



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERIA QUÍMICA

**APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN TUBO DE VENTURI,
VÁLVULA DE COMPUERTA Y CODO DE 90 COMO
COMPLEMENTO DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE MECÁNICA
DE FLUIDOS DE IQ-ESPOCH**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR(A)/(ES):

JOSE REY RUIZ GANCHOZO

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN TUBO DE VENTURI,
VÁLVULA DE COMPUERTA Y CODO DE 90 COMO
COMPLEMENTO DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE MECÁNICA
DE FLUIDOS DE IQ-ESPOCH**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR(A)/(ES): JOSE REY RUIZ GANCHOZO

DIRECTOR(A): ING. DANIEL ANTONIO CHUQUÍN VASCO

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Jose Rey Ruiz Ganchozo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Jose Rey Ruiz Ganchozo, declaro que el presente Trabajo de Titulación es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 6 de diciembre de 2023



Jose Rey Ruiz Ganchozo

120686460-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación de certifica que: El Trabajo de Titulación ; tipo: Proyecto Técnico, **APLICACIÓN DE MODELOS CFD EN UN TUBO DE VENTURI, VÁLVULA DE COMPUERTA Y CODO DE 90 COMO COMPLEMENTO DIDÁCTICO DE LA CÁTEDRA DE MECÁNICA DE FLUIDOS DE IQ-ESPOCH**, realizado por el señor: **RUIZ GANCHOZO JOSE REY**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Cesar Arturo Puente Guijarro PhD. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	 _____	06-12-2023
Ing. Daniel Antonio Chuquín Vasco Mgs. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	06-12-2023
Ing. Carlos Ramiro Cepeda Godoy Mgs. ASESOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	 _____	06-12-2023

DEDICATORIA

Quisiera dedicar las incontables horas de esfuerzo en este trabajo y los cuatro años de estudio en mi formación integral especialmente a mis padres Robinson Eduardo y María José, por darme la oportunidad de adentrar en el hermoso camino del conocimiento y por todo su apoyo que me ha permitido soñar y creer que es posible hacer realidad esos sueños que, sin duda, gracias a ellos cada día se sienten más palpables.

Jose Rey

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profunda gratitud a mi *alma mater* la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, por brindarme tantas experiencias satisfactorias y por rodearme de personas tan influyentes, por mover las piezas del rompecabezas para encontrarme en este punto, donde empiezan tantos sueños, donde se ilumina un sendero lleno de ilusión, en donde todo es ostensible.

Gracias a aquellas personas que formaron parte de esta etapa, amigos y docentes que han compartido su valioso conocimiento. Mi gran amigo Luis Adrián y el director de este trabajo, el Ing. Daniel Antonio Chuquín, mi más sincero agradecimiento por servir de guía durante todo este proceso.

Jose Rey

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
SUMMARY / ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Planteamiento del Problema.....	2
1.2. Justificación.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos.....	3

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de investigación.....	5
2.1.1. CFD como complemento didáctico.....	5
2.1.2. CFD para el estudio de procesos en la ingeniería química.....	6
2.1.3. CFD como estudio y complemento de la mecánica de fluidos.....	6
2.2. Referencias Teóricas.....	8
2.2.1. Fundamentos de hidráulica básica.....	8
2.2.1.1. <i>Propiedades de los fluidos</i>.....	8
2.2.1.2. <i>Ecuaciones fundamentales</i>.....	9
2.2.1.3. <i>Conservación de la energía – Ecuación de Bernoulli</i>.....	10
2.2.1.4. <i>Número de Reynolds</i>.....	10
2.2.2. Pérdidas de carga.....	11
2.2.2.1. <i>Pérdidas primarias</i>.....	11
2.2.2.1. <i>Pérdidas secundarias</i>.....	12
2.2.2.2. <i>Codos</i>.....	12
2.2.2.3. <i>Válvulas</i>.....	13

2.2.2.4. Componentes comunes de las válvulas	13
2.2.2.5. Válvula de compuerta	15
2.2.3. Efecto Venturi	15
2.2.3.1. Tubo de Venturi.....	16
2.2.4. Dinámica de fluidos computacional.....	17
2.2.4.1. Ecuaciones de flujo	17
2.2.4.2. Modelos de turbulencia.....	18
2.2.4.3. Discretización	19
2.2.4.4. Mallado.....	20
2.2.4.5. Ansys Fluent.....	21

CAPITULO III

3. Marco metodológico.....	23
3.1. Materiales	23
3.2. Esquema para el desarrollo metodológico de la simulación.....	24
3.3. Definición del modelo	24
3.3.1. Revisión bibliográfica	24
3.3.2. Geometrías y modelado CAD.....	25
3.3.3.1. Codo de 90° y 45°	25
3.3.3.2. Válvula de compuerta	26
3.3.3.3. Tubo de Venturi	27
3.4. Mallado	27
3.5. Parámetros de simulación	30
3.6. Solución y reportes.....	31
3.7. Método para prácticas de dinámica de fluidos computacional.....	32

CAPÍTULO IV

4. Resultados	33
4.1. Modelos CAD.....	34
4.2. Visualización de resultados y validación.....	34
4.2.1 Pérdidas de carga secundarias para codos de 90°	34
4.2.2. Pérdidas de carga secundaria en una válvula de compuerta usando dos grados de apertura $a/D=0.50$ y $a/D=0.75$	39
4.2.3. Pérdidas de carga y medición de caudal en tubos de Venturi.....	43

4.3.1. Análisis computacional de pérdidas menores en tuberías, ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en varios regímenes de flujo.... 47

CONCLUSIONES.....	47
RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	1
ANEXOS.....	6

