativo Linux (Ubuntu).

El caso de estudio es un tubo Venturi real sometido a un flujo de agua horizontal, perteneciente a un laboratorio de la Universidad politécnica de Valencia, a partir del cual, modificando su geometría, se quieren conseguir unas características de presión y velocidades concretas, y para ello se crea un modelo CFD que se validará según los datos experimentales tomados a lo largo de este trabajo. Se han estudiado 6 modelos con diferente tamaño de malla. Después de simular los 6 casos, se procede a realizar un análisis de convergencia de malla, en el cual se determina el grado de convergencia de la malla sin tener en cuenta los datos experimentales. De entre las mallas convergidas se elegirá la que más se ajuste a los resultados experimentales. Dicha malla será la que utilizaremos para modificar el diseño hasta conseguir nuestro objetivo de succión, para la futura fabricación de este tubo Venturi.

ABSTRACT

The present Final Degree Project aims to address a new method of study from a CFD model implemented within open source software called OpenFOAM belonging to the Linux Operating System (Ubuntu).

The case study is a real Venturi tube, a horizontal water flow, belonging to a laboratory of the Polytechnic University of Valencia, from which, by modifying its geometry, we want to obtain specific safety and velocity characteristics, and for this a CFD model is created that will be validated according to the experimental data taken. Three models with different mesh sizes have been studied. After simulating the 3 cases, we proceed to perform a mesh convergence analysis, in which the degree of convergence of the mesh is determined without taking into account the experimental data. Among the converged meshes, the one that best matches the experimental results will be chosen. This mesh is what we will use to modify the design to achieve our objective of suction, for the future manufacture of this Venturi Tube.

ÍNDICE

DOCUMENTOS CONTENIDOS EN EL TRABAJO FINAL DE GRADO

- Memoria descriptiva
- Presupuesto

ÍNDICE DE LA MEMORIA DESCRIPTIVA

1. CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. OBJETIVO DEL DOCUMENTO.....	13
1.2. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	13
2. CAPÍTULO 2. DESARROLLO TEÓRICO.....	15
2.1. MECÁNICA DE FLUIDOS.....	15
2.1.1.Introducción.....	15
2.1.2.Ecuación de Bernoulli.....	15
2.1.3.Pérdidas de carga.....	17
2.1.3.1. Pérdidas de carga continuas.....	17
2.1.3.2. Pérdidas de carga localizadas.....	18
2.1.4.Efecto Venturi	19
2.1.5.Tubo Venturi.....	20
2.1.6.Aplicaciones industriales del tubo Venturi.....	21
2.2. DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL.....	24
2.2.1.Introducción.....	24
2.2.2.Mallado.....	26
2.2.2.1. Mallado según la relación topologica entre celdas.....	26
2.2.2.2. Mallado según la dirección de sus ejes respecto a los objetos.....	27
2.2.2.3. Mallado según la distribución de tamaños.....	27
2.2.3.Ecuaciones de flujo.....	28
2.2.4.Turbulencia.....	29
2.2.5.Funciones de pared.....	30
2.3. OpenFOAM.....	31

3. CAPÍTULO 3. DESARROLLO PRÁCTICO.....	32
3.1. MODELO NUMÉRICO.....	32
3.1.1.Introducción.....	32
3.1.2.Planteamiento del problema.....	32
3.1.3.Descripción del modelo.....	33
3.1.3.1. Definición del entorno.....	33
3.1.3.2. Entrada de datos y modelado.....	33
3.1.3.3. Proceso de Simulación.....	42
3.2. ANALISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA.....	46
3.2.1.Introducción.....	46
3.2.2.Procedimiento para la estimación del error de discretización.....	46
3.2.3.Post-procesado y calculo del error de discretización.....	49
3.2.4.Resultados.....	52
3.3. MODELO EXPERIMENTAL.....	54
3.3.1.Descripción del modelo.....	54
3.3.2.Toma de datos experimentales.....	56
4. CAPÍTULO. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
4.1. ELECCIÓN DEL MODELO FINAL.....	57
4.2. ANÁLISIS DE CAMPOS.....	59
4.3. NUEVO DISEÑO.....	61
4.3.1.Rediseño del modelo frente a especificaciones.....	61
5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	62
6. BIBLIOGRAFÍA.....	64

ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

PRESUPUESTO.....	68
1. NECESIDAD DEL PRESUPUESTO	68
2. CONTENIDO DEL PRESUPUESTO	68
2.1. Coste del personal	68
2.2. Coste de materiales	69
2.3. Material fungible	69
2.4. Costes finales	70

MEMORIA DESCRIPTIVA

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO DEL DOCUMENTO

En este trabajo final de grado se pretende abordar el estudio de un diseño hidráulico mediante técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). El caso de estudio es un tubo Venturi, del cual mediante ensayos en el laboratorio, se han conseguido los datos experimentales, ya que pertenece a la UPV, de esta manera es posible comparar los resultados obtenidos en las simulaciones con los resultados experimentales. Se estudiarán 6 modelos diferentes, en los que se variará el tamaño de la malla, tras las simulaciones se aplicará un análisis de convergencia de malla para hallar el grado de incertidumbre numérica de cada modelo. Posteriormente de las mallas resultantes del análisis de convergencia de malla haremos una comparación con los datos experimentales para comprobar cual representa mejor nuestro modelo experimental, tras dicho estudio se analizarán los resultados y explicarán que malla se debe utilizar y porqué. Una vez tengamos el modelo que más se asemeja a nuestro tubo Venturi real, procederemos a modificar su geometría para lograr unos objetivos de presión y velocidad, que no son posibles con la geometría del tubo Venturi del que disponemos.

1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Este documento está estructurado acorde a la normativa de la ETSII en cuanto a trabajos finales de grado. Dicho documento está compuesto, además de este capítulo introductorio, de desarrollo teórico, desarrollo práctico, análisis de resultados, conclusiones y trabajos futuros y de la bibliografía utilizada.

En el desarrollo teórico se abordan los aspectos fundamentales que explican y dan sentido a la parte práctica. Comenzando con una breve introducción a la hidráulica y las principales leyes que aplican a este trabajo final de grado, y explicando brevemente los conceptos e ideas básicas para una correcta utilización de las técnicas de Dinámica de fluidos Computacional (CFD). Por último se hace una breve mención a los modelos estadísticos que se utilizarán en la parte práctica.

En cuanto al desarrollo práctico, se explica el método utilizado para obtener el modelo de malla convergida que mejor se adapte a los datos experimentales y por tanto al caso de estudio. Primero se explica cómo se ha llegado al diseño del modelo a simular, a partir de un diseño inicial realizado en Autocad, y un mallado realizado en OpenFOAM (software con el que se resolverá el trabajo). Una vez simulados los casos se aplicará un análisis de convergencia de malla, para garantizar que la malla converge según el tamaño de malla y cuantificar qué modelo presenta menor incertidumbre. Dicho análisis se hace sin tener en cuenta los datos experimentales, y sirve para tener en cuenta que modelos se van a utilizar en el análisis estadístico. En dichos análisis se analiza qué modelo representa mejor el caso de estudio. Tras

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

analizar campos de velocidades y presiones de nuestro mejor modelo con el caso real, pasamos al último paso, modificar la geometría del tubo Venturi, y simulando con el modelo obtenido del análisis estadístico lograr unas objetivos de presión determinados.

Finalmente, en el apartado Conclusiones y trabajos futuros, se realiza un cierre al trabajo en el que se destacan los puntos más importantes y significativos que se han ido desarrollado.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO TEÓRICO

2.1 MECÁNICA DE FLUIDOS

2.1.1 Introducción

La mecánica de fluidos es una rama dentro de la física que se centra en el estudio del comportamiento de gases y líquidos en función de sus propiedades específicas. Es decir, se centra en el estudio de las propiedades mecánicas de gases y líquidos dependiendo de las fuerzas a las que son sometidos. Todo esto es dependiente de las fuerzas que se interponen con la masa y a las condiciones a las que están sometidos dichos gases o fluidos, relacionadas con la viscosidad de estos.^[1]

Nuestro caso de estudio es un líquido incompresible (agua), el cual está dominado por diversas leyes que veremos a continuación.

2.1.2 Ecuación de Bernoulli

En la dinámica de fluidos, el principio de Bernoulli, o también denominado ecuación de Bernoulli o trinomio de Bernoulli, se centra en describir el comportamiento de un líquido que se mueve a lo largo de una corriente de agua y sustenta que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) con un régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido^[2], como podemos observar en la siguiente figura 2.1.

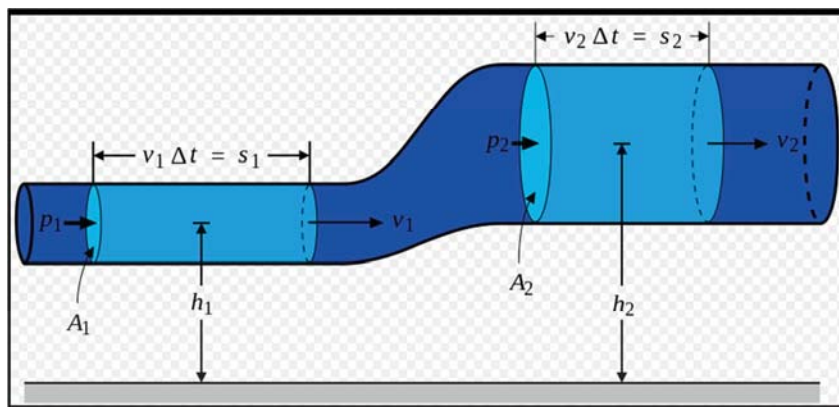


Figura 2.1. Esquema del principio de Bernoulli en un fluido.^[3]

Para entender dicha definición conviene explicar de qué componentes consta la energía de un fluido, como vemos en la siguiente ecuación 2.1:

$$\begin{array}{c} \text{Altura cinemática} \\ \underbrace{\frac{V^2}{2g}} \end{array} + \begin{array}{c} \text{Altura piezométrica} \\ \underbrace{\frac{P}{\gamma} + Z}_{\text{Altura de presión}} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Altura hidráulica} \\ \underbrace{H} \end{array} \quad \text{Ec. 2.1.}$$

Donde:

- V = es la velocidad del fluido en la sección considerada.
- $\gamma = \rho g$ = es el peso específico. Este valor se asume constante a través del recorrido al ser un fluido incompresible.
- P = es la presión a lo largo de una línea de corriente.
- g = es la aceleración gravitatoria
- z = es la altura en la dirección de la gravedad desde una cota de referencia.

Para aplicar la ecuación se deben realizar los siguientes supuestos:

- Viscosidad (fricción interna) = 0. Es decir, considerando que la línea de corriente sobre la cual se aplica la ecuación se encuentra en una zona 'no viscosa' del fluido.
- Un caudal constante.
- Flujo incompresible, donde ρ es constante.
- La ecuación se aplica a lo largo de una línea de corriente o en un flujo laminar.

Un ejemplo de aplicación del principio se da en el flujo de agua en tubería, como se aprecia en la figura 2.2.

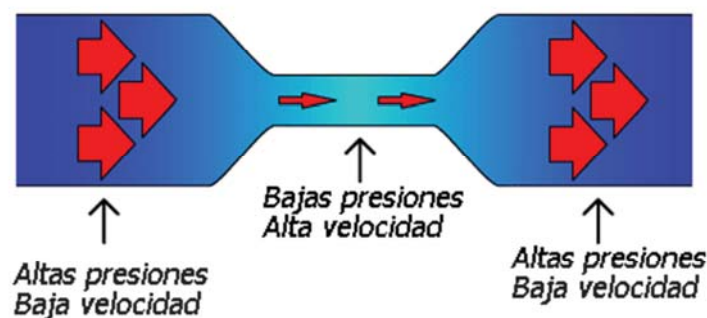


Figura 2.2. Relación presiones-velocidades en una tubería debido al principio de Bernoulli.

2.1.3 Pérdidas de carga

La pérdida de carga en una tubería o canal son las pérdidas de presión que se producen en un fluido debido a la fricción ejercida por las partículas del fluido entre sí y contra las paredes de la tubería que las conduce. Las pérdidas se pueden clasificar en continuas, a lo largo de conductos regulares, o accidentales o localizadas, debido a circunstancias particulares, como por ejemplo un estrechamiento, un cambio de dirección, la presencia de una válvula, etc. [4]

La ecuación general de Bernoulli entre 2 puntos de una misma tubería, teniendo en cuenta las pérdidas de carga, queda de la siguiente manera (Ecuación 2.2):

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum \lambda \quad \text{Ec. 2.2.}$$

Donde:

$\sum \lambda$ = Sumatorio de pérdidas de carga

2.1.3.1 Pérdidas de carga continuas

También llamadas pérdidas de carga en un conducto rectilíneo o pérdidas primarias, son pérdidas de carga debidas a la fricción del fluido contra sí mismo y contra las paredes de la tubería rectilínea.

Existen diversos métodos, obtenidos empíricamente, para poder calcular la pérdida de carga a lo largo de tuberías y canales abiertos, por ejemplo la Ecuación de Darcy-Weisbach (Ec. 2.3):

$$h_f = f \times \frac{L}{D} \times \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 2.3.}$$

Donde:

L: longitud de tubería

D: diámetro de tubería

V: velocidad del fluido que recorre la tubería

f: factor de fricción o coeficiente de resistencia de Darcy-Weisbach (f) es un parámetro adimensional utilizado en dinámica de fluidos que se utiliza para calcular la pérdida de carga en una tubería debido a la fricción.

El cálculo del factor de fricción y la influencia de dos parámetros (número de Reynolds, Re y rugosidad relativa, ϵ_r) depende del régimen de flujo.

La siguiente tabla 2.1 indica como calcular el factor de fricción en función del régimen del flujo:

Régimen	Coefficiente de fricción	Dependencia
Laminar	$f_{laminar} = \frac{64}{Re}$	$f_{laminar} = f(Re)$
Turbulento liso	$f_{turb\ liso} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log\left(\frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)$	$f_{turbulento\ liso} = f(Re)$
Turbulento intermedio	$f_{turb\ medio} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \times \log\left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\epsilon_r^{1,11}}{3,7}\right)\right)$	$f_{turb\ medio} = f(Re, \epsilon_r)$
Turbulento rugoso	$f_{turbulento\ rugoso} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \times \log\left(\frac{\epsilon_r}{Re}\right)$	$f_{turbulento\ rugoso} = f(\epsilon_r)$

Tabla 2.1. Factor de fricción según el régimen del flujo.

2.1.3.2 Pérdidas de carga localizadas

Las pérdidas de carga localizadas son las pérdidas de carga debidas a elementos singulares de la tubería tales como codos, estrechamientos, válvulas, etc.

Las pérdidas localizadas se expresan como una fracción o un múltiplo de la llamada "altura de velocidad" de la forma que indica la siguiente ecuación 2.4:

$$h_v = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde:

h_v = pérdida de carga localizada;

V = velocidad media del agua, antes o después del punto singular, conforme el caso;

K = Coeficiente determinado en forma empírica para cada tipo de punto singular.

2.1.4 Efecto Venturi

El efecto Venturi consiste en un fenómeno en el cual un fluido en movimiento circulando dentro de un conducto cerrado disminuye su presión cuando aumenta la velocidad al pasar por una zona de sección menor. En algunas ocasiones, cuando el aumento de velocidad es muy elevado, se llegan a alcanzar presiones negativas y entonces, si en este mismo punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido de este conducto, el cual se mezclará con el fluido que circula por el primer conducto. Este efecto, demostrado en 1797, recibe su nombre del físico italiano Giovanni Battista Venturi (1746-1822) ^[5], en la siguiente figura 2.3 podemos observar un ejemplo:

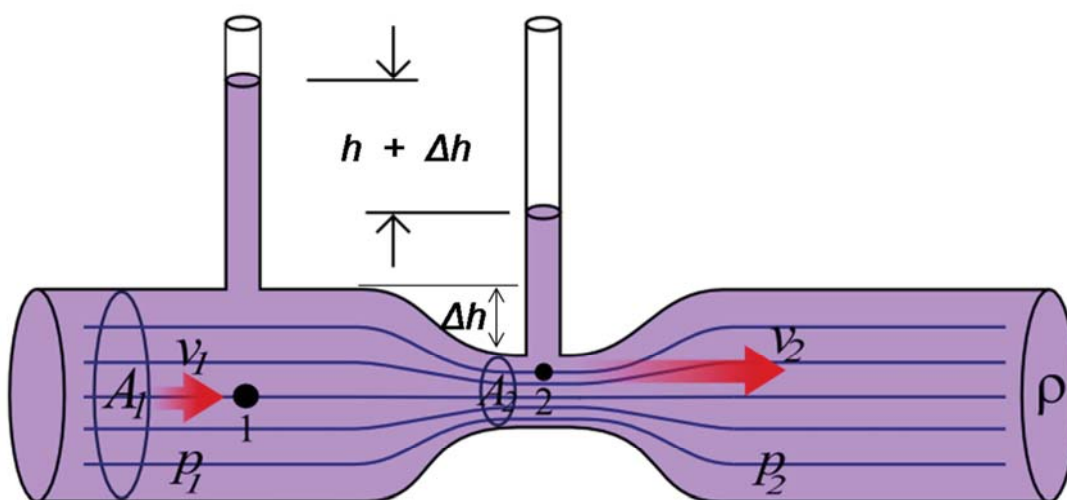


Figura 2.3 Representación de un tubo Venturi. ^[6]

El efecto Venturi se explica por el Principio de Bernoulli, de tal manera que si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta tras atravesar esta sección, y por tanto, si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente, como podemos observar en la siguiente ecuación 2.5.

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec.2.5}$$

2.1.5 Tubo Venturi

Un tubo Venturi es un dispositivo que inicialmente se diseñó para medir la velocidad de un fluido aprovechando el efecto Venturi explicado anteriormente. Pues, conocida la velocidad antes del estrechamiento y midiendo la diferencia de presiones, se halla fácilmente la velocidad en el punto problema. (Figura 2.3)

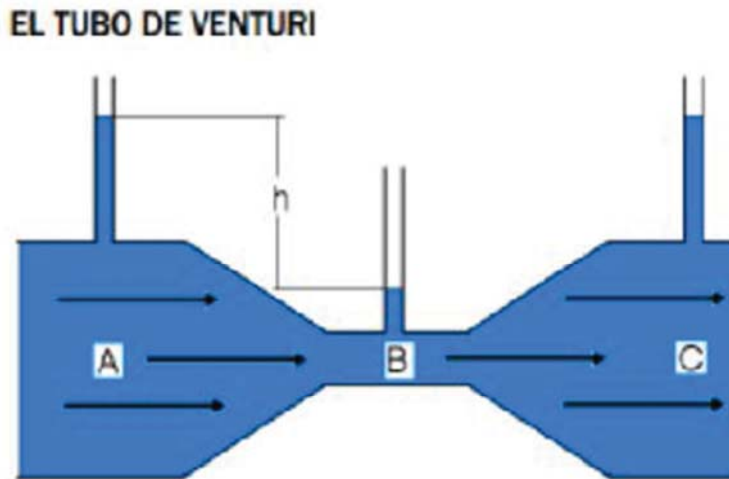


Figura 2.3 Representación de un tubo Venturi.

La aplicación clásica para la medida de la velocidad de un fluido consiste básicamente en un tubo formado por dos secciones cónicas, las cuales están unidas por un tubo estrecho en el cual el fluido se desplaza a una mayor velocidad. Posteriormente, la presión en el tubo Venturi es posible medirla conectando un tubo vertical en forma de U desde la región ancha hasta la canalización estrecha. La diferencia de las alturas del líquido en el tramo del tubo en U permite medir la presión en ambos puntos y por tanto la velocidad.

Un fenómeno a tener en cuenta cuando utilizamos un tubo Venturi es el denominado cavitación. Este fenómeno puede llegar a ocurrir si la presión en alguna de las secciones del tubo es inferior a la presión de vapor del fluido. Para el tubo en cuestión (figura 2.3), donde se produce un mayor riesgo de cavitación es en la garganta del mismo, ya que aquí, al minimizarse el área y maximizarse la velocidad, la presión obtenida es la menor que se puede encontrar en dicho tubo. Cuando ocurre este fenómeno de cavitación, se generan burbujas localmente, que se van trasladando a lo largo del tubo. Si estas burbujas alcanzan zonas de presión más elevadas, pueden colapsar produciendo así picos de presión local aumentando el riesgo potencial de dañar las paredes del tubo.

En el presente trabajo final de grado, se asume, que no va a existir riesgo de cavitación, ya que se trabaja a presiones bastante más elevadas que la de vapor del líquido.

2.1.6 Aplicaciones industriales del tubo Venturi

Uno de los principales motivos de la elección de este trabajo final de grado, es la gran variedad de aplicaciones que aportan los tubos Venturi en el ámbito industrial, y de los que muchos podríamos desconocer, por lo que se va a hacer una breve descripción de las principales aplicaciones industriales de los tubos Venturi:

Medidores de velocidad: medida de velocidad de fluidos en conducciones y aceleración de fluidos utilizando tubos venturi.

Hidráulica: la depresión generada en un estrechamiento al aumentar la velocidad del fluido, se utiliza frecuentemente para la fabricación de máquinas que proporcionan aditivos en una conducción hidráulica. Es muy frecuente la utilización de este efecto "Venturi" en los mezcladores del tipo Z para añadir espumígeno en una conducción de agua para la extinción.

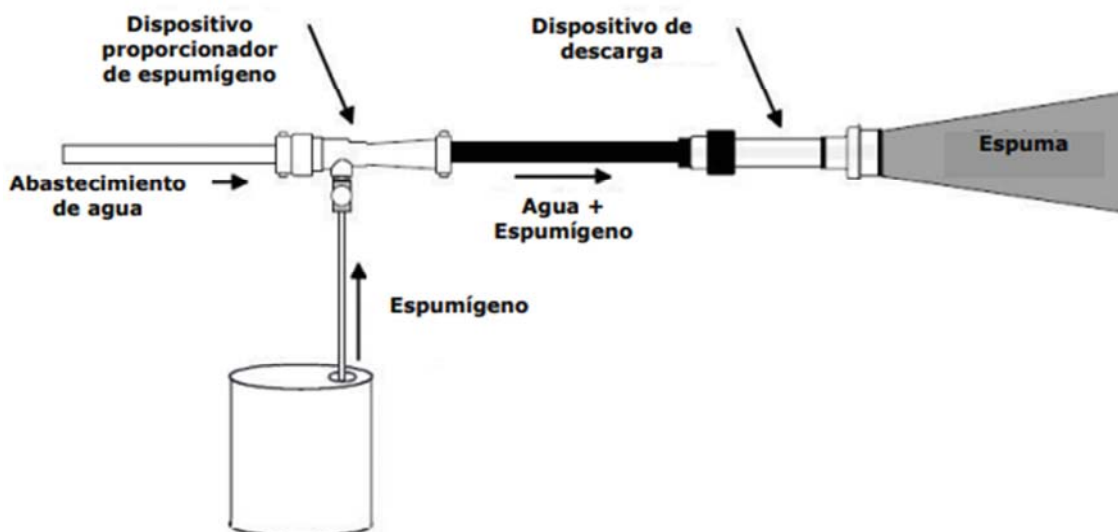


Figura 2.4. Sistema de generación de espuma por inductor de tipo Venturi.^[7]

Petróleo: la succión o depresión que ocasiona el cambio de área generada por el efecto Venturi, se usa para extraer artificialmente fluidos de pozos petroleros; este tipo de bombas Jet funcionan mediante la inyección de un fluido a alta presión pasando por una sección reducida, llamada boquilla donde se produce un cambio de energía potencial a cinética, originado a la salida de una boquilla, lo que provoca una succión del fluido de formación. Estos fluidos entran en otra zona que ocasiona el efecto inverso llamada garganta, luego la mezcla de fluidos sufre un cambio de energía cinética a potencial a la entrada de un área de expansión llamada difusor, donde la energía potencial es la responsable de llevar el fluido hasta la superficie.

Hogar: en los equipos ozonizadores de agua, se utiliza un pequeño tubo de Venturi para efectuar una succión del ozono que se produce en un depósito de vidrio, y así mezclarlo con el flujo de agua que va saliendo del equipo con la idea de destruir las posibles bacterias patógenas y de desactivar los virus y otros microorganismos que no son sensibles a la desinfección con cloro (Figura 2.7)

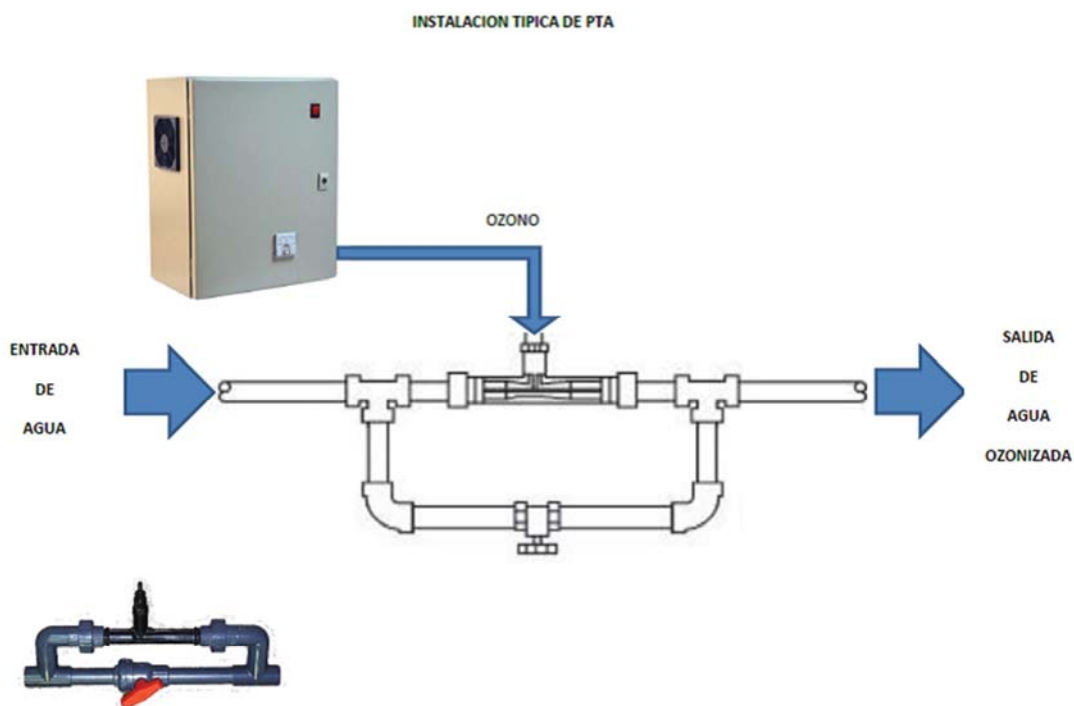


Figura 2.7. Esquema de tubo Venturi en un equipo ozonizador de agua. [10]

Acuarofilia: en las tomas de bombas de agua o filtros, el efecto Venturi se utiliza para la inyección de aire y/o CO₂.

Neumología: el efecto Venturi se utiliza en máscaras para la administración de concentraciones exactas de oxígeno; se denominan máscaras de Venturi o Ventimask. El O₂ con una concentración del 100% suministrado durante cierto periodo de tiempo es tóxico, por lo que se mezcla con aire externo cuya concentración de oxígeno es del 21%, de modo que en función de la cantidad de aire que se mezcle con el oxígeno al 100%, la concentración de oxígeno será mayor o menor, normalmente se suministra entre un 26%-50%. El oxígeno puro al pasar por el conducto con un calibre menor, produce el efecto Venturi, se genera una presión negativa que permite la entrada del aire procedente del exterior a través de unos orificios circundantes: dependiendo del tamaño de los orificios, entrará más o menos aire y por tanto menor o mayor concentración de oxígeno que finalmente el paciente recibirá (Figura 2.8).

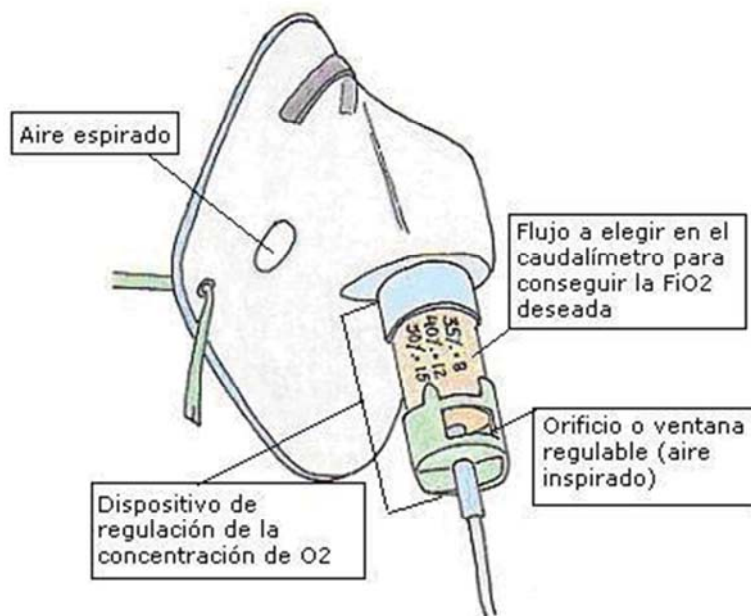


Figura 2.8. Esquema de una máscara Venturi. [11]

Odontología: el sistema de aspiración de saliva en los equipos dentales antiguos utilizaba tubos finos de Venturi. Ahora la aspiración está motorizada.

2.2 DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

2.2.1 Introducción

Debido al avance y a las tecnologías informáticas desarrolladas en los últimos años, se han podido mejorar muchas de las técnicas de análisis en los diferentes sectores. Un ejemplo de estos avances lo podemos encontrar en los análisis de flujo de los diferentes fluidos gracias a las técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics).

La caracterización del movimiento de los fluidos es posible describirla gracias a las ecuaciones de Navier-Stokes (Ecuaciones 2.6 y 2.7 respectivamente). Dichas ecuaciones no disponen de solución analítica, en algunos casos muy concretos puede haber excepción, por lo cual, comprender la situación exacta en que se encuentra un fluido resulta muy difícil de entender. Es por esto que dichas fórmulas han necesitado de modelos numéricos y experimentales para poder obtener resultados con certeza.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{V}) \quad \text{Ec 2.6}$$

$$\rho(\vec{A} - \vec{X}) = -\nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \times \vec{V}) + \mu \Delta \vec{V} \quad \text{Ec 2.6}$$

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Hace tan solo unos años el procedimiento con el que se trabajaba era realizando modelos experimentales a escala reducida del objeto en estudio e introduciéndolos, ya sea, en túneles de viento o de agua. A día de hoy, aunque en ciertos sectores se sigan utilizando, se ha reducido su uso debido a su elevado coste, tanto económicamente como de tiempo frente al uso de técnicas de dinámica de fluidos computacional.

Se define CFD como “la técnica que permite predecir el flujo de fluidos, su transferencia de masa, energía y cantidad de movimiento, sus reacciones químicas y los fenómenos relacionados mediante la resolución de las ecuaciones matemáticas que gobiernan estos procesos con la ayuda de un método numérico determinístico a partir de una malla en la zona del dominio actualizado. Este tipo de modelo tiene un enfoque euleriano y está basado en la discretización del medio continuo” (Figura 2.9).^[12,13]

Existe otro tipo diferente de modelado numérico tridimensional denominado SPH. En el cual no se utiliza malla y tiene un enfoque lagrangiano, donde el análisis en lugar de centrarse en un volumen de control fijado en el espacio de manera permanente, está más encaminado al estudio del movimiento de las partículas. Estos modelos suelen resultar más ventajosos cuando coexisten varios fluidos, cuando el comportamiento de la fase dispersa es irrelevante. (Figura 2.10).^[14]

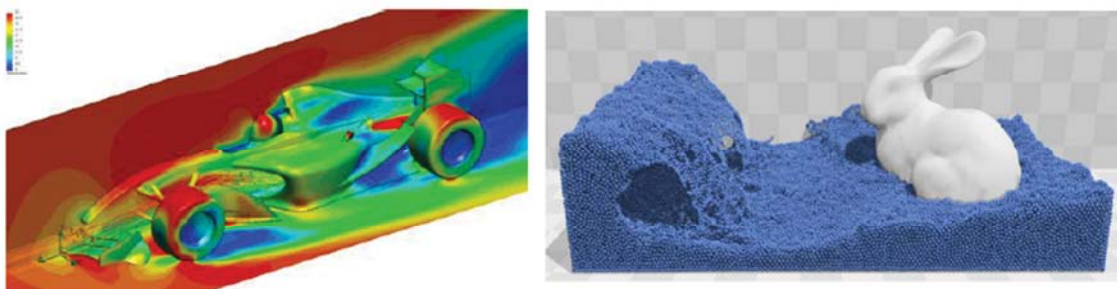


Figura 2.9 y 2.10. Representación gráfica de un modelo CFD (izquierda) y un modelo SPH (derecha).^[15,16]

Estas técnicas ofrecen muchas posibilidades de estudio dentro de la ingeniería. Ya sea a la hora de desarrollar nuevos productos, como a la hora de resolver ciertos problemas o complementar experimentos o ensayos (con lo que se permite reducir el tiempo de trabajo que requiera el uso de laboratorio). Las empresas en la que destaca la utilización de este tipo de técnicas son, la aeroespacial, la marina, la de automoción, la industria del acero, la electrónica, o también la industria química, biomédica y la de generación de energía.