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2- 1: Factor de fricción según el régimen de flujo	11
Tabla 3-1: Recursos utilizados durante el desarrollo del proyecto.	23
Tabla 3-2: Resumen de la literatura revisada.....	25
Tabla 3-3: Parámetros para las simulaciones	30
Tabla 3-4: Detalle para metodología prácticas de simulación numérica CFD.....	32
Tabla 4-1: Número de iteraciones empleadas en la simulación.....	33
Tabla 4-2: Valores de presión mínima y máxima para la geometría de codo a 90°, ver ilustración 4-1	36
Tabla 4-3: Valores de velocidad máxima para la geometría de codo a 90°, en todos los casos la velocidad mínima fue 0 (m/s), ver ilustración 4-2	37
Tabla 4-4: Valores de “k” calculados en la simulación (Codo 90°) y resultados de otros autores	38
Tabla 4-5: Valores de presiones máximas y mínimas para una válvula de compuerta de ¾” en varios regímenes de flujo (L, laminar; T, turbulento) y aperturas, ver ilustración 4-4	40
Tabla 4-6: Valores de presión máxima y mínima para una válvula de compuerta de ¾” en varios regímenes de flujo (L, laminar; T, turbulento) y aperturas, ver ilustración 4-5.....	42
Tabla 4-7: Valores de “k” calculados en la simulación (válvula de compuerta) y resultados de otros autores	42
Tabla 4-8: Porcentaje de error para los sistemas evaluados ($a/D=0.5$ y $a/D=0.75$) respecto a Esteves & Cristianini (2012).....	43
Tabla 4-9: Valores de presión máxima y mínima para un Tubo Venturi en distintas presiones de entrada, ver ilustración 4-7.....	45
Tabla 4-10: Valores de velocidad máxima para un Tubo Venturi en distintas presiones de entrada, en todos los casos la velocidad mínima fue 0 (m/s), ver ilustración 4-8.....	46
Tabla 4-11: Comparación entre los valores obtenidos por Tang et al., (2019) y los simulados	46

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1: Codo de 45°, Codo de 90° y retorno de 180°.....	13
Ilustración 2-2: Partes comunes en válvulas (válvula de globo)	14
Ilustración 2-3: Accionamiento de una válvula de compuerta	15
Ilustración 2-4: Representación del efecto Venturi.....	16
Ilustración 2-5: Tubo de Venturi.....	16
Ilustración 2-6: Malla estructurada para geometría de codo de 90°	21
Ilustración 2-7: Malla no estructurada para la geometría de codo de 90°	21
Ilustración 3-1: Metodología empleada en el desarrollo del trabajo	24
Ilustración 3-2: Geometría de codo a 90° con $R/r=1$	26
Ilustración 3-3: Válvula de compuerta configuraciones $a/D=0.5$ y $a/D=0.75$	27
Ilustración 3-4: Esquema de la geometría: tubo de Venturi.....	27
Ilustración 3-5: Malla no estructurada en geometría codo 90°.....	28
Ilustración 3-6: Refinamiento en malla para la geometría de válvula de compuerta	29
Ilustración 3-7: Malla no estructurada para una válvula de compuerta $a/D=0,75$	29
Ilustración 3-8: Mallado estructurado para la geometría de Tubo Venturi	30
Ilustración 4-1: Contornos de presión para la geometría de codo a 90° en distintos Reynolds, en las figuras el flujo de entrada es en la dirección $-z$	35
Ilustración 4-2: Contornos de velocidad para la geometría de codo a 90° en distintos Reynolds, en las figuras el flujo de entrada es en la dirección $-z$	36
Ilustración 4-3: Validación de resultados de la simulación (Codo 90°), coeficiente “k” vs número de Reynolds.....	39
Ilustración 4-4: Contornos de presión para una válvula de compuerta de $3/4$ ” en varios regímenes de flujo y aperturas. En las figuras, el flujo de fluido va de la dirección x a la $-x$	40
Ilustración 4-5: Líneas de corriente de velocidad para una válvula de compuerta de $3/4$ ” en varios regímenes de flujo y aperturas. En las figuras, el flujo de fluido va de la dirección x a la $-x$	41
Ilustración 4-6: Validación de resultados de la simulación (válvula de compuerta), coeficiente “k” vs número de Reynolds.....	43
Ilustración 4-7: Contornos de presión para geometría de Tubo Venturi a diferentes presiones de entrada.....	44
Ilustración 4-8: Contornos de velocidad para geometría de Tubo Venturi a diferentes presiones de entrada	45

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (CODO 90°)

ANEXO B: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (VÁLVULA DE COMPUERTA)

ANEXO C: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (TUBO DE VENTURI)

ANEXO D: GUIA DE PRÁCTICA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA (SIN RESOLVER)

ANEXO E: GUIA DE PRÁCTICA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA (RESUELTA)

RESUMEN

En el ámbito de la ingeniería química y mecánica de fluidos, la comprensión de fenómenos hidráulicos y pérdidas por accesorios es esencial. Ante la complejidad y costos experimentales, la simulación por CFD se presenta como herramienta valiosa. En esta investigación, se explora la aplicación de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en tres componentes esenciales: un tubo de Venturi, una válvula de compuerta y un codo de 90°, con la finalidad de adentrar en la complejidad hidráulica e incluir su uso como complemento didáctico en la mecánica de fluidos. A través de un método respaldado por revisión bibliográfica y el empleo del paquete Ansys® Student 2023 R2 se logró la recreación detallada de fenómenos hidráulicos, desde puntos de estancamiento hasta la detección de cavitación, además de proporcionar una visión detallada de la acción de principios fundamentales como la conservación del momentum y la continuidad. El modelo de turbulencia fue seleccionado entre k- ϵ o laminar según las características del flujo, mostrando un rendimiento sobresaliente en régimen turbulento, con errores porcentuales notoriamente inferiores en comparación con el régimen laminar. Los resultados obtenidos no solo amplían la comprensión fundamental de la mecánica de fluidos, sino que también respaldan la creación de guías de práctica específicas, enriqueciendo la enseñanza teórica con aplicaciones prácticas. Este enfoque meticuloso revela las complejidades de la dinámica de fluidos en sistemas de tuberías, subrayando la importancia de considerar las pérdidas menores en el diseño y operación de instalaciones industriales. Además, destaca la efectividad de la simulación CFD como una herramienta pedagógica y de investigación valiosa, superando limitaciones experimentales, especialmente en contextos académicos con restricciones de equipamiento y costos, permitiendo una comprensión más profunda y una aplicación más precisa de los conceptos teóricos en la formación de ingenieros altamente capacitados.