En este caso de estudio, lo que se ha pretendido es utilizar dicha herramienta de trabajo como método para diseñar un tubo Venturi que cumpla las especificaciones técnicas requeridas. A partir de aquí, se exponen y describen los múltiples aspectos que se han tenido en cuenta para el modelo CFD antes de la selección de los más óptimos para el caso de estudio requerido.

2.2.2 Mallado

Para poder calcular y analizar cómo fluye el fluido por el elemento en estudio se ha de establecer la región a estudiar y una discretización específica de la geometría que va a permitir al programa que haga iteraciones sobre cada una de las celdas resultantes. La técnica con la cual se discretiza espacialmente el elemento a estudiar se denomina *mallado*.

El mallado consiste en seleccionar, de entre las múltiples formas en las que se puede dividir el objeto en estudio, la más adecuada que nos permita obtener una solución precisa y con un tiempo de cálculo computacional razonable. Para lo cual existen diferentes formas para realizar el mallado. En el caso de estudio de este trabajo final de grado se va a trabajar con una malla estructurada, no adaptativa y uniforme. Los siguientes subapartados hacen referencia a las clasificaciones más importantes. [17]

2.2.2.1 Mallado según la relación topológica entre celdas

Esta clasificación depende de si las celdas y los nodos tienen un patrón de conectividad ortogonal entre ellos mismos o no. Dentro de esta categoría se pueden clasificar en mallas estructuradas, no estructuradas e híbridas. En la figura 2.11 se muestra una representación de estos 3 tipos de malla que se explican a continuación.

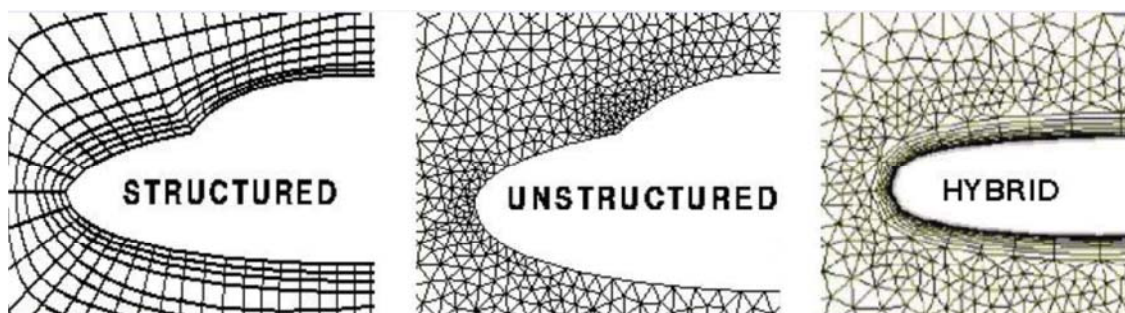


Figura 2.11. Malla estructurada, no estructurada e híbrida. [18]

En cuanto a las mallas estructuradas, son aquellas en las que la conectividad entre sus celdas es regular. Además el acceso a la información por parte del modelo suele ser más rápido y los tiempos de cálculo son menores a igualdad de otras condiciones. [19]

Respecto a las no estructuradas, son las mallas que no presentan una conectividad regular, sino que son irregulares, es decir, no siguen un patrón claro de conectividad. Este tipo de malla, pese a ser más lenta y dar tiempos de cálculo mayores, se utiliza con aquellos casos en los que la geometría en estudio sea irregular y compleja ya que, la generación de una malla estructurada que se adapte bien a una forma irregular puede ser muy complicado. [20]

Por último, también existe un tipo de malla que une las ventajas de ambas, la denominada malla híbrida. En la cual se combinan zonas de malla estructurada con zonas de malla no estructurada para adaptarla según los requerimientos del modelo. [21]

2.2.2.2 *Mallado según la dirección de sus ejes respecto a los objetos*

Este es otro tipo de clasificación para las mallas. La principal característica de este tipo de mallado es su adaptación o no al contorno del objeto en estudio. Existen 2 tipos: adaptativas y no adaptativas.

Las mallas **adaptativas**, se denominan así porque se adaptan a la superficie del cuerpo en estudio. En estas no se aprecia un orden en sus nodos y los ejes de la malla se adaptan a los contornos sólidos del objeto de estudio. En la figura 2.12 (izquierda) podemos observar una malla adaptativa.

En las mallas **no adaptativas** tan sólo hay un pequeño ajuste a la superficie o volumen de control en las zonas más cercanas del objeto. En la derecha de la figura 2.13 podemos observar una malla no adaptativa.

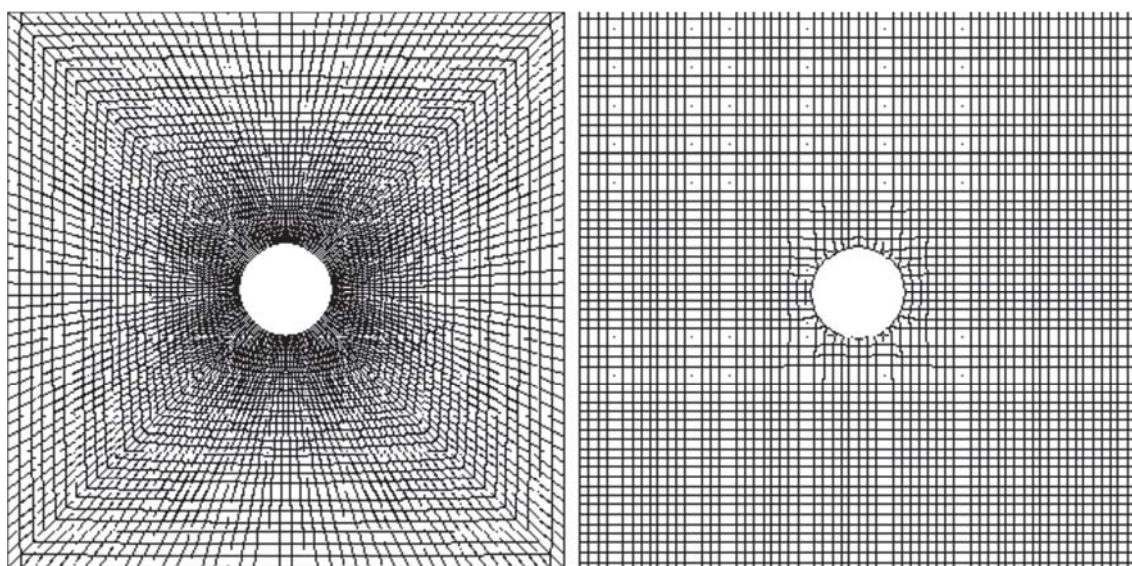


Figura 2.12 y 2.13. Mallas adaptativa y no adaptativa [22]

2.2.2.3 *Mallado según la distribución de tamaños*

Otra variación más dentro de la clasificación de mallas, se encuentra la que clasifica las mallas según su relación de tamaños. Hay mallados que te permiten poder adaptar la malla ante un cambio en las propiedades, para grandes gradientes e incluso para reducir tiempos de cálculo en aquellas zonas menos importantes. Se pueden clasificar en mallas uniformes y refinadas.

Las mallas uniformes son aquellas en que su tamaño de malla varía, mientras las refinadas pueden disminuir o aumentar su tamaño en algunas zonas para, como se ha comentado anteriormente, disminuir el tiempo de cálculo o mejorar en la precisión de resultados. En la figura 2.14 se observan la malla uniforme (izquierda) y refinada (derecha).

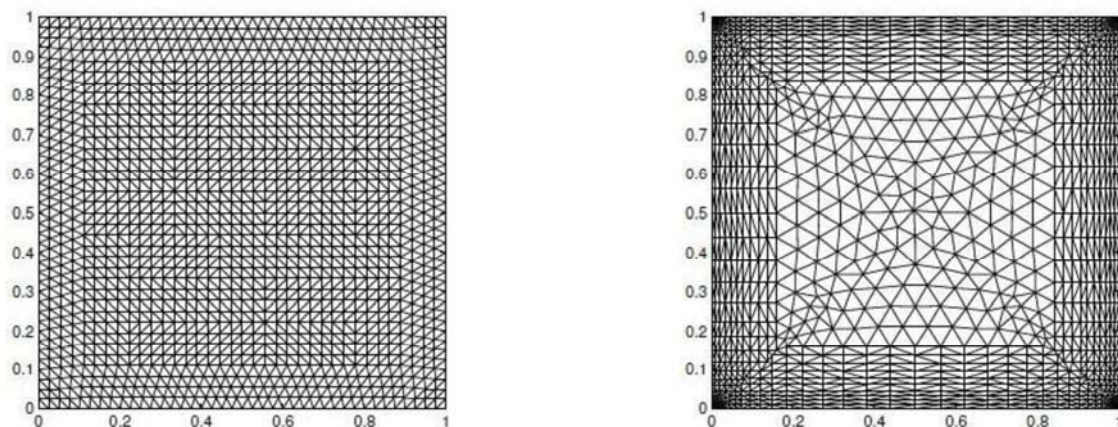


Figura 2.14. Mallas uniforme y refinada [23]

2.2.3 Ecuaciones de flujo.

Las ecuaciones que controlan y permiten la resolución de los modelos CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, como ya se había introducido en el apartado 2.2.1 de este TFG (ecuaciones 2.6 y 2.7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{V}) \quad \text{Ec 2.6}$$

$$\rho(\vec{A} - \vec{X}) = -\nabla p + \frac{1}{3} \mu \nabla (\nabla \times \vec{V}) + \mu \Delta \vec{V} \quad \text{Ec 2.7}$$

Ambas ecuaciones son ecuaciones fundamentales en la dinámica diferencial de fluidos.

Por un lado tenemos la ecuación 2.6, denominada balance de masa o ecuación de continuidad. Lo que aporta esta ecuación es imponer que la materia es un invariante y que para ello se debe igualar a cero la suma de la variación de la masa en el interior del volumen seleccionado más el flujo de masa neto. Esta suma se expresa en forma diferencial en dicha ecuación 2.6.

- El término $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ es la variación local de la densidad en un punto genérico del espacio del fluido y viene representa la variación de masa por unidad de volumen en el interior del volumen de control diferencial.
- El término $\rho \vec{V}$ es el flujo unitario de masa que atraviesa una superficie elemental y por lo tanto, el término $\nabla \times (\rho \vec{V})$ viene a representar el balance del flujo másico a través de la superficie elemental que encierra el volumen diferencial.

Por otro lado, podemos observar la ecuación 2.7, el denominado balance de fuerzas o también ecuación de Navier-Stokes y de Euler. Dicha ecuación surge al plantear la ecuación fundamental de la dinámica, donde el sumatorio de todas las fuerzas que actúan sobre una masa diferencial, tanto en superficie como en volumen, es el producto de dicha masa por su aceleración. Para obtener la forma final mostrada en dicha ecuación 2.7 se usa la hipótesis de Stokes donde está relacionada la viscosidad del fluido, las causas que son las fuerzas de superficie representadas por las componentes del tensor de tensiones y los efectos que es la deformación de la partícula elemental del fluido.

- El término \vec{A} es la aceleración del fluido.
- El término $\overline{\rho X}$ es la resultante de las fuerzas exteriores por unidad de volumen.
- El término $\overline{\rho V}$ es el gradiente de presiones.
- El término $\frac{1}{3}\mu\nabla(\nabla \times \vec{V})$ son las pérdidas por disipación viscosa derivadas de la dilatación ($\nabla \times \vec{V} > 0$) o de la contracción (signo negativo). En flujos incompresibles este término es nulo.
- El término $\mu\Delta\vec{V}$ es la disipación viscosa, presente siempre en cualquier fluido real.

Para proceder poder resolver este tipo de ecuaciones se utiliza un algoritmo SIMPLE. Para el caso de estudio que compete a este trabajo final de grado las condiciones a resolver son las de un flujo: monofásico, isoterma, viscoso y turbulento isotrópico (asumiendo que las fluctuaciones turbulentas se propagan de la misma manera en todas las direcciones). [24]

2.2.4 Turbulencia

La turbulencia es también un punto crucial cuando se procede a diseñar y resolver un modelo CFD. La primera forma de clasificar la turbulencia es, a partir de la naturaleza del flujo. Puede ser laminar (movimiento ordenado y por capas), o turbulento (movimiento caótico y fluctuante).

En el modelo de estudio de este TFG se trabaja con un alto número de Reynolds, por lo que estamos trabajando en régimen turbulento.

Según la manera de resolver o modelar la turbulencia, en menor o mayor grado existen 3 familias de modelos:

- “Direct Numerical Simulation” (DNS), en el cual la resolución es completa, no se añade ningún tipo de modelo turbulento, sino que debido al pequeño tamaño de malla, ésta es capaz de simular las fluctuaciones turbulentas, coste computacional muy elevado.
- “Large Eddy Simulation”, resuelve grandes estructuras, tiene un menor coste computacional que el modelo DNS.
- “Reynolds Averaged Navier-Stokes” (RANS), este modelo introduce un promediado de las fluctuaciones turbulentas, es el modelo con menor coste computacional, y uno de los que más se utiliza en el mundo de la ingeniería. Es el modelo usado en el presente proyecto final de carrera.

En este último modelo (RANS) se introducen 1 o 2 ecuaciones de transporte adicionales, las cuales representan el transporte de turbulencia. Los modelos que más se utilizan son los modelos “k- Standard”, “Realizable” o “RNG” y también los modelos “k- ω Standard” o “SST”. En los modelos tipo “k- ω ” se puede prescindir de las funciones de pared, por lo que podrían necesitar de un refinado mayor y por tanto sus tiempos de cálculo también podrían ser mayores. En este proyecto el modelo de turbulencia con el que se va a trabajar es el “RNG k-epsilon”.

2.2.5 Funciones de Pared

El objetivo de las funciones de pared es adimensionar los perfiles de velocidad tal y como propuso Von Kármán (ecuaciones 2.8 y 2.9), con el objetivo de no resolver las capas límite que es donde se producen los mayores gradientes.

$$y^+ = y \frac{U_t}{\nu} \quad \text{Ec. 2.8}$$

$$U^+ = \frac{U}{U_t} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde:

- U_t = es denominada *velocidad de fricción*, lo que puede ser interpretado como un valor típico de la velocidad de agitación turbulenta, se calcula como $U_t = \sqrt{\frac{\tau_{turb}}{\rho}}$, donde τ_{turb} son las tensiones turbulentas y ρ la densidad del fluido.
- ν = es denominada *viscosidad cinemática* y se calcula a partir de la siguiente expresión $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ que representa la viscosidad que es la resistencia de un fluido al deslizamiento dividido entre la densidad del fluido.
- y = es la distancia desde el punto en estudio de la pared perpendicularmente a la misma.
- U = es la velocidad del flujo libre.

Dependiendo del valor de y^+ la capa límite la podemos dividir en 3 categorías. Podemos apreciar la función de pared en la figura 2.12.