Palabras clave: <SIMULACIÓN CFD>, <ACCESORIOS DE TUBERÍAS>, <PÉRDIDAS MENORES>, <VÁLVULA DE COMPUERTA>, <CODO DE 90°>, <TUBO DE VENTURI>, <ANSYS FLUENT>, <ENSEÑANZA DE MECÁNICA DE FLUIDOS>, <MODELADO GEOMÉTRICO>, <FENÓMENOS HIDRÁULICOS>.

2101-DBRA-UPT-2023



SUMMARY / ABSTRACT

In the field of chemical engineering and fluid mechanics, the understanding of hydraulic phenomena and losses due to fittings is essential. In view of the complexity and experimental costs, CFD simulation is presented as a valuable tool. In this research, the application of Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations on three essential components: a Venturi tube, a gate valve and a 90° elbow, is explored in order to get into the hydraulic complexity and include its use as a didactic complement in fluid mechanics. Through a method supported by literature review and the use of the Ansys® Student 2023 R2 package, a detailed recreation of hydraulic phenomena was achieved, from stagnation points to cavitation detection, in addition to providing a detailed view of the action of fundamental principles such as conservation of momentum and continuity. The turbulence model was selected between $k-\epsilon$ or laminar depending on the flow characteristics, showing outstanding performance in turbulent regime, with notoriously lower percentage errors compared to the laminar regime. The results obtained not only extend the fundamental understanding of fluid mechanics, but also support the creation of specific practice guides, enriching theoretical teaching with practical applications. This meticulous approach reveals the complexities of fluid dynamics in piping systems, highlighting the importance of considering minor losses in the design and operation of industrial facilities. Furthermore, it highlights the effectiveness of CFD simulation as a valuable pedagogical and research tool, overcoming experimental limitations, especially in academic contexts with equipment and cost constraints, enabling a deeper understanding and more accurate application of theoretical concepts in the training of highly skilled engineers.

Key words: <CFD SIMULATION>, <PIPE ACCESSORIES>, <MINOR LOSSES>, <GATE VALVE>, <90° ELBOW>, <VENTURI PIPE>, <ANSYS FLUENT>, <FLUID MECHANICS TEACHING>, <GEOMETRIC MODELLING>, <HYDRAULIC PHENOMENA>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

La Mecánica de Fluidos es una rama fundamental de la Ingeniería Química, ya que permite el estudio del comportamiento de los fluidos y su aplicación en diversas industrias. En este sentido, la simulación numérica mediante modelos CFD se ha convertido en una herramienta importante para el análisis y diseño de sistemas hidráulicos. La presente tesis tiene como objetivo aplicar modelos CFD en un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90 como complemento didáctico de la cátedra de mecánica de fluidos de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Para lograr este objetivo, se propone modelar mediante un software CAD una válvula de compuerta, un codo de 90° y un tubo de Venturi. Posteriormente, se realizarán simulaciones mediante CFD con el software ANSYS® para analizar el comportamiento de un fluido que circula en estos elementos. Se analizarán las pérdidas de carga en válvulas, codos y un tubo de Venturi, lo que permitirá comprender cómo se comporta el flujo en cada uno de estos elementos y cómo influyen en la resistencia del sistema hidráulico.

Además, se elaborará una guía de práctica de simulación numérica para su uso en la cátedra de mecánica de fluidos de Ingeniería Química de la ESPOCH, con el fin de brindar a los estudiantes una herramienta más para comprender los conceptos teóricos de la mecánica de fluidos y aplicarlos en la práctica mediante la simulación numérica.

La aplicación de modelos CFD en accesorios de como complemento didáctico de la cátedra de mecánica de fluidos permitirá mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en la carrera de Ingeniería Química de la ESPOCH, al proporcionar a los estudiantes una herramienta práctica para la comprensión de los conceptos teóricos y el diseño de sistemas hidráulicos más eficientes.

CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es el área de conocimiento que estudia sistemas relacionados con el flujo de fluidos, mediante el uso de simulaciones numérica (Wendt et al. 2009, p. 6). La simulación CFD es adecuada para identificar la hidrodinámica dentro de procesos con geometrías complejas en las que se producen reacciones químicas y transferencias de calor y masa. CFD ha recibido mucha atención por parte de los investigadores en los últimos años, esto debido a su gran potencial para ahorrar tiempo en el proceso de diseño en comparación con las pruebas experimentales para la adquisición de datos y también por la cantidad de configuraciones con una alta resolución en espacio y tiempo (Lim 2021, p. 6).

El sinnúmero de aplicaciones y dispositivos que se pueden simular en CFD hacen que se vuelva incluso una herramienta didáctica, que se puede utilizar no solo para complementar el aprendizaje sino para mejorar bancos de prácticas de laboratorio. Las simulaciones CFD pueden, a un costo considerablemente menor acercar a los alumnos la posibilidad de observar fenómenos que de otra forma serían imposibles de estudiar (López et al. 2016, p. 11). En la ESPOCH, los actuales cursos de grado no siempre cubren temáticas de reciente desarrollo como uso de softwares y laboratorios virtuales. Para el estudio de la asignatura mecánica de fluidos en ingeniería química, los laboratorios de la facultad de ciencias no cuentan con un banco de accesorios amplio, y no existen medidores de caudal disponibles, por lo que urge implementar una herramienta para complementar este aprendizaje.

Este trabajo propone la modelación y simulación de un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90° usando dinámica de fluidos computacional, donde se analizarán las pérdidas de carga en los sistemas, para su posterior uso didáctico como guía de prácticas en la cátedra de mecánica de fluidos, para que los estudiantes de ingeniería química de la ESPOCH tengan una visión clara sobre el comportamiento y análisis de los fluidos mediante la visualización en 3D y uso del software ANSYS® Fluent.

1.2. Justificación

Debido a los avances científicos y tecnológicos que ocurren constantemente, la ingeniería se encuentra en intensos cambios. El uso de CFD constituye una variable crucial para el estudio práctico de la mecánica de fluidos. El modelado y simulación CFD exige la elección del método correcto de discretización y la solución de ecuaciones de modelos físicos-matemáticos para lograr una solución de flujo técnicamente utilizable mediante el cálculo aproximado de las ecuaciones. Las ecuaciones más utilizadas son, por ejemplo, las ecuaciones de Navier-Stokes, las ecuaciones de Euler, las ecuaciones de Stokes y las ecuaciones de potencial (Göebel 2021).

El estudio de Adair, Bakenov, Jaeger (2014, pp. 19–20) proporciona una visión detallada sobre el uso y la eficacia de incorporar la dinámica de fluidos computacional en un plan de estudios de ingeniería química tradicional. Demostrando que la inclusión de CFD les dio a los estudiantes una mejor apreciación de la ingeniería química en general y los estudiantes adquirieron un mejor conocimiento de conceptos simples. De esta manera, se busca contribuir a la enseñanza de habilidades de práctica profesional a estudiantes de pregrado de nivel intermedio de la ESPOCH.

La aplicación de simulaciones CFD como complemento didáctico en la cátedra de mecánica de fluidos se justifica por la necesidad de mejorar el estudio técnico-experimental de accesorios comunes en ingeniería química como, además de complementar su déficit como equipos de laboratorio, los cuales en un caso ideal serían adquiridos, sin embargo, las condiciones actuales y falta de presupuesto lo dificultan.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Aplicar modelos CFD en un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90 como complemento didáctico de la cátedra de mecánica de fluidos de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar mediante un software CAD un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90.

- Simular mediante CFD, con ayuda del software ANSYS® Fluent, el comportamiento de un fluido que circula en un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90.
- Analizar las pérdidas de carga en un tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90.
- Elaborar una guía de práctica de simulación numérica para su uso en la cátedra de mecánica de fluidos de Ingeniería Química de la ESPOCH.

CAPÍTULO II:

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de investigación

2.1.1 CFD como complemento didáctico

Una de las principales razones para la inclusión de CFD como complemento didáctico es contribuir a la enseñanza de habilidades de práctica profesional a estudiantes de pregrado de nivel medio. En el estudio de Adair, Bakenov, Jaeger (2014, p. 84) se aborda el tema “Fundamentación de un plan de estudios de ingeniería química tradicional utilizando la dinámica de fluidos computacional”, y se ha descrito el uso y eficacia de la inclusión CFD, dando a los estudiantes una mejor apreciación de la ingeniería química en general. Los resultados indican que el diseño de la interfaz usada brinda a los estudiantes una experiencia práctica, obtenida a través de un entorno interactivo y fácil de usar, y fomenta el autoaprendizaje de los estudiantes.

La metodología y enseñanza de la dinámica de fluidos computacional (CFD) a ingenieros a diseño ha sido descrita por Hu, Zhang, Xiong (2008, p. 10) con la combinación de conferencias, laboratorios y proyectos, se presentó CFD como una herramienta de diseño para estudiantes que no tenían una buena formación en matemáticas, dinámica de fluidos, transferencia de calor y programación. Se alcanzaron los propósitos de este curso, que eran ayudar a los estudiantes a comprender la aplicación de CFD en el diseño industrial, la estructura interna y el funcionamiento de los solucionadores de CFD, desarrollar su conocimiento de la mecánica de fluidos y la transferencia de calor, interpretar y validar los resultados de CFD y ser consciente de las trampas de las simulaciones CFD.

En el marco de investigaciones de la utilización de programas CFD, Miró-Herrero, Gozávez-Zafrilla (2008, p. 1) en su estudio sobre la enseñanza de la ventilación industrial, desarrolló una metodología basada en el uso de simulaciones obtenidas mediante CFD. Estas simulaciones se plasman en objetos de aprendizaje que son distribuciones de flujo estáticas o bien vídeos correspondientes a diferentes situaciones de diseño. Estos objetos facilitaron la comprensión práctica de cómo actúa la ventilación, así como el aprendizaje de reglas heurísticas sobre el diseño y disposición más adecuados de los elementos de ventilación.

2.1.2 CFD para el estudio de procesos en la ingeniería química

En el artículo de Fletcher (2022, pp. 299–304) se analizó el futuro de la dinámica de fluidos computacional (CFD) en las industrias de procesos químicos y simulación, concluyendo que hay un papel importante para los modelos CFD simplificados que pueden ser utilizados por ingenieros no especialistas para librar al analista de que haga el trabajo complejo sin dejar de tener confianza en los resultados. Fletcher afirma que los modelos CFD seguirán creciendo en importancia con más y más empresas, grandes y pequeñas, que la adoptarán para desarrollar y comprender el diseño de procesos y la ampliación/reducción de escala.