- Subcapa viscosa: $y^+ < 5$ $u^+ = y^+$ Ec. 2.10

- Subcapa intermedia: $y^+ \in [5, 30]$ (impredecible)

- Subcapa logarítmica: $y^+ > 30$ $U^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + C^+$ Ec. 2.11

Para clasificar las funciones de pared tenemos dos categorías: modelos con alto número de Reynolds (donde el primer elemento debe pertenecer a la subcapa intermedia para el correcto modelado) y modelos de bajo número de Reynolds (donde el primer elemento debe pertenecer a la subcapa logarítmica para el correcto modelado).

Nuestro caso de estudios para este proyecto es de un número de Reynolds elevado.

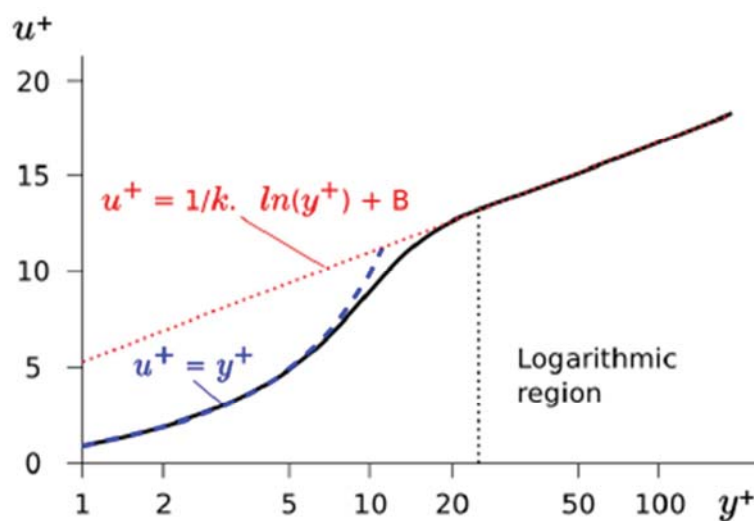


Figura 2.125. Representación gráfica de una ecuación de pared. [25]

2.3 OpenFOAM

OpenFOAM es un software gratuito dirigido a la resolución de técnicas CFD de código libre lanzado y desarrollado principalmente por OpenCFD Ltd. Su principal función es la resolución y procesado de problemas pertenecientes a la mecánica de medios continuos (en la cual se incluye la dinámica de fluidos computacional) a partir del sistema operativo Linux. Su implementación se basa en un enfoque tensorial utilizando técnicas de programación y el método de volumen finito o FVM. Además cuenta también con una herramienta para el postprocesado, es decir, la visualización y el análisis de los datos denominada ParaView, la cual también es de código libre y software gratuito. [26]

Dicho software presenta muy buenos resultados a nivel computacional y de resultados, con la principal ventaja de que es gratuito, al contrario que otros programas cuyas licencias son muy caras, por lo que el conocimiento a la hora de simular con este software supone un gran valor para las empresas que desarrollan trabajos con este tipo de programas.

El modo de funcionamiento de este programa se explica en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO PRÁCTICO

3.1 MODELO NUMÉRICO

3.1.1 Introducción

En los próximos apartados se explica la elección del caso de estudio y los objetivos, una breve descripción del modelo experimental utilizado, y los diferentes pasos que se han llevado a cabo para resolver el modelo computacional. Para el cual se han elegido 5 tamaños de malla diferente, realizando un exhaustivo análisis de convergencia de malla para la elección correcta de la malla de trabajo, y llegando a unos residuos menores a 1×10^{-7} , con los que asumimos que la maya ha convergido.

3.1.2 Planteamiento del problema

Dado una instalación experimental en la cual está instalado nuestro Tubo Venturi con una serie de piezómetros donde podemos observar la presión en los distintos puntos del tubo Venturi, modelar dicho tubo Venturi a nivel computacional, en cuyo modelo se represente con un bajo porcentaje de error la instalación a nivel real, para una vez obtenido dicho modelo y estudiar su robustez, cambiar el tipo de diseño del tubo Venturi a nivel computacional hasta alcanzar un objetivo de caída de presión en el estrechamiento de éste, para una posible aplicación industrial de este nuevo tubo Venturi.

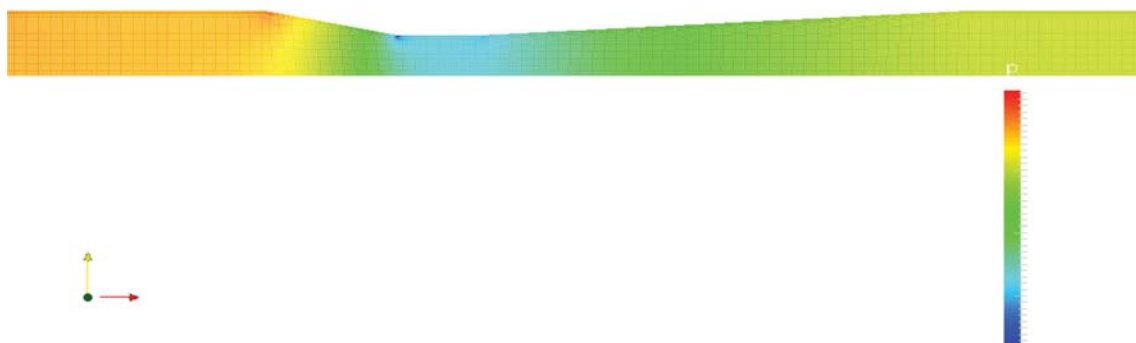


Figura 3.1. Parte superior simétrica del tubo Venturi del caso de estudio.

3.1.3 Descripción del modelo

3.1.3.1 Definición del entorno.

Una vez que ya hemos fijado el problema a resolver, debemos proceder a preparar las herramientas para la resolución del mismo. Para lo cual el programa que hemos elegido para la resolución del modelo CFD es OpenFOAM. Dicho programa a diferencia de los programas de resolución de CFD de los sistemas operativos Windows cuyas licencias alcanzan las decenas de miles de euros, es de software gratuito y de código abierto (explicado en el punto 2.3), lo que aporta un valor añadido al TFG, ya que para resolver los mismos problemas, podemos hacerlo a menor coste.

Dicho programa OpenFOAM se ejecuta en máquinas con sistema operativo Linux, el cual se puede instalar totalmente gratis en el ordenador con el cual redacto el TFG, aunque en este caso, tengo un ordenador específico con dicho sistema operativo.

3.1.3.2 Entrada de datos y modelado

A la hora de introducir en OpenFOAM tanto la geometría del caso de estudio, como el modelo de turbulencia de trabajo y hacer el dimensionado de las distintas mallas, OpenFOAM trabaja mediante carpetas. Este programa no cuenta con una interfaz gráfica como otros programas de CFD para introducir los datos iniciales(aunque una vez obtenida la simulación sí que es posible representar los resultados mediante la herramienta ParaView).

Para la introducción de datos, se ha elegido una carpeta que contenía un tutorial para de un caso general de OpenFOAM. En la cual se han ido sustituyendo los archivos de los que disponía por los referidos al caso de estudio.

Cualquier caso en particular que queramos simular debe de tener las siguientes 3 carpetas como se representa en la figura3.2. La carpeta 0, constant y system.



Figura 3.2. Carpetas de datos de un caso CFD en OpenFOAM.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

En la primera carpeta (carpeta 0), se indican los valores de distintas magnitudes físicas. Las que nosotros debemos modificar para la resolución de nuestro caso son tanto la velocidad (carpeta 0), como la presión (carpeta p), ya que son las variables que debemos resolver para el caso del tubo Venturi.



Figura 3.3. Documentos pertenecientes a la carpeta 0.

En ambas carpetas los parámetros que debemos modificar son las condiciones de contorno para adaptarlas a las correspondientes a nuestro caso de estudio.

En el archivo p, al límite superior del tubo Venturi, le asignamos un gradiente de presión igual a 0, como también se lo asignamos a la entrada izquierda del modelo (que es la zona por donde entra el agua en dirección de izquierda a derecha como podemos observar en la figura 3.1), en la pared derecha (salida de agua) le asignamos un valor de presión fijo igual a 0, y por último a la parte inferior del tubo venturi le asignamos una condición de contorno de simetría, cuya función es muy importante desde el punto de vista del cálculo computacional, ya que, debido a que el tubo venturi tiene un eje de simetría (su eje central) podemos trabajar con la mitad de la malla aplicando dicha condición de contorno al eje de simetría.

A continuación en la figura 3.4, se puede observar tanto el código como la forma de trasladar estas condiciones de contorno para la presión en el idioma OpenFOAM.

```
boundaryField
{
  inlet
  {
    type      zeroGradient;
  }
  outlet
  {
    type      fixedValue;
    value     uniform 0;
  }
  "top.*"
  {
    type      zeroGradient;
  }
  "bottom.*"
  {
    type      zeroGradient;
  }
  "wall.*"
  {
    type      empty;
  }
  "symmetry.*"
  {
    type      symmetryPlane;
  }
}
```

Figura 3.4. Condiciones de contorno para la presión

Respecto a la velocidad, el proceso a aplicar es parecido, ya que asignamos un valor fijo de velocidad tanto en el límite superior como en el inferior del contorno modelado, (dado que no puede existir velocidad en dichos puntos), un gradiente de velocidades en la salida del contorno modelado igual a 0, y finalmente un valor de velocidad a la entrada del dominio modelado, calculado a partir del caudal de agua medido en el tubo Venturi instalado en el laboratorio, esta programación la podemos observar en la figura 3.5, que se muestra a continuación.

```
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform (0.808365 0 0);
    }

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

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

    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    "wall.*"
    {
        type            empty;
    }

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

Figura 3.5. Condiciones de contorno para la velocidad.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Respecto a las carpetas $-k$, y $-\epsilon$, para calcular sus respectivos valores he usado las siguientes formulas:

$$k = \frac{3}{2} (UI)^2 \quad \text{Ec. 3.1}$$

- K , coeficiente de energía turbulenta.
- U , es la velocidad a la entrada del dominio modelado.
- I , corresponde a la intensidad turbulenta.

$$\epsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \quad \text{Ec. 3.2}$$

- ϵ , ratio de disipación turbulenta
- C_{μ} , es una constante del modelo turbulento
- l , corresponde a $0.038x$ diámetro de entrada al tubo Venturi.

A continuación muestro los datos obtenidos:

U (m/s)	0,808365
I	0,1
L (m)	0,000988
C_{μ}	0,085

Tabla 3.1

K	0,00980181
ξ	0,083487484

Tabla 3.2

```
boundaryField
{
    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 0.00980181;
    }

    "top.*"
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            uniform 0.00980181;
    }

    "bottom.*"
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            uniform 0.00980181;
    }

    "..."
    {
        type            kqRWallFunction;
        value            uniform 0.00980181;
    }
}
```

Figura 3.6. Condiciones de contorno para la k.

```
boundaryField
{
    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }

    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value            uniform 0.0834874843;
    }

    "top.*"
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 0.0834874843;
    }

    "bottom.*"
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 0.0834874843;
    }

    "..."
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value            uniform 0.0834874843;
    }
}
```

Figura 3.7. Condiciones de contorno para la epsilon.

Pasamos ahora a la carpeta *constant*, la cual está compuesta por 3 archivos y 2 carpetas como podemos observar en la figura 3.8. En dichos documentos se recoge la información acerca del modelo de turbulencia que se va a utilizar en la futura simulación.



Figura 3.8. Documentos pertenecientes a carpeta *constant*.

En nuestro caso el modelo de turbulencia que se va a utilizar es el RNG, por los buenos resultados obtenidos en las simulaciones y porque nos hemos centrado más en variar el propio diseño del tubo Venturi en vista a una posible aplicación real a nivel industrial, que a analizar las diferencias que pueden existir en las simulaciones utilizando uno u otro modelo de turbulencia distinto.

Para variar el modelo de turbulencia con el que queremos llevar a cabo la simulación, simplemente deberemos modificar el texto de la línea *RASModel* dentro de la carpeta *turbulenceProperties*, seleccionando cualquier otro modelo de turbulencia que aparece señalado en azul, como se muestra en la imagen 3.9, que aparece a continuación:

```
simulationType RAS;  
  
RAS  
{  
    // Tested with kEpsilon, realizableKE, kOmega, kOmegaSST, v2f,  
    // ShihQuadraticKE, LienCubicKE.  
    RASModel      RNGkEpsilon;  
  
    turbulence     on;  
  
    printCoeffs   on;  
}
```

Figura 3.9. Modelos de turbulencia en carpeta *turbulenceProperties*.

Una de las carpetas que contiene la carpeta *constant* es la denominada *polyMesh*, en la figura 3.10 se pueden observar los documentos que la componen, y la información que albergan son la geometría del objeto en estudio (tubo Venturi), información acerca de la cantidad de celdas de la malla, y lo más importante la malla que se va a utilizar en el caso de estudio (tubo Venturi).



Figura 3.10. Documentación de carpeta *polyMesh/constant*.

Para realizar la malla que representa la parte superior simétrica del tubo Venturi, se ha procedido a utilizar la herramienta SnappyHexMesh, el funcionamiento de dicha herramienta consiste en a partir de una malla base rectangular, y un diseño hecho en autocad de la parte superior del tubo Venturi, procede a cortar dicha malla rectangular con el segmento realizado en autocad de la parte superior, quedando una malla con las medidas del tubo Venturi que queremos obtener, visualmente podemos observar el proceso de corte comentado en las imagen 3.11 y 3.12 que muestro a continuación:



Figura 3.11. Malla rectangular y parte superior para realizar corte.



Figura 3.12. Malla después de realizar el corte.

Dicha geometría utilizada para crear el corte a la malla rectangular, es la que se muestra a continuación en la figura 3.13.

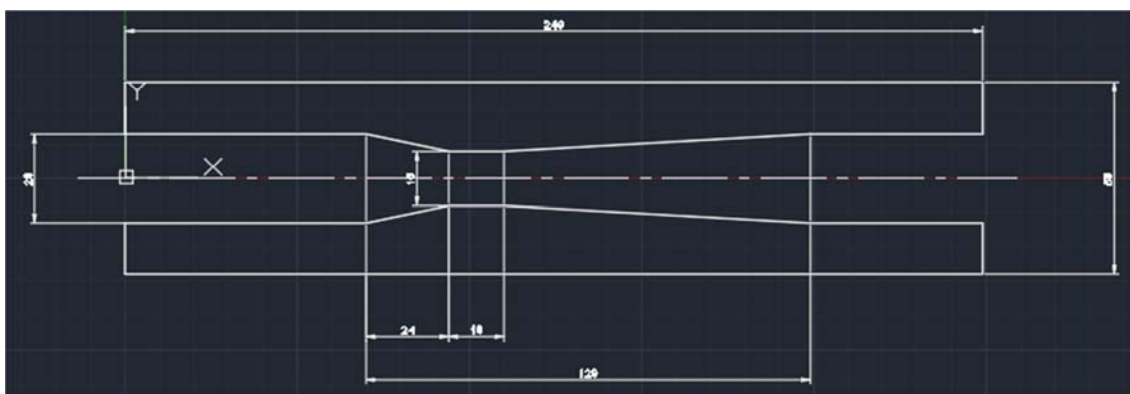


Figura 3.13. Diseño en AutoCad del tubo Venturi experimental.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Respecto a los tipos de malla que se van a ensayar en este Trabajo Final de Grado, se han elegido 6 tipos diferentes de malla, en la siguiente tabla se muestran los distintos tamaños de malla a estudiar:

	Celdas en eje x	Longitud eje x (cm)	Tamaño representativo (long/celdas eje)
Malla 1	584	219	0,375
Malla 2	438	219	0,5
Malla 3	350	219	0,625714286
Malla 4	292	219	0,75
Malla 5	250	219	0,876
Malla 6	219	219	1

Tabla 3.3. Composición de las mallas en estudio.

A continuación se procede a comparar la malla más fina (1) y la más gruesa (6) en el código introducido en OpenFOAM como se observa en la siguiente figura 3.14.