Según los hallazgos del estudio llevado a cabo por Golshan et al. (2020, p. 31) se ha evidenciado la necesidad de investigaciones adicionales en el campo de revisión e implementación CFD-MED (método de elementos discretos), técnica muy útil especialmente en la simulación de flujos fluido-sólido en ingeniería de procesos químicos. Proporcionando una introducción al modelado CFD-MED en sistemas de ingeniería de procesos, incluida la transferencia de calor y masa y fuerzas de largo alcance. Se explicó introduciendo las ecuaciones y el algoritmo de cada submodelo, y una revisión de las principales investigaciones en simulación de procesos de dos fases, como secado, recubrimiento, granulación, cristalización, reacciones químicas (incluyendo combustión, gasificación y pirólisis) y mezcla.

Dentro del secado, según Ramachandran et al. (2017, pp. 271-292) potentes herramientas computacionales como CFD ahora han reemplazado el método clásico de análisis numérico de procesos de secado basado en modelos experimentales, este autor en su artículo sobre “CFD en procesos de secado” presenta una revisión exhaustiva del poder computacional de los paquetes CFD y su aplicación en la simulación del proceso de secado. La revisión también cubre diferentes enfoques matemáticos utilizados en modelos de secado, los códigos CFD comerciales comúnmente disponibles y los modelos de turbulencia utilizados en simulaciones de problemas de secado.

2.1.3 CFD como estudio y complemento de la mecánica de fluidos

El análisis crítico de la literatura científica realizado por los autores (Stramaná et al. 2014, p. 2141; López et al. 2016, pp. 8-11) en sus artículos proporcionan una visión detallada y actualizada de las investigaciones previas en el campo de estudiaron el uso de Herramientas CFD como Apoyo al Aprendizaje de la Mecánica de los Fluidos de cuarto año de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Facultad Regional Mendoza Universidad Tecnológica Nacional, FRM

UTN. Para implementar CFD dentro de los programas de grado se relacionó prácticas de gabinete con investigaciones previas que se relacionaban con prácticas de laboratorio. Se simuló tuberías rectas, codos, placas orificio y tubos Venturi con distintas dimensiones, flujos confinados y no confinados, tuberías rectas de sección circular y placas planas respectivamente. Se compararon los resultados analíticos con resultados numéricos analizados, demostrando la extensa fenomenología que puede presentar la simulación CFD, claramente si estos estudios fueran realizados experimentalmente habría una gran demanda en costos de equipamiento.

Son distintos los autores que han integrado CFD como complemento en el estudio de la mecánica de fluidos, por ejemplo, el autor Wismer, Dosse, Barry (2022, p. 441) integró el uso del software ANSYS CFX en un curso introductorio de mecánica de fluidos de nivel junior basado en conferencias. Los estudiantes usaron ANSYS CFX no solo para generar visualizaciones de campos de flujo y presión, sino también para validar soluciones analíticas para flujos viscosos potenciales y laminares para diversas geometrías, condiciones de contorno y propiedades de fluidos, después de una breve introducción a la teoría del método de volumen finito. De igual manera con el trabajo de Sert, Nakiboglu (2007, p. 12) que trata sobre el posible uso de CFD en la enseñanza de la mecánica de fluidos a nivel de pregrado, afirmando que la facilidad de aprendizaje y uso y la accesibilidad son las características más importantes de un software educativo de este tipo.

En el artículo de Gajbhiye et al. (2020, p. 12) se analizó el uso de CFD en un curso de nivel avanzado en fenómenos de transporte/flujo de fluidos para el diseño de redes de tuberías, con idea de esto que puede ayudar a los estudiantes a implementar herramientas matemáticas modernas, así como a evaluar los protocolos estándar que se siguen en las industrias. En su artículo se implementó una metodología de enseñanza interactiva para analizar la hidrodinámica en varios accesorios de tubería (codo, curvatura, T y reductor) al visualizar el flujo. Las simulaciones CFD de accesorios de tubería brindaron una nueva experiencia de aprendizaje a los estudiantes que los ayudaría a predecir las caídas de presión en la red de tuberías industriales.

En el trabajo de Quishpe Songor (2021, p. 149), con la finalidad de presentar y ejecutar una herramienta virtual dentro de los laboratorios de hidráulica aplicada, realizó un manual de prácticas virtuales usando modelación numérica CFD. Presentando en este manual estructuras hidráulicas como: compuertas con descarga libre y sumergida, vertedero tipo WES y de pared delgada con descarga, bocatoma sumergida con conducción a presión, etc. Donde cada una de las las estructuras hidráulicas modeladas tuvo una validación con su respectiva verificación usando el software Flow 3D, donde se encontró una consistencia en los resultados obtenidos de las dos fuentes.

Proporcionando con este método, un procedimiento simple para representar numérica y gráficamente el comportamiento de los flujos en estructuras hidráulicas.

En el contexto de la investigación sobre la aplicación CFD para la enseñanza en el estudio de fluidos compresibles, realizado por los autores Rolny, Mancuso, Coussirat (2017, pp. 769–770); Rolny et al. (2018, pp. 1057–1058), los cuales han sido ampliamente reconocidos por sus contribuciones significativas al estado del arte. El objetivo de su trabajo fue el de aplicar la CFD a la resolución y visualización de flujos compresibles. La posibilidad del uso de CFD como herramienta para el análisis de la difícil fenomenología que poseen estos flujos, dando cabida a la posibilidad de representar visualmente cada detalle del flujo, esto genera un gran especial interés para el estudiante, y más si se toma en cuenta el alto valor que demandan estas representaciones si se hicieran mediante equipos y técnicas experimentales, técnicas que muchas veces no están al alcance de los presupuestos destinados a las universidades. Este trabajo llega a la conclusión de que es posible conseguir una metodología para mejorar el estudio de los conceptos relacionados con flujos compresibles.

2.2. Referencias Teóricas

2.2.1 Fundamentos de hidráulica básica

La mecánica de fluidos comprende el estudio de los fluidos (gases, líquidos, plasma y sangre) sea en movimiento o en reposo en función de sus propiedades específicas. Esta ciencia al ser tan básica e importante se encuentra presente en planes de estudio para los Ingenieros mecánicos, químicos, ambientales, petroleros y civiles. El estudio de esta ciencia abre las puertas a la comprensión de fenómenos afines al movimiento de fluidos, además del diseño y optimización de sistemas para su manipulación (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. viii). En este caso de estudio, se usa un líquido incompresible (agua), gobernado por distintas leyes que se definirán a continuación.

2.2.1.1 Propiedades de los fluidos

La mecánica de fluidos se ha desarrollado gracias al entendimiento de las propiedades de los fluidos y la aplicación de las leyes básicas de la mecánica y la termodinámica y a una experimentación ordenada (White 2008, p. 3).

- Fluido: Toda sustancia fácilmente deformable. El líquido se adapta a la forma del recipiente que lo contiene. Además, tiene la capacidad de fluir de trasladarse. Enlaces intermoleculares (fuertes, débiles).
- Densidad, peso y volumen específico: La densidad y el peso específico hacen referencia a la cantidad de masa y peso que puede formar parte de una unidad de volumen respectivamente. La inversa de la densidad corresponde al volumen específico.
- Gravedad específica: Está definida como el peso unitario del material dividido por el peso unitario del agua destilada a 4 °C.
- Viscosidad dinámica y cinemática: La viscosidad absoluta o dinámica es una fuerza de rozamiento interno y es asociada con la capacidad que posee un fluido a fluir libremente. Si la viscosidad absoluta se divide para la densidad se conoce como viscosidad cinemática (White 2008, p. 4).

2.2.1.2 Ecuaciones fundamentales

Es posible determinar el movimiento y estado de cualquier volumen fluido, si se utilizan los principios fundamentales de continuidad, cantidad de movimiento y de la energía. Los principios fundamentales se expresan tanto de forma diferencial e integral (de las Heras, Soldevila 2012, p. 14).

La ecuación de continuidad representa básicamente una ley de conservación de la materia. Esta afirma que si no existen fuentes (materia nueva de entrada) ni sumideros (materia que fluye escapa), entonces la masa dm contenida en cualquier volumen dV debe permanecer constante (Resnick, Halliday 2004, p. 444). La ecuación de continuidad en términos generales se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} + \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} + \frac{\delta\rho}{\delta t} = 0 \quad (1)$$

El principio de conservación de la cantidad de movimiento, según afirma de las Heras, Soldevila (2012, p. 36), es la variación de la cantidad de movimiento asociada a un volumen fluido es igual a la resultante de las fuerzas exteriores que actúan sobre él.

La ecuación de la cantidad de movimiento presentada por (Streeter, Wylie, Bedford 2000, p. 133) se expresa como:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \left(\rho \frac{dv}{dt} + v * \nabla v \right) = \nabla \bar{\tau} - \nabla p + \rho f \quad (2)$$

donde: t es el tiempo; p es la presión; ∇v es el gradiente de un espacio vectorial; v es la velocidad; ρ representa la densidad; $\bar{\tau}$ representa al tensor viscoso para fluidos newtonianos y f son las fuerzas volumétricas que actúan sobre el volumen de fluido infinitesimal.

2.2.1.3 Conservación de la energía – Ecuación de Bernoulli

Hay tres formas de energía que se toman en consideración cuando se analiza un problema de flujo de tuberías, la energía potencial debido a la elevación, la energía cinética debido a la velocidad y la energía de flujo o presión debido trabajo empleado para transportar el fluido (Mott et al. 2015, p. 166). La representación del balance energético del trayecto que realiza una partícula de fluido entre dos puntos concretos a lo largo de una línea de corriente se conoce como ecuación de Bernoulli, en la cual se supone un flujo ideal, incompresible, irrotacional y estacionario como en la ecuación 3 (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. 25).

$$z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{f1-2} \quad (3)$$

Donde z_1 y z_2 = Energías de elevación o posición, $\frac{P_1}{\gamma}$ y $\frac{P_2}{\gamma}$ = Energías de presión o flujo, $\frac{V_1^2}{2g}$ y $\frac{V_2^2}{2g}$ = Energías de velocidad, h_{f1-2} = Pérdidas de energía de la sección 1 a la sección 2.

2.2.1.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas, permite un análisis alternativo del inicio de la turbulencia, es decir, evaluar el comportamiento de un fluido según el régimen laminar o turbulento (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. 44). Si se considera un conducto cilíndrico a presión constante, se expresa de la siguiente manera:

$$Re = \frac{V * D}{\nu} \quad (4)$$

Dónde: V = Velocidad media; D = Diámetro interior del conducto (m); ν = Viscosidad cinemática del fluido (m²/s). De acuerdo con Mott et al. (2015, p. 231), si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, será laminar, es decir el flujo se mantiene estacionario y comportándose como una lámina delgada. Si el número de Reynolds es mayor que 4000, será turbulento, caracterizado por un movimiento desordenado, no estacionario y tridimensional. En el rango de números de Reynolds entre 2000 y 4000 es imposible predecir qué flujo existe; por tanto, se le denomina

región crítica, aquí se producen pequeñas ondulaciones que sin embargo son muy delgadas, este régimen se conoce como flujo en transición.