```

vertices
(
  ( 0.020 0.000 0.008 )
  ( 0.239 0.000 0.008 )
  ( 0.239 0.000 0.001 )
  ( 0.020 0.000 0.001 )
  ( 0.020 0.020 0.008 )
  ( 0.239 0.020 0.008 )
  ( 0.239 0.020 0.001 )
  ( 0.020 0.020 0.001 )
);
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) ( 584 1 53 )
);

vertices
(
  ( 0.020 0.000 0.008 )
  ( 0.239 0.000 0.008 )
  ( 0.239 0.000 0.001 )
  ( 0.020 0.000 0.001 )
  ( 0.020 0.020 0.008 )
  ( 0.239 0.020 0.008 )
  ( 0.239 0.020 0.001 )
  ( 0.020 0.020 0.001 )
);
blocks
(
  hex (0 1 2 3 4 5 6 7) ( 219 1 20 )
);
    
```

Figura 3.14. Comparativa de códigos entre malla 1(izquierda) y malla 6 (derecha).

El primer apartado denominado *vértices* coincide para ambas mallas, ya que son los 8 puntos en el espacio que definen el cubo de malla antes de realizar el corte con la herramienta *SnappyHexMesh*, la diferencia entre ambas mallas está en el apartado *blocks*, en el cual la primera parte de esta línea sirve para indicar que debemos de crear una malla hexagonal con los puntos que van del 0 al 7 (común para ambas mallas en estudio), y la segunda parte de esta misma línea, que es la que varía, es la correspondiente al vector que define el número de divisiones que queremos en el eje x, y, z de nuestro modelo.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Al ser un caso bidimensional, la componente que pertenece a la profundidad no se ve alterada, por lo que solamente se dividen la componente horizontal y la componente vertical. El aumento en el número de mallas entre cada caso es siempre proporcional, consiguiendo que las mallas siempre sean cuadradas.

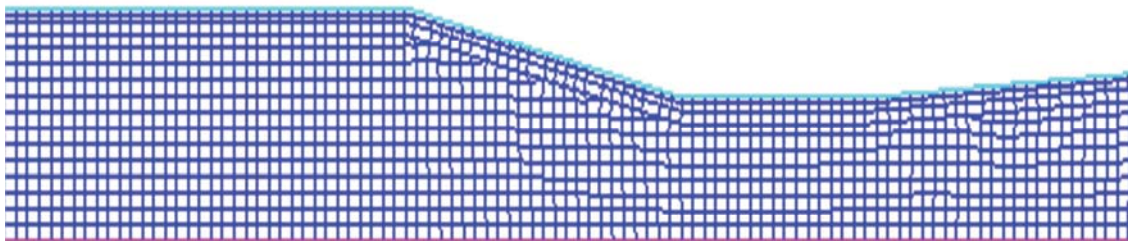


Figura 3.15. Segmento de la forma de la malla utilizada.

En la figura 3.15 mostrada en la parte superior podemos observar la forma de la malla para una sección del caso con un mallado más grueso, en el cual se observa con más claridad dicho mallado, y la disposición entre distintas celdas.

Respecto a los valores que determinan la calidad de la malla, han sido obtenidos haciendo uso del comando `checkMesh` introducido en el terminal de simulación. Obteniendo unos resultados máximos de `skewness` de 0.363393 (dicho parámetro mide la asimetría de la malla) sinedo los valores máximos aceptables de 0.85 para celdas triangulares y de 0.9 para celdas cuadradas (nuestro modelo dispone de celdas cuadradas) y unos resultados máximos de `ratio de aspecto` de 3.9072 (dicho parámetro es la relación que existe entre la longitud del lado mayor con el lado menor de la malla) y debe ser cercano a 1. En la siguiente imagen 3.16 podemos observar dichos resultados:

```
Checking geometry...
Overall domain bounding box (0.02 0 0.001) (0.239 0.013 0.008)
Mesh has 2 geometric (non-empty/wedge) directions (1 1 0)
Mesh has 2 solution (non-empty) directions (1 1 0)
All edges aligned with or perpendicular to non-empty directions.
Boundary openness (-6.98644e-19 1.8556e-15 2.83386e-15) OK.
Max cell openness = 2.55996e-16 OK.
Max aspect ratio = 3.9072 OK.
Minimum face area = 3.65269e-08. Maximum face area = 4.19405e-06. Face area magnitudes OK.
Min volume = 2.55688e-10. Max volume = 1.17649e-09. Total volume = 1.73915e-05. Cell volumes OK.
Mesh non-orthogonality Max: 31.5373 average: 1.3403
Non-orthogonality check OK.
Face pyramids OK.
Max skewness = 0.363393 OK.
Coupled point location match (average 0) OK.

Mesh OK.
End
tfg@tfg-laptop: ~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1$
```

Figura 3.16. Parámetros significativos que determinan la calidad de la malla.

En cuanto a los factores que determinan la calidad de malla, estos se obtienen introduciendo el comando *checkMesh* en la terminal. Los valores máximos obtenidos de skewness y ratio de aspecto para las mallas utilizadas son de 0,510923 y 6,32408. Ambos valores se consideran aceptables en cuanto a la calidad de las mallas.



Figura 3.17. Documentos pertenecientes a la carpeta *system*.

Para finalizar, con el contorno de trabajo de OpenFOAM, queda hablar de la carpeta *system*, en la cual se pueden encontrar 3 archivos (figura 3.17).

- El primero de ellos es el archivo *controlDict*, en dicho diccionario se indica la información sobre cómo realizar la simulación, es decir, el tiempo inicial de la simulación, el tiempo final, el intervalo de tiempo entre simulaciones, la frecuencia con la que queremos que se graben las diferentes simulaciones, etc.
- El segundo es el archivo *fvSchemes*, en el cual introducimos los esquemas de discretización e interpolación para cada uno de los términos de las ecuaciones definidas.
- Finalmente encontramos el archivo *fvSolution*, dicho diccionario contiene los métodos de resolución y las tolerancias para las ecuaciones que se van a utilizar en la resolución. [27]

3.1.3.3 Proceso de simulación

Una vez que hemos obtenido las 6 carpetas para cada uno de los casos, el siguiente punto a realizar es lanzar la simulación para todos y cada uno de los casos.

Dicho procedimiento consiste en la realización de unos pasos que son específicos para cada simulación en OpenFOAM, la figura 3.18 muestra un ejemplo para el modelo con la malla más fina (1).

A terminal window titled 'tfg@tfg-laptop: ~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1'. The terminal shows the following commands and output:

```
tfg@tfg-laptop:~$ cd OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1
tfg@tfg-laptop:~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1$ ./Allrun
Cleaning /home/tfg/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1 case
Running blockMesh on /home/tfg/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1
Running snappyHexMesh on /home/tfg/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1
Running createPatch on /home/tfg/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1
tfg@tfg-laptop:~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1$ █
```

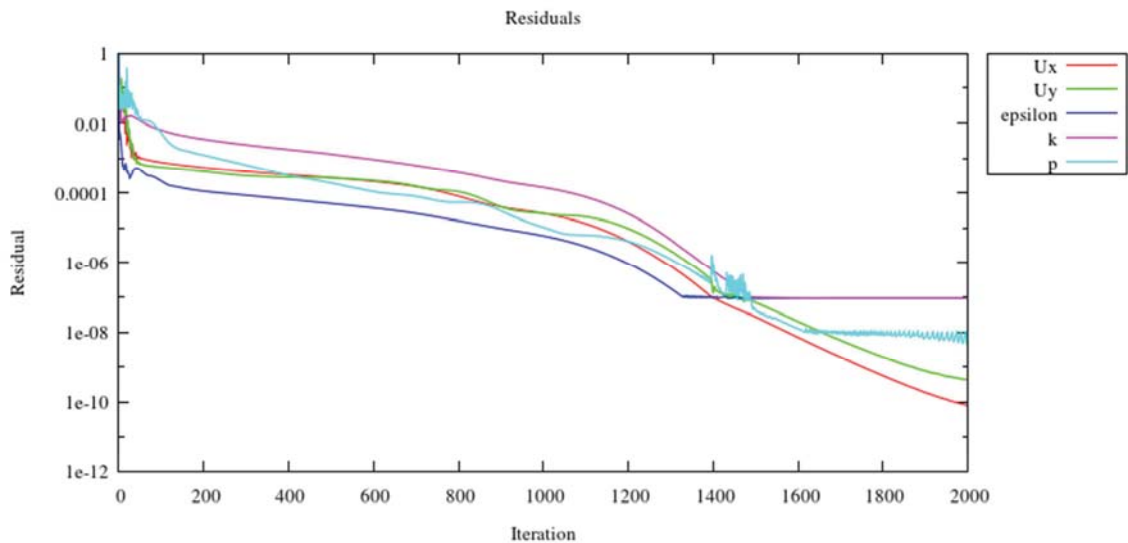
Figura 3.18. Simulación del caso de malla más fina (malla 1).

- Primero debemos llamar al programa que deseamos abrir, introduciendo en el terminal la dirección que queremos cargar.
- Posteriormente debemos abrir la carpeta en la cual se encuentra el modelo a realizar la simulación. (En la imagen 3.18 podemos observar que estos 2 pasos se pueden realizar en un solo paso poniendo la dirección completa hasta la carpeta objetivo)
- Finalmente, usamos el script *Allrun* para realizar la simulación. El funcionamiento del script *Allrun* consiste básicamente en eliminar las posibles carpetas almacenadas en este directorio de simulaciones anteriores y procede a realizar las sucesivas iteraciones del modelo hasta alcanzar un valor determinado. En nuestro caso se realizarán 2.000 veces para todas las mallas. Una vez finalizadas las iteraciones se ejecuta la herramienta *gnuplot* que nos muestra una representación gráfica de cómo han ido evolucionando los diferentes residuos para concluir en que el modelo ha convergido o no, es decir, este comando agrupa en el orden correcto las aplicaciones que hay que lanzar sucesivamente para preparar el caso.

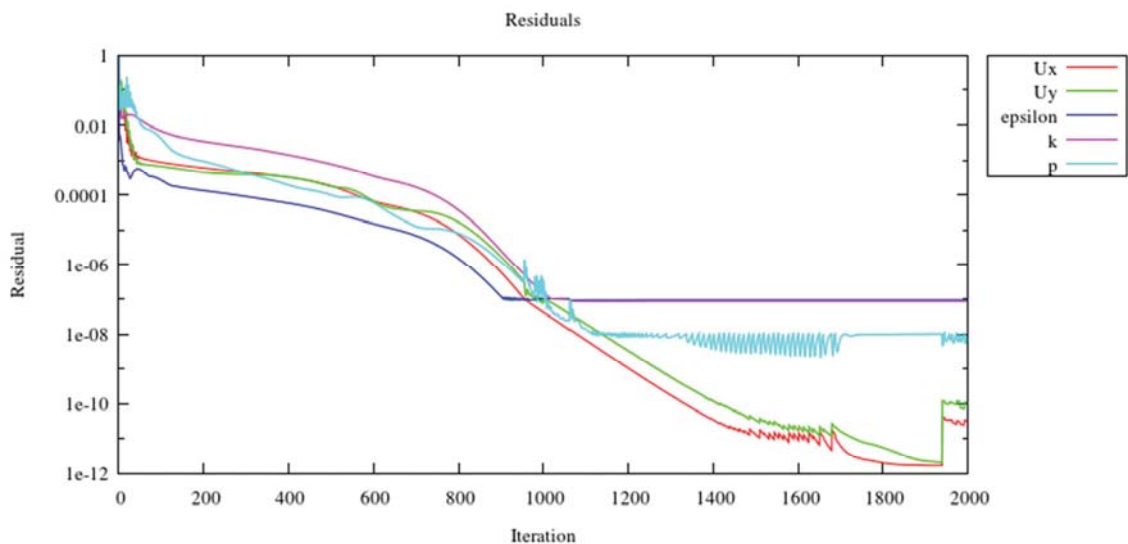
Centrándonos en los residuos obtenidos de las 6 simulaciones, podemos observar que todos ellos están por debajo de 1×10^{-7} , es decir, el error en los datos debido al número de iteraciones sería de 0.0000001, por tanto se podría concluir en que la precisión por continuar iterando no sería apreciable, debido a los bajos residuos obtenidos, y concluir que el modelo ha convergido.

A continuación se muestran las gráficas de los residuos para los 6 tipos de malla obtenidos en orden de más fina (malla 1) a más gruesa (malla 2):

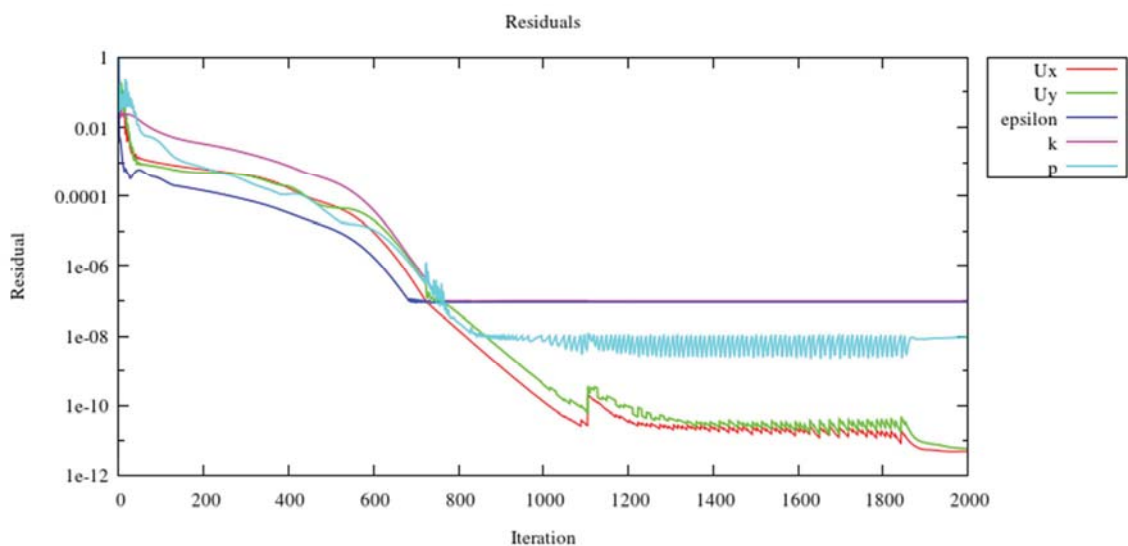
Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD



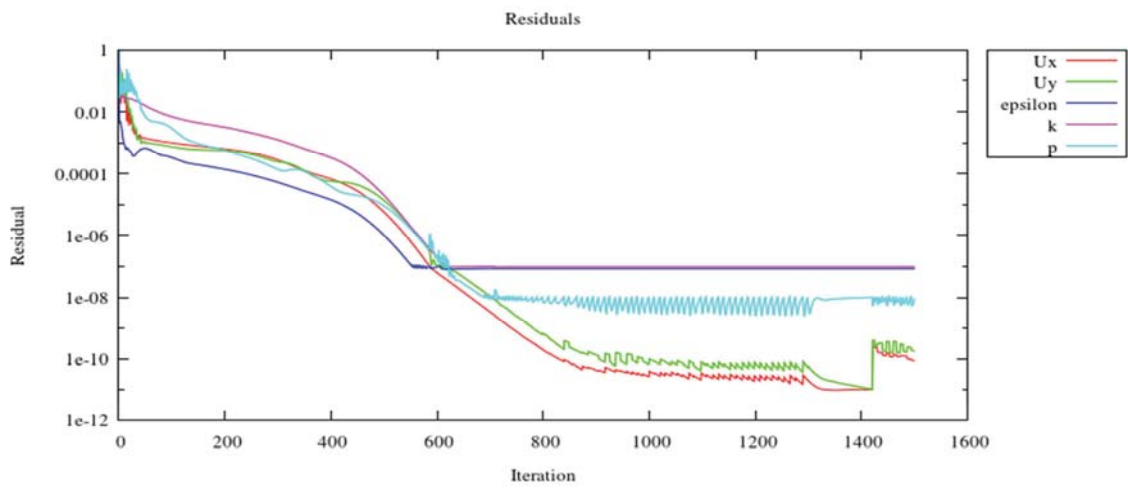
Residuos para la malla 1



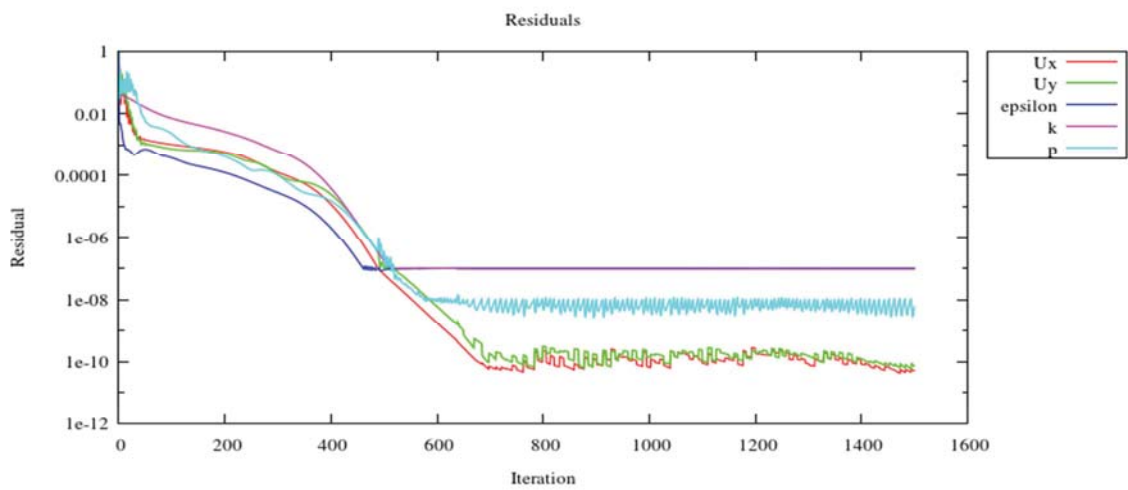
Residuos para la malla 2



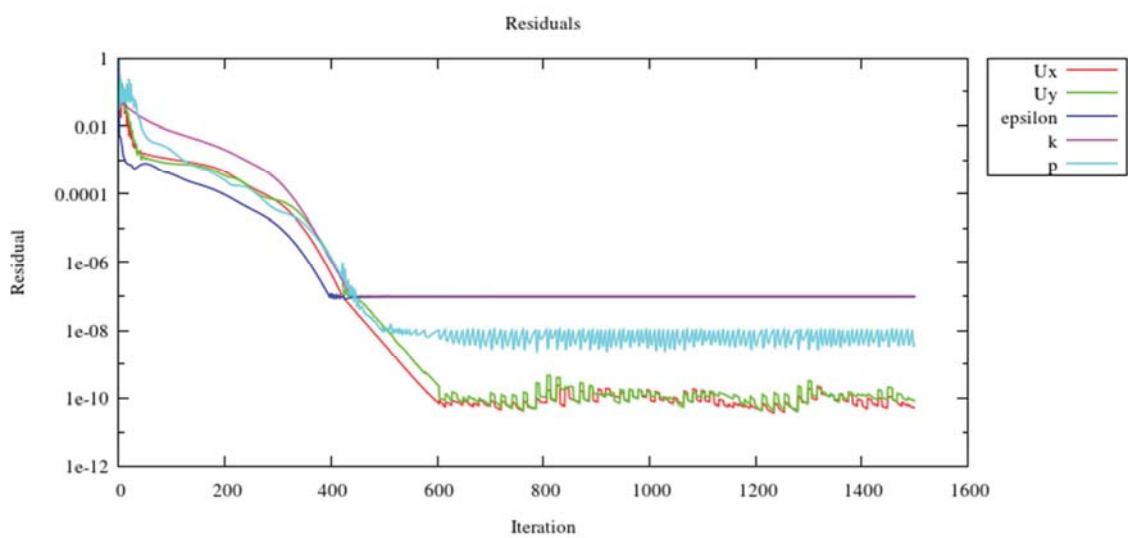
Residuos para la malla 3



Residuos para la malla 4



Residuos para la malla 5



Residuos para la malla 6

Figura 3.19. Residuos obtenidos para los diferentes modelos.

Como podemos observar en todos los residuos de las diferentes simulaciones los valores que tienen los registros más elevados de residuos son tanto la k como la ϵ , que aun así convergen en torno al valor 1×10^{-7} .

También se puede observar que no existen grandes diferencias en cuanto al valor en el cual convergen las diferentes magnitudes físicas, pero si se aprecian diferencias a la hora de cual llega a converger en menos tiempo, es decir, las mallas más gruesas alcanzan antes la convergencia que las mallas más finas, este dato era de esperar ya que está totalmente relacionado con el tamaño de malla.

3.2 ANÁLISIS DE CONVERGENCIA DE MALLA

3.2.1 Introducción

Una vez ya calculadas las 6 simulaciones de cada uno de los casos en estudio para las diferentes mallas, se debe encontrar un método para elegir el caso más óptimo. Lo más intuitivo, en un principio, sería comparar los resultados de todos los casos simulados con los datos experimentales, y quedarnos con el modelo que más se acerque a dichos datos recogidos experimentalmente.

Sin embargo, la ASME (American Society of Mechanical Engineers) propone la necesidad de realizar lo que se denomina un análisis de convergencia de malla. Dicho análisis es totalmente ciego, es decir, no contrastas el modelo con datos experimentales, ya que en muchos modelos CFD no se dispone de datos experimentales con los que poder realizar una comparación).

Dicho análisis de convergencia de malla, pretende determinar a qué nivel de refinamiento de la malla el error debido a la discretización del medio continuo deja de tener efecto, y por tanto, aunque siguiéramos refinando la malla no conseguiríamos disminuir el error de discretización.

A continuación se explican los diferentes valores que se deben calcular y los pasos que se deben seguir según publica la ASME en el artículo titulado "*Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications* (Procedimiento de Estimación y Notificación de Incertidumbre Debido a la Discretización en las Aplicaciones CFD)". [28]

3.2.2 Procedimiento para la estimación del error de discretización

En primer lugar se debe definir un tamaño de malla representativo. Para lo cual se divide la longitud horizontal que corresponde al tubo Venturi entre el número de celdas de las que consta, como podemos observar en la ecuación 3.1.

$$h = \frac{\text{longitud eje } i}{n^{\circ} \text{ de celdas eje } i} \quad 3.1$$

En la tabla 3.4 que se muestra a continuación podemos observar los resultados para los 6 modelos con mallas diferentes.

Nº MALLA	Nº Celdas eje i	longitud eje i (mm)	h
1	584	219	0,375
2	438	219	0,5
3	350	219	0,625
4	292	219	0,75
5	250	219	0,875
6	219	219	1

Tabla 3.4. Relación entre mallas a comparar.

Una vez finalizado este cálculo, procedemos a calcular un valor 'r', que representa la relación entre una malla y la siguiente malla más fina. Dicha relación debe ser siempre mayor que 1, como podemos observar en la ecuación 3.2. También, es recomendable el r_{global} (relación que existe entre la malla más gruesa y la más fina a estudiar) sea superior a 1,3. En la tabla 3.6 podemos observar los cálculos obtenidos para las 5 combinaciones posibles.

$$h = \frac{h_{gruesa}}{h_{fina}} > 1 \tag{3.2}$$

r	
r ₂₁	1,30606429
r ₃₂	1,229976097
r ₄₃	1,173008182
r ₅₄	1,160403861
r ₆₅	1,13045874
r _{global}	2,471872974

Tabla 3.5. Relación entre tamaños de malla representativos.

Ahora, se han de calcular distintos valores combinando mallas de 3 en 3. En nuestro caso de estudio, al disponer de 6 mallas diferentes, las distintas combinaciones serán 123, 234, 345 y

456 (cada combinación ijk , corresponde a las mallas i , j y k , cabe recordar que la malla 1 es la más fina y la malla 6 es la más gruesa).

El primer valor que se procede a calcular es ϕ_i dicho punto representa cualquier valor tomado de la variable a estudiar en cualquier punto de la simulación (presión, velocidad...). Es conveniente tomar distintos valores para realizar un buen análisis.

El siguiente paso es, calcular el error entre el valor tomado en un mismo punto en una malla y en la malla inmediatamente más fina (como podemos observar en la ecuación 3.3), y con este valor podemos calcular el valor s , que representa básicamente un valor unitario negativo o positivo (ecuación 3.4).

$$\epsilon_{ij} = \phi_i - \phi_j \quad 3.3$$

$$s = \text{signo} \left(\frac{\epsilon_{ij}}{\epsilon_{jk}} \right) \quad 3.4$$

Una vez calculados estos valores, procedemos a calcular uno de los valores más importantes para realizar un análisis de convergencia de malla. Dicho valor es p , el cual representa el orden aparente de malla. Para calcularlo aplicamos la ecuación 3.5, en la cual es necesario iterar ya que la propia incógnita aparece en la ecuación. Además, este valor debe ser lo más cercano posible al orden formal del modelo de estudio, que en el presente trabajo final de grado es 1.

$$p_{ijk} = \frac{1}{\ln(r_{kj})} \left| \ln \left| \frac{\epsilon_{ij}}{\epsilon_{jk}} \right| + \ln \left(\frac{r_{jk}^{p_{ijk}} - s_{ijk}}{r_{ij}^{p_{ijk}} - s_{ijk}} \right) \right| \quad 3.5$$

Tras haber calculado el orden aparente de malla, se procede a calcular la incertidumbre existente debida a la discretización, GCI. Se recomienda que dicho valor sea inferior al 10%, y, si es posible, inferior al 5%. Dicho valor no es posible calcularlo sin primero calcular el error relativo. Las ecuaciones 3.6 y 3.7 muestran el cálculo del error y de la incertidumbre.

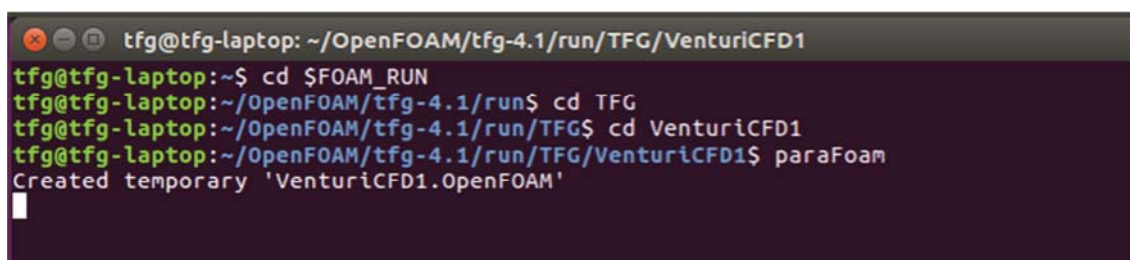
$$e_{aij} = \left| \frac{\phi_j - \phi_i}{\phi_j} \right| \quad 3.6$$

$$GCI_{ij} = \frac{1.25 \times e_{aij}}{r_{ij}^{p_{ijk}} - 1} \quad 3.7$$

3.2.3 Postprocesado y cálculo del error de discretización

En este punto se va a proceder a explicar cómo se han podido obtener los puntos con los que realizar el cálculo de la incertidumbre (explicado en el punto anterior).

Una vez realizadas las 6 simulaciones (1 para cada caso), se debe hacer uso de la herramienta de visualización *paraView*. El procedimiento es, una vez seleccionado el caso que se desea visualizar en el terminal de Linux, introducir el comando *paraFoam* para que se abra el visualizador para dicho modelo, en la figura 3.20 podemos ver un ejemplo a la hora de abrir el visualizador para el modelo 1(malla más fina).