2.2.2 Pérdidas de carga

Cuando un fluido real (viscoso) fluye a través de una tubería, su energía se fracciona progresivamente a lo largo de las conducciones, a causa de la fricción interna y turbulencia, de esta manera se genera la reducción de la capacidad interna del sistema. Chuquín, Chuquín, Chuquín (2019, p. 40) sostiene que estas pérdidas se dividen en dos categorías: Las pérdidas primarias (Pérdidas por longitud de la tubería), y las pérdidas menores (accesorios presentes en la red de tuberías).

2.2.2.1 Pérdidas primarias

Este tipo de pérdidas se debe en gran parte a la viscosidad del fluido y al régimen de flujo, en un sistema de tuberías largo las pérdidas por fricción no se pueden despreciar. Las pérdidas por longitud comúnmente se calculan mediante la ecuación 5, Darcy-Weisbach, que asocia la pérdida de carga mediante un coeficiente de fricción f , la velocidad de flujo, las dimensiones de la tubería y la rugosidad según el material de la tubería (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. 40).

$$h_{long} = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 g D^5} \quad (5)$$

Dónde: f =factor de fricción (adimensional), L = Longitud de la tubería (m), Q =Caudal del tramo de estudio (m³/s), g =Gravedad (9,81 m/s²), D = Diámetro interior de la tubería (m), El cálculo del factor de fricción f se realiza en función del régimen de flujo, la tabla 2-1 muestra el factor de fricción y su dependencia en función del régimen:

Tabla 2- 1: Factor de fricción según el régimen de flujo

Régimen	Coefficiente de fricción	Dependencia
Laminar	$f_{laminar} = \frac{64}{Re}$	$f_{laminar} = f(Re)$
Turbulento liso	$f_{turb\ liso} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \frac{2.51}{Re\sqrt{f}}$	$f_{turb\ liso} = f(Re)$
Turbulento intermedio	$f_{turb\ int} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}}$ $= -1.8 * \log \left \frac{6.9}{Re} + \frac{\epsilon_r^{1.11}}{3.7} \right $	$f_{turb\ int} = f(Re, \epsilon_r)$

Turbulento rugoso	$f_{turb\ rug} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left \frac{\epsilon_r}{Re} \right $	$f_{turb\ rug} = f(\epsilon_r)$
-------------------	---	---------------------------------

Fuente: (White 2008, pp. 342-343)

2.2.2.1 Pérdidas secundarias

Las pérdidas que ocurren en tuberías cuando el fluido entra en contacto con accesorios de la instalación como uniones, codos, válvulas, instrumentos de medición etc., se denominan pérdidas secundarias o menores. Los accesorios pueden ser piezas especiales para cambios de dirección y derivaciones, dispositivos auxiliares que protegen y facilitan el funcionamiento de la red, como válvulas y ventosas. Las pérdidas secundarias no necesariamente son pequeñas; por ejemplo, una válvula parcialmente cerrada puede producir una caída de presión mayor que una tubería muy larga (White 2008, pp. 376-377).

El método más común para determinar las pérdidas secundarias y caídas de presión es la ecuación 6, demostrada por (Çengel, Cimbala, Balderas Tapia 2018, p. 348). Donde k es el coeficiente de pérdida (local) que depende del tipo de accesorio y del diámetro nominal.

$$h_{acc} = k \frac{V^2}{2g} \rightarrow h_{acc} = \frac{8kQ^2}{\pi^2 g D_{acc}^4} \quad (6)$$

2.2.2.2 Codos

Los codos son accesorios que se usan para cambiar la dirección del flujo según los grados especificados por los planos o diseños de tuberías, esto gracias a su forma curva. Las principales características son: su diámetro, ángulo, radio (dimensión desde el vértice hasta uno de sus arcos), espesores (grosor pared), aleación, junta y dimensión (Valiente Barderas 2016, p. 143). Existen codos que vienen preparados para la prefabricación de piezas de tubería, se denominan codos estándar y se presentan en la Ilustración 2-1:

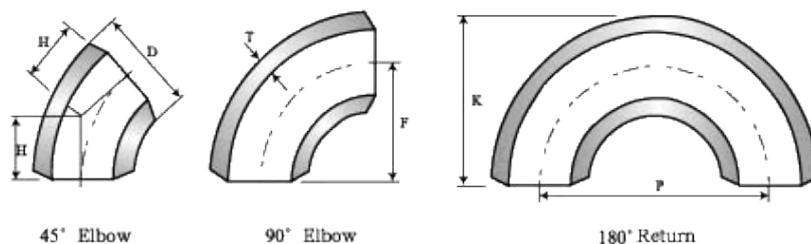


Ilustración 2-1: Codo de 45°, Codo de 90° y retorno de 180°

Fuente: Valiente Bardenas 2016, p. 143

Realizado por: Ruiz, J., 2023

2.2.2.3 Válvulas

Una válvula es un dispositivo capaz de controlar el flujo o la presión del fluido, esto lo hace mediante orificios variables. Su función es detener, desviar e iniciar el flujo, controlar el caudal, controlar la presión o aliviarla y evitar el contraflujo. Existen diferentes tipos de válvulas y es importante comprender sus capacidades y deficiencias. Las válvulas de compuerta, globo y retención son las más ampliamente usadas en muchas industrias (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. 84). Las válvulas se clasifican según la función que debe efectuar y son:

- *Válvulas de bloqueo o corte:* Este tipo de válvulas se usan para bloquear o aislar el flujo de fluidos cuando sea necesario en un sistema de distribución, se usa en mantenimientos. Impide o deja pasar caudal, dentro de esta clasificación se encuentran: válvula de compuerta, macho y bola.
- *Válvulas de regulación o estrangulamiento:* Se utilizan para regular el caudal o las presiones en las conducciones (Generar pérdidas), en función de los requerimientos del proceso y pueden ser de accionamiento manual o automático. Aquí se encuentran: Válvula de globo o asiento, tipo Y, mariposa y ángulo.
- *Válvulas de control, purga y seguridad:* Se utilizan cuando se requiere el desahogo o descarga de la presión cuando esta exceda la que se puede controlar. Proteger los equipos contra la sobre presión. Según su función pueden ser: Válvula de seguridad, desahogo, emergencia (Borja 2012, pp. 7-15).