```
tfg@tfg-laptop: ~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1
tfg@tfg-laptop:~$ cd $FOAM_RUN
tfg@tfg-laptop:~/OpenFOAM/tfg-4.1/run$ cd TFG
tfg@tfg-laptop:~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG$ cd VenturiCFD1
tfg@tfg-laptop:~/OpenFOAM/tfg-4.1/run/TFG/VenturiCFD1$ paraFoam
Created temporary 'VenturiCFD1.OpenFOAM'
```

Figura 3.20. Comandos para abrir el visualizador de resultados.

Lo primero que se hace una vez abierto el visualizador es elegir las variables que se quieren visualizar a la hora de cargar el modelo; una vez cargado el modelo elegimos que los resultados a mostrar sean los de la última iteración. Una vez realizados estos pasos, ya se pueden obtener los datos deseados.

Dentro de este visualizador, se va a utilizar la herramienta *Plot Over Line* para obtener los datos que deseamos, la función de dicha herramienta es trazar una línea a través del tubo Venturi que posteriormente el programa devuelve un documento Excel con las variables en cada punto de esa línea.

En nuestro caso se ha elegido una línea a 2 milímetros de la superficie del estrechamiento del tubo Venturi, ya que es desde donde empiezan los medidores de presión del modelo experimental, ya que en el resto de secciones del Venturi, tras realizar un gráfico de presiones por secciones no se observan grandes diferencias, pero en el estrechamiento sí. Podemos visualizar la línea en la siguiente figura 3.21:



Figura 3.20. Segmento para la toma de datos del modelo.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Una vez seleccionado el segmento a partir del cual se van a obtener los datos, se debe indicar la resolución que se desea obtener, es decir, los puntos que se van a representar. En el presente caso se eligen 100 divisiones, ya que la distancia horizontal del tubo Venturi son 0.219 unidades de distancia, y con dichas 100 divisiones es suficiente para realizar los cálculos necesarios.

Tras seleccionar la resolución deseada pulsamos aplicar y el programa automáticamente te devuelve una gráfica (más adelante se mostrará dicha gráfica), en la cual se muestran las variables que deseamos visualizar a lo largo de la distancia escogida. Dicha herramienta tiene un valor muy importante, ya que a partir de estas gráficas tanto de presiones como velocidades de las simulaciones, son las que usaremos para comparar con las gráficas del modelo experimental.

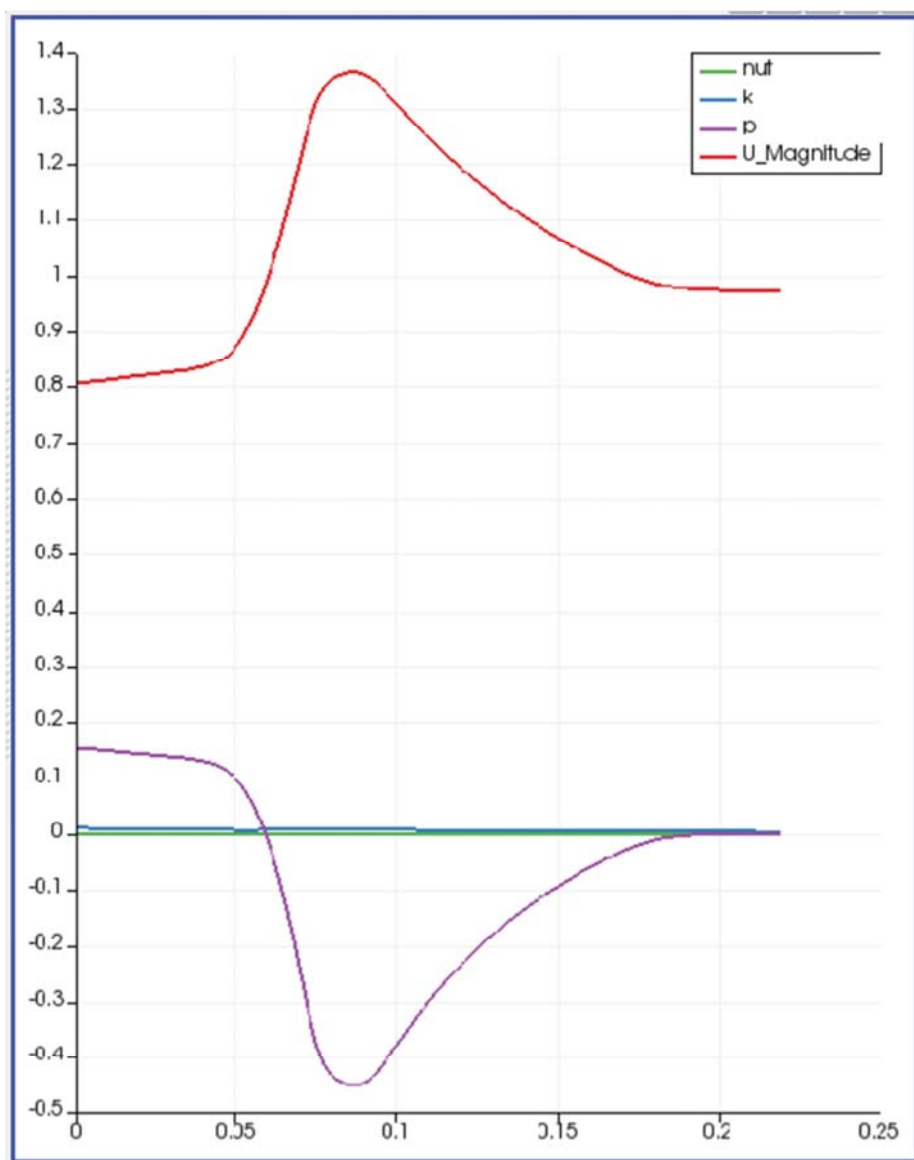


Figura 3.21 Representación gráfica tras elegir los puntos en el modelo.

Una vez obtenida esta gráfica, podemos guardar fácilmente dicha información, ya que lo que hace el programa básicamente es representar una serie de puntos con una resolución asignada, en una hoja de Excel. Por tanto, realizando este procedimiento para las 6 mallas diferentes simuladas, podremos calcular el análisis de convergencia de malla.

Los datos con los cuales se va a proceder a realizar el análisis de convergencia de malla son, presiones en diferentes puntos del tubo Venturi, que coincidirán con los puntos donde se encuentran algunos de los medidores de presión del Venturi experimental, y la velocidad en el estrechamiento del tubo Venturi.

Haciendo uso de una hoja de cálculo Excel, se ha procedido a realizar el cálculo del análisis de convergencia de malla, pues se introducen en una misma tabla todos los datos obtenidos para las 6 simulaciones. Se han seleccionado 4 puntos, que son exactamente los mismos para cada malla (todas tienen igual resolución y los puntos están situados en la misma línea) y después se ha procedido a calcular el orden aparente de malla (p) y la incertidumbre que resulta de la discretización (GCI), en la siguiente tabla 3.6 podemos observar un ejemplo de los puntos elegidos para calcular dicha convergencia de malla.

	Presión en A (0,03942)	Presión en C (0,06789)	Presión en D (0,08541)	Velocidad en eje Venturi (0,08541)
Malla 1	0,129624	-0,198272	-0,45012	1,36367
Malla 2	0,12337	-0,202217	-0,452395	1,35978
Malla 3	0,116644	-0,206847	-0,45496	1,35572
Malla 4	0,110382	-0,210049	-0,45761	1,35215
Malla 5	0,106034	-0,213708	-0,460677	1,34965
Malla 6	0,102332	-0,215999	-0,464068	1,34806

Tabla 3.6. Datos de presiones y velocidades en diferentes puntos del Venturi por malla.

Los puntos elegidos para realizar el cálculo del análisis de convergencia son a la entrada del tubo Venturi, durante el estrechamiento y en la parte más estrecha del tubo Venturi, dichos puntos elegidos no son arbitrarios sino que son donde los gradientes de presión y velocidad están más acentuados, y los valores en dichas regiones del tubo son las críticas de cara a las futuras aplicaciones industriales del tubo Venturi.

A continuación se procederá a realizar todos los cálculos necesarios para la obtención de los resultados, como podremos observar en el siguiente apartado.

3.2.4 Resultados

Debido a que se ha hecho el análisis de convergencia de malla para 4 parámetros diferentes en 6 tipos de mallas diferentes agrupándolas de 3 en 3 se opta por mostrar los resultados medios obtenidos de los 4 parámetros en cada combinación de 3 mallas, tanto para la incertidumbre como para el orden aparente de malla, podemos observar estos resultados en las siguientes gráficas 3.7 y 3.8 que se muestran a continuación. Otro parámetro interesante a mostrar en este punto es el resultado de la magnitud y^+ . Dicho valor tiene un papel importante en el modelado de la turbulencia a la hora de determinar si estamos utilizando un tamaño de malla adecuado de las celdas cerca de las paredes del modelo. Este valor lo podemos observar en la tabla 3.9 mostrada a continuación.

p321	p432	p543	p654
1,503099253	0,692640167	0,258794026	0,258794026

Tabla 3.7. Valores medios para el orden aparente de malla.

GClfine,321	GClfine,432	GClfine,543	GClfine,654
4,90%	14,38%	9,50%	8,63%

Tabla 3.8. Valores medios para la incertidumbre.

	y^+
Malla 1	4
Malla 2	4,96
Malla 3	6,03
Malla 4	6,96
Malla 5	7,93
Malla 6	8,85

Tabla 3.9. Valores medios para y^+ según el tamaño de la malla.

Como podemos apreciar en los resultados de la tabla 3.8, las incertidumbres de todas las mallas están por debajo de un 15%, valor hasta el cual se pueden llegar a aceptar, y por debajo de valores del 5% la incertidumbre es considerada muy buena. En base a este aspecto vemos que la malla con menos incertidumbre es la más fina, con un valor de 4.9%.

En cuanto a la tabla 3.9, que analiza los valores de y^+ , podemos observar como a medida que aumentamos el tamaño de malla aumenta dicho valor. El rango de aceptación de dicho valor suele ser de [5,300], aunque existe otro rango más estricto que va de [5,30], en este caso vemos que la malla 1 está muy cerca del límite inferior y que el resto de mallas se pueden asumir dentro del límite estricto de y^+ , en este caso asumimos aceptable la desviación de la

mallas 1, al encontrarse muy próxima al límite inferior y ver que no afecta en nada a los demás indicadores, incluso presenta muy buenos resultados.

Y por último, en la tabla 3.7 podemos visualizar valores de los diferentes órdenes aparentes de malla para cada modelo, que como se comentó en el apartado 3.2.2, el valor de dicho orden aparente de malla debe ser lo más semejante posible al orden formal del modelo. Como el orden formal de nuestro modelo es 1, podemos observar que los valores más próximos son p_{321} y p_{432} .

Por tanto teniendo en cuenta los diferentes indicadores del análisis de convergencia de malla, y que cada orden aparente es la combinación de 3 mallas debido a que la malla p_{432} tiene una incertidumbre elevada (14%), se descarta la malla 4, quedando las mallas 1 2 y 3, donde el criterio que se suele utilizar es elegir la de menor coste computacional, pero al ser un caso en 2D, ninguna simulación de estas mallas alcanza los 10 minutos. Por tanto finalmente del análisis de convergencia de malla se aceptan las 3 mallas más finas.

Tras la elección de dichas mallas, el próximo paso a realizar es la comparación de estas con los resultados experimentales, donde podremos observar cuál de ellas representa mejor dichos resultados. Para lo cual lo primero es obtener los datos experimentales, lo cual se explica detalladamente en el próximo capítulo “3.3.2 Toma de datos experimentales”, una vez obtenidos dichos datos de presiones en los distintos puntos del tubo Venturi (antes del estrechamiento, durante el mismo, y posteriormente mientras se estabiliza), se representa dicho perfil de presiones experimentales, posteriormente se obtienen los perfiles de presiones de las mallas 1, 2 y 3 mediante una línea horizontal a 2 milímetros de distancia de la pared del estrechamiento del tubo Venturi, (que es donde están instalados los medidores de presión) como podemos observar en la imagen 3.20 que ya se utilizó para tomar los datos para el análisis de convergencia de malla.



Figura 3.20. Segmento para la toma de datos del modelo.

Una vez realizados los diferentes pasos explicados anteriormente para obtener los datos y tras pasarlos a Excel, procederemos a comparar gráficamente las 3 mallas seleccionadas tras la realización del análisis de convergencia de malla con el perfil de presiones del modelo experimental, esto se verá en el capítulo 4.

3.3 MODELO EXPERIMENTAL

3.3.1 Descripción del modelo

En este punto vamos a profundizar en la composición del modelo experimental sobre el cual hemos trabajado y realizado todos los cálculos, para poder explicar detalladamente como se ha procedido a la obtención de estos datos experimentales.

Dicho modelo experimental estaba compuesto por:

- Una bomba centrífuga de 750w, con una capacidad de caudal máximo de 13.500 l/h y con una altura máxima tanto de bombeo como de succión de 7 metros. (Figuras 3.22 y 3.23).



Figura 3.22 y 3.23. Bomba utilizada en el modelo experimental.

- Un rebosadero de agua, dicho sistema se utiliza para mantener la cota del depósito de entrada (y, por tanto, el caudal) constante, cuyo nivel de entrada desde el escape de agua hasta la salida de la parte inferior hacia el tubo venturi es de 27cm. (figura 3.24).



Figura 3.24. Rebosadero de agua.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

- Vaso de llenado, para poder medir el caudal que sale después del tubo venturi, midiendo con un cronometro cuanto tiempo cuesta llenarse 1 litro de agua. (figura 25)



Figura 3.25. Vaso de llenado.

- Tubo venturi, estructura de PVC, con un estrechamiento en su parte central donde se produce una caída de presión, que dispone de 11 tubos que miden la altura de presión en cada uno de dichos puntos, además dispones de una válvula con la que se controla el caudal que entra a dicho tubo venturi. (Figura 3.26)



Figura 3.26. Tubo Venturi experimental. (Dispositivo apagado)

3.3.2 Toma de datos experimentales

Una vez explicados los elementos de los que dispone el tubo Venturi real utilizado en este trabajo final de grado, se procede a explicar el manera en que han sido tomados los datos para poder desarrollarlo:

1. Conectamos a la corriente la bomba de la figura 3.23.
2. Regulamos el caudal que queremos tener, mediante la válvula que aparece en la figura 3.26.
3. Para medir el caudal con el que estamos trabajando, se hace uso de un cronómetro y sacando la manguera por la que cae el agua que sale del tubo venturi y metiéndola en el vaso de llenado esperamos hasta se llene 1 litro para obtener el caudal (l/s).
4. Una vez conocido el caudal de trabajo, pasamos a tomar los datos de los medidores de presión, cuando una vez estabilizado el caudal simplemente se anota el valor en que llega la columna de agua, en la siguiente imagen podemos verlo gráficamente:

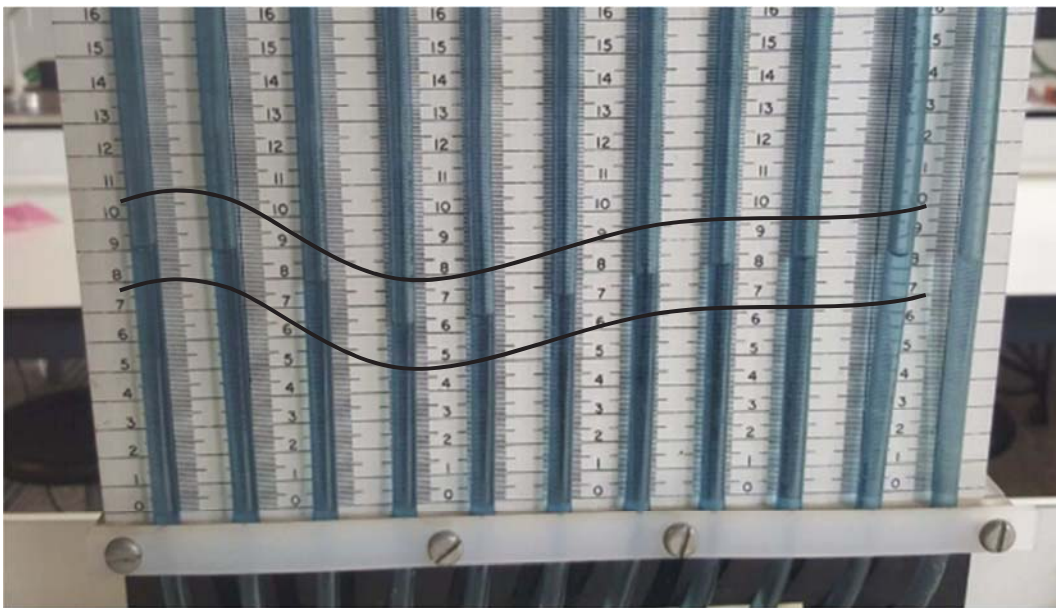


Figura 3.26. Tubos medidores de presión.

5. Con estos datos de caudal y altura de presión ya disponemos de los datos necesarios para los cálculos realizados en el conjunto de este trabajo final de grado.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 ELECCIÓN DEL MODELO FINAL

El objetivo que se pretende en este punto es la selección de la malla que mejor represente nuestro caso de estudio para posteriormente poder realizar un análisis de los campos de presiones, velocidades y pérdidas de carga y finalmente modificar la geometría del tubo Venturi acorde a las nuevas especificaciones de succión con la malla seleccionada.

En primer lugar se van a presentar los datos tanto del análisis de convergencia de malla como de comparación con los experimentales, de las 3 mallas que no se descartaron en dicho análisis, para la elección de una de estas mallas para nuestro modelo final.

En la siguiente tabla 4.1, podemos ver el orden aparente de malla, que debe asemejarse al orden formal del modelo que es 1.

p321
1,503099253

Tabla 4.1. Orden aparente del conjunto de mallas 1,2 y 3.

Como vemos el valor se puede considerar como bueno al ser el conjunto que más se acerca al orden formal del modelo.

En la tabla 4.2, podemos observar los valores para la incertidumbre del conjunto de las 3 mallas 1,2 y 3.

GClfine,321
4,90%

Tabla 4.2. Incertidumbre del conjunto de mallas 1,2 y 3.

Podemos observar que el valor es menor al 10 % que es lo recomendable, y que además está por debajo del 5%, lo cual significa que el valor para la incertidumbre de la malla es muy bueno.

Por último en la tabla 4.3. y en la figura 4.1 podemos observar los valores de y+ (se explica en el punto 3.2.4) y la gráfica comparativa de las 3 mallas con el modelo real respectivamente (mostrada en el punto anterior), además se realiza una tabla 4.4. en la que se indican la diferencia media de valores en Pascales de ambas mallas con respecto al modelo real.

	y+
Malla 1	4
Malla 2	4,96
Malla 3	6,03

Tabla 4.3. Valores de y+ de las 3 mallas en estudio.

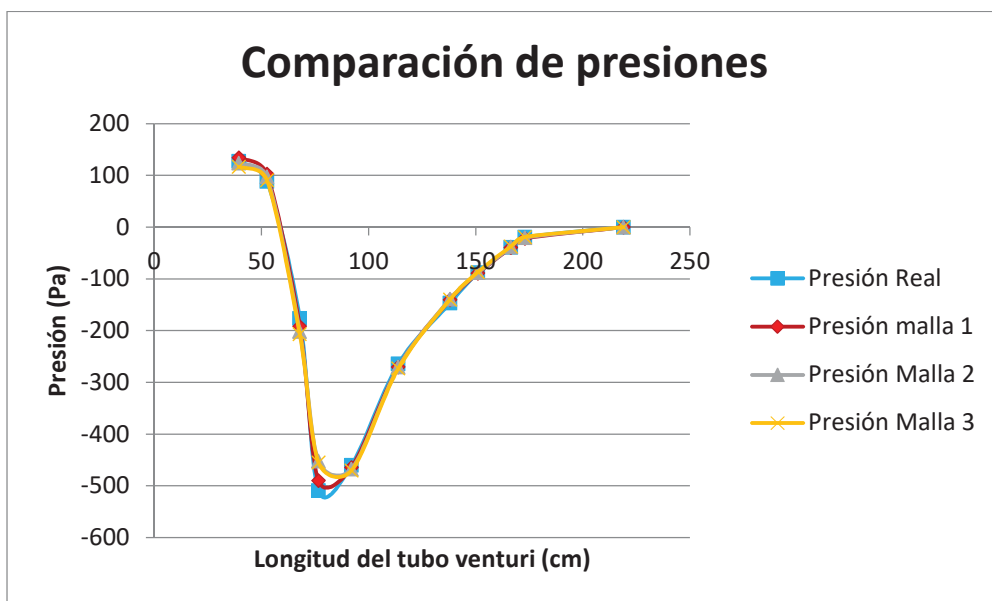


Figura 4.1. Comparación entre el resultado experimental y las 3 mallas en estudio.

	Diferencia media de presiones (Pa)
Malla 1	6,886236364
Malla 2	10,76298182
Malla 3	11,60924545

Tabla 4.4. Diferencia media de presiones en todos los puntos del tubo Venturi, de cada una de las 3 mallas en estudio con el modelo real.

Una vez analizados tanto los análisis de convergencia como la comparación con los datos experimentales, concluimos que la malla que mejor representa el caso de estudio es la más fina (número 1), además es una malla con una muy baja incertidumbre (debajo del 5%), y aunque el valor de y^+ no se encuentra en el intervalo de (5 - 30), podemos aceptar la malla debido a que es la que mejor representa los datos experimentales, además como es un modelo en 2D, aunque se elija la malla más fina, su tiempo de simulación es inferior a 10 minutos.

Por tanto la malla elegida para representar el tubo Venturi del laboratorio y su futuro rediseño será la malla 1.

4.2 ANÁLISIS DE CAMPOS

En el apartado que se describe a continuación se pretende abordar el análisis de distintos campos como son los campos de velocidades, presiones y pérdidas de carga. En particular, se realiza un detallado análisis de la malla escogida en el apartado 4.1.

A continuación se van a representar 3 figuras en las que se pueden apreciar 3 magnitudes muy importantes a la hora de diseñar un tubo Venturi para la aplicación industrial que sea, la presión, la velocidad y las pérdidas de carga (figuras 4.2, 4.3 y 4.4 respectivamente). Después de cada figura se realizará un pequeño análisis de las causas y consecuencias que provocan los efectos que se aprecian en dichas gráficas.

Para comenzar, la primera figura que se va a analizar es la representación del campo de velocidades a lo largo de todo el dominio modelado. Como podemos observar, la velocidad es nula cuando el fluido en estudio está en contacto con la superficie sólida de la pared del tubo Venturi.

Por otro lado podemos observar que la velocidad a la entrada del tubo Venturi permanece constante durante el primer tramo del tubo Venturi hasta que se produce el estrechamiento, durante el cual debido a la Ecuación de Bernoulli (explicada con más detalle en el punto 2.1.2) al disminuir la sección del tubo aumenta la velocidad, hasta alcanzar las máximas velocidades en las zonas más estrechas del tubo Venturi.

En la zona en la que el tubo Venturi va recuperando su sección máxima se puede observar el fenómeno que se denomina despegue de la capa límite, en la que el flujo a gran velocidad no sigue la trayectoria de la pared del tubo Venturi.

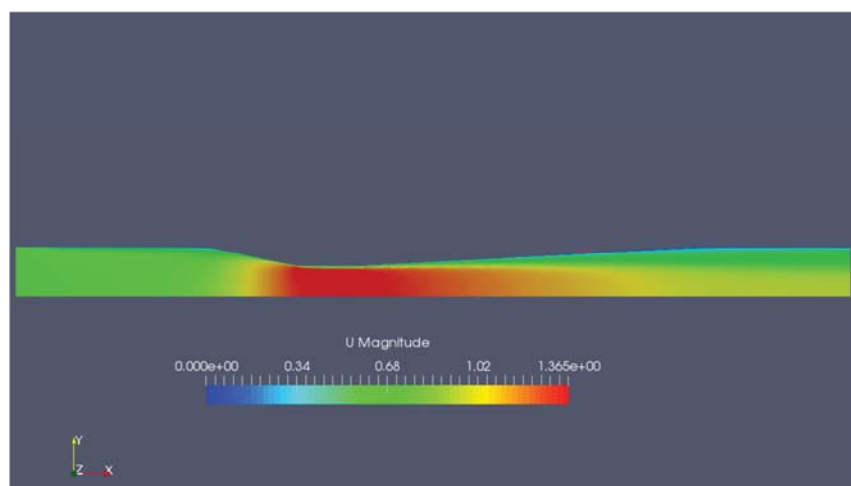


Figura 4.2. Representación gráfica del campo de velocidades a lo largo del tubo Venturi.

Continuaremos con la figura 4.3 la cual consiste en la representación gráfica del campo de presiones a lo largo del tubo Venturi en estudio. Podemos observar justo en el momento en que el tubo Venturi empieza a estrecharse un ligero aumento de la presión debido a que el flujo choca contra la pared del tubo Venturi (circulo rojo), pero que rápidamente la presión va disminuyendo hasta alcanzar su valor mínimo en la sección más estrecha del tubo Venturi,

como vemos coincide con el punto en que la velocidad alcanza su valor máximo como bien explica la ecuación de Bernoulli anteriormente citada.

Podemos observar que la presión en el tramo final del tubo Venturi, aunque ya esta estabilizada nunca llega a alcanzar la presión inicial, esto se debe a las pérdidas de carga que se dan en el conjunto de puntos del tubo Venturi, como veremos con más detalle a continuación.



Figura 4.3. Representación gráfica del campo de presiones a lo largo del tubo Venturi.

Para finalizar, con los resultados obtenidos de la malla que se ha elegido, vamos a proceder a calcular las pérdidas de carga totales del dispositivo Venturi, para ello aplicamos la ecuación de Bernoulli entre el primer punto del tubo Venturi (punto A) y el último punto de dicho tubo (punto K), con los datos de presión y velocidad de ambos puntos que han resultado de la simulación de la malla elegida, en la siguiente figura 4.4 podemos observar la ecuación a realizar, la cual ya se cito en el punto 2.1.3:

$$y_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + \sum \lambda$$

Figura 4.4. Ecuación de Bernoulli entre 2 puntos, sin despreciar las pérdidas de carga.

Asumiendo que la cota $y_1=y_2$, y resolviendo obtenemos unas pérdidas de carga totales para el tubo Venturi en estudio de 0.0121 m, cuando mediante el cálculo experimental obteniamos unas pérdidas de carga totales de 0.013 m. Por lo cual volvemos a encontrarnos con un dato bastante cercano a lo que dicen los ensayos experimentales.

4.3 Nuevo diseño

4.3.1 Rediseño del modelo frente a especificaciones

En este apartado, se ha procedido a rediseñar con el programa AutoCad, el tubo Venturi que hemos estudiado a lo largo de este trabajo final de grado, en base a conseguir unos parámetros de presión específicos, lo que en cualquier ámbito industrial podría ser un proyecto real en el que se deseen conseguir unos requerimientos dados.

Por tanto, a partir del diseño experimental se busca la malla óptima que nos proporcione los datos más semejantes al diseño experimental, mediante el análisis de convergencia de malla y la posterior comparación con los datos experimentales, una vez hecho esto se describen los fenómenos que provocan los distintos cambios en las variables a estudiar (presión y velocidad) y con toda esta información se procede al rediseño del tubo Venturi, para provocar mayores o menos caídas de presión que es el parámetro que se ha elegido como especificación a conseguir.

Por tanto, como hemos explicado en el apartado 4.2.2. las presiones mínimas se obtienen en el estrechamiento del tubo Venturi, por tanto si queremos conseguir una succión determinada deberemos diseñar un tubo Venturi en el cual el diámetro del estrechamiento sea menor que el anterior, en la siguiente figura 4.5. podemos observar el nuevo diseño:



Figura 4.5. Diseño del nuevo tubo Venturi

En dicha imagen podemos apreciar como respetando las mismas secciones a la entrada y a la salida del dominio modelado, se ha acentuado el estrechamiento, pasando de un diámetro del estrechamiento de 2 cm, a 1 cm, ya que como hemos visto es la zona donde se produce la mayor caída de presión.

Después se procede a la toma de datos aplicando el procedimiento explicado en el punto 3.2.3. utilizando la herramienta *Plot Over Line*, una vez ya exportados los datos a Excel se representa gráficamente las diferencias de presiones entre un diseño y otro, como podemos observar en la gráfica 4.6:

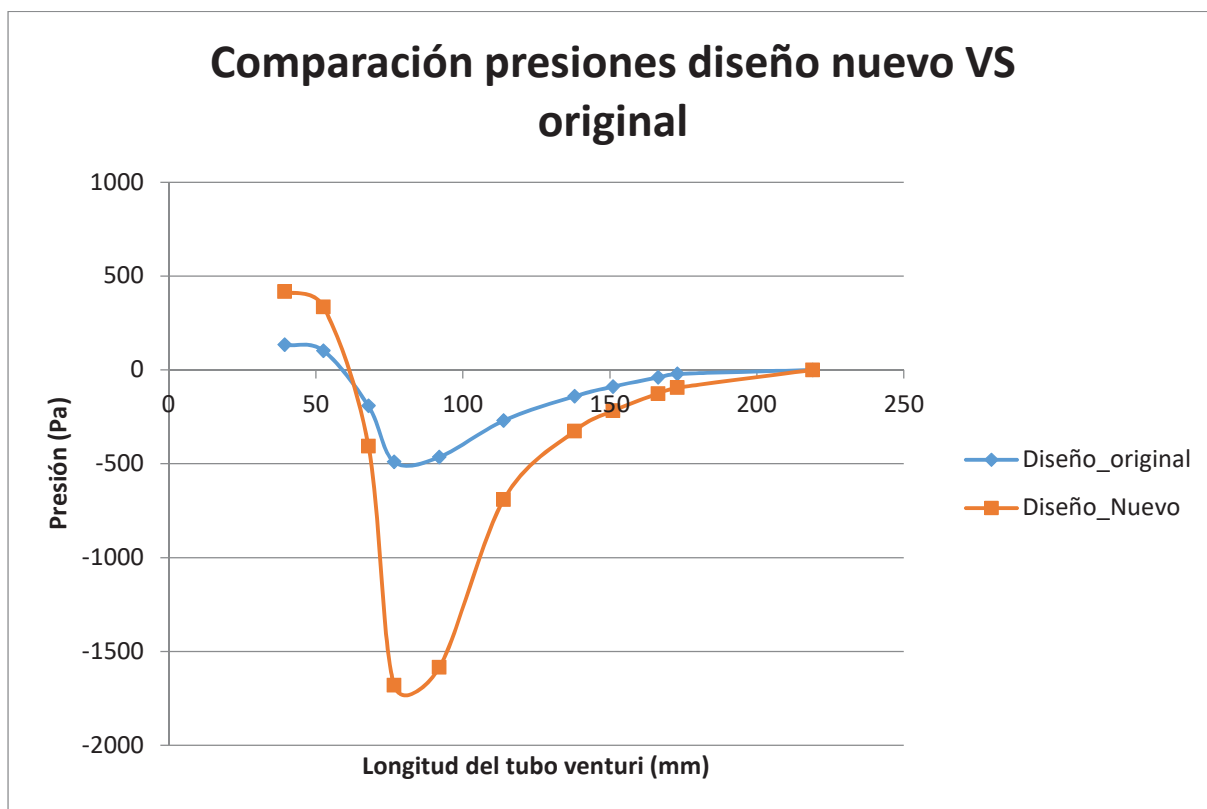


Figura 4.6. Comparación de presiones entre ambos diseños.

Por tanto podemos observar que ante un requerimiento industrial por cualquier motivo de que nuestro dispositivo Venturi deba alcanzar mayores succiones de hasta -1500 Pa, podríamos utilizar este nuevo tubo Venturi.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente trabajo final de grado se ha propuesto una metodología de análisis, aplicando técnicas CFD, para el diseño de los denominados tubos Venturi. Para lo cual se ha elegido un tubo Venturi real localizado en la universidad politécnica de valencia del cual se dispone de todos los datos experimentales necesarios para poder realizar una rigurosa validación de estos modelos, las leyes físicas son las propias de un problema clásico de la dinámica de fluidos, con un flujo a presión recorriendo una tubo con un estrechamiento.

Primeramente, se han realizado dichos estudios utilizando 6 modelos de malla diferente según el tamaño de la malla, con un mismo modelo de turbulencia, ya que se ha decidido estudiar una posible modificación del diseño a lo que podría ser un proyecto real a nivel industrial, que estudiar las posibles diferencias entre utilizar un modelo de turbulencia u otro.

Análisis pérdidas de carga en tubos Venturi mediante técnicas CFD

Posteriormente se ha realizado un estudio para caracterizar la incertidumbre de las mallas utilizadas llevando a cabo un riguroso análisis de convergencia de malla, el cual está recomendado por la ASME.

Tras realizar dicho análisis de convergencia de malla, se realiza una comparación de todos los datos simulados en cada una de las mallas, con los datos experimentales, para comprobar que modelo representa mejor dichos datos experimentales.

Una vez realizados y comentados todos estos análisis a lo largo del documento, obtenemos que existen 3 mallas con un nivel de incertidumbre aceptado, siendo la malla 1,2 y 3, es decir las 3 más finas, y tras concluir que todos los tiempos de simulación son aceptables al tratarse de un caso en 2D, y que la malla que mejor representa los datos experimentales es la 1 (la más fina), se decide utilizar dicha malla para las futuras simulaciones.

Además una posible línea de trabajos futuros a partir de este proyecto podría ser la última parte desarrollada en este proyecto, en el cual se ha realizado un diseño modificado del tubo Venturi a partir de la malla elegido tras los análisis, lo cual perfectamente podría ser un requerimiento real a nivel industrial, y como posibles líneas de trabajos futuros que se podrían resolver con la metodología propuesta en este trabajo final de grado podría ser el diseño de cualquier dispositivo Venturi o cualquier otro elemento singular con las mismas características de flujo a presión, respondiendo a requerimientos específicos reales.

- [23] AIMS Press. <http://www.aimspress.com/fileOther/PIC/Math/Math-01-00043-g001.jpg>
- [24] CFD Online. *SIMPLE algorithm*. https://www.CFD-online.com/Wiki/SIMPLE_algorithm
- [25]CFDOnline.https://www.CFDonline.com/W/images/6/6a/lmg_lawOfTheWall_whiteBG.png
- [26] Open FOAM. <http://www.openfoam.com/>
- [27] Apuntes de Mecánica de Fluidos Computacional Aplicada. *WorkShop 1: Introducción a OpenFOAM*. Luis Parras, Patricio Bohórquez. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Málaga, Universidad de Málaga, España. Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Jaén, Universidad de Jaén, España. Junio 2010. <<http://blogs.ujaen.es/prmedina/wpcontent/uploads/2014/04/workshop1.pdf>>
- [28] Ismail B. Celik, Urmila Ghia, Patrick J. Roache, Christopher J. Freitas, Hugh Coleman and Peter E. Raad (22 Julio 2008). "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications" en THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.
<http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1434171>

PRESUPUESTO

PRESUPUESTO

1. NECESIDAD DEL PRESUPUESTO

En este punto el objetivo es cuantificar económicamente el coste de las horas trabajadas (tanto por el autor del trabajo, como por las máquinas que se han utilizado), y también de los materiales utilizados.

2. CONTENIDO DEL PRESUPUESTO

2.1. Coste del personal

Para el cálculo del coste de personal, se aplica la siguiente ecuación P.1.:

$$\text{Coste (€)} = \text{Precio}/_h * \text{horas de trabajo} \quad \text{P.1}$$

Considerando el coste a la hora para un ingeniero industrial recién titulado de 10.20 €/hora. Podemos observar en la siguiente tabla P.1. el desglose realizado del coste personal distribuido en función de la tarea realizada.

Descripción de tarea	Precio (€/h)	Horas	Coste parcial (€)
Búsqueda de información	10,20	35	357
Programación en OpenFOAM	10,20	100	1020
Análisis de resultados	10,20	70	714
Diseño AutoCad	10,20	25	255
Redacción de documentos	10,20	70	714
	TOTAL	300	3060

Tabla P.1. Costes de personal asignado a cada tarea.

2.2. Coste del personal

Ahora procedemos a hallar el coste de los materiales utilizados, como podemos observar en la ecuación P.2, donde calculamos los costes de los distintos materiales utilizados según su periodo de amortización.

$$\text{Coste (€)} = \text{Precio} * \frac{\text{horas de uso}}{8760/\text{año}} * \frac{1}{\text{periodo de amortización (años)}} \quad \text{P.2.}$$

El periodo de amortización que se ha considerado es de 5 años, tanto para el software como para el hardware informático que se ha utilizado, como podemos ver en la siguiente imagen P.2

Material	Precio (€)	Horas de uso	Periodo de amortización	Coste (€)
Ordenador portatil ASUS (Windows)	299,00	165	5	1,13
Ordenador portatil ACER (Linux)	149,50	135	5	0,46
Microsoft office	80,00	105	5	0,19
OpenFOAM	0,00	135	5	0,00
Licencia AutoDesk (AutoCad)	471,90	25	5	0,27
TOTAL				2,05

Tabla P.2. Coste de materiales.

2.3. Material fungible

Descripción	Coste (€)
Paquete de folios (100 uds)	4,00
Impresión	13,00
Encuadernación	2,50
TOTAL	19,50

Tabla P.3. Material fungible.

2.3. Costes finales

Descripción	Coste (€)
Coste del personal	3060,00
Coste de materiales	2,05
Material fungible	19,50
TOTAL	3081,55

Tabla P.4. Costes finales.