2.2.2.4 Componentes comunes de las válvulas

Sin importar el tipo, todas las válvulas disponen de algunas partes comunes, indispensables para realizar su función. La ilustración 2-2 muestra una válvula típica (válvula de globo y sus componentes).

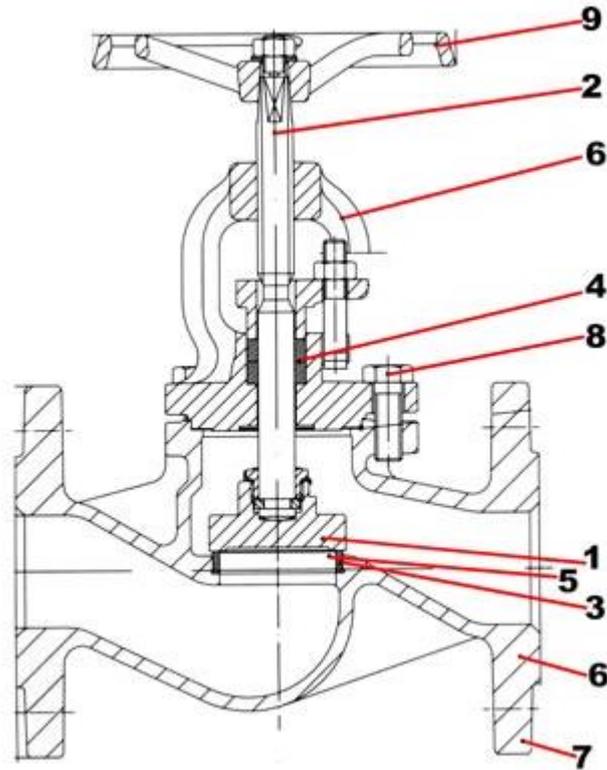


Ilustración 2-2: Partes comunes en válvulas (válvula de globo)

Fuente: COMEVAL VALVE SYSTEMS, 2019

Realizado por: Ruiz, J., 2023

1-Obturador: Esta pieza es la que permite, con su accionamiento, la interrupción física del fluido. También denominado disco en caso de que sea una parte metálica.

2-Eje: También conocido como husillo, esta es la parte que conduce y fija el obturador.

3-Asiento: Aquí se realiza el cierre, esta pieza encaja y se cierra debido al contacto con el obturador.

4-Empaquetadura del eje: Esta parte se monta alrededor del eje metálico para asegurar la estanqueidad atmosférica del fluido.

5-Juntas de cierre: Es la parte que montada alrededor del órgano de cierre asegura una estanqueidad más perfecta del obturador.

6-Cuerpo y Tapa: En estas partes se retiene la presión, y se encargan de envolver las partes internas de las Válvulas.

7-Extremos o juntas: Este componente permite la conexión a la tubería, pueden ser bridados, soldados, roscados, ranurados o incluso no disponerlos.

8-Pernos de unión: Son los componentes que unen entre sí el cuerpo y tapa de la válvula.

9-Accionamiento: Es el mecanismo que da acción a la válvula.

2.2.2.5 Válvula de compuerta

Estas válvulas sirven de encendido o apagado, es decir completamente abierta o cerrada, cuentan con compuertas de cuña que cuentan con ángulos de al menos 10° en sus asientos, donde esta cuña cruza pasaje general que controla el flujo. La característica fundamental de estas válvulas es su turbulencia y caída de presión, por lo tanto, las funciones que pueden brindar estas válvulas son: cierre completo sin estrangulación, operaciones no muy frecuentes y baja resistencia a la circulación. (Chuquín, Chuquín, Chuquín 2019, p. 87; Borja 2012, pp. 8-9). Ilustración 2-3 ilustra el funcionamiento de una válvula de compuerta.

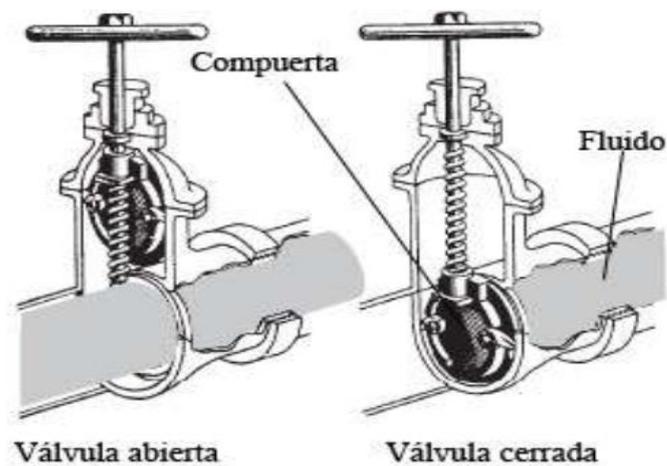


Ilustración 2-3: Accionamiento de una válvula de compuerta

Fuente: Valiente Bardenas 2016, p. 168

Realizado por: Ruiz, J., 2023

2.2.3 Efecto Venturi

El efecto Venturi es un fenómeno que consiste en una reducción del diámetro de un ducto, en el cual un fluido en movimiento circulando disminuye su presión debido al aumento de velocidad por este cambio de sección. El incremento de velocidad en ciertas condiciones puede ser bastante considerable, llegando a alcanzarse presiones negativas, en este punto es posible la aspiración del fluido si se introduce en el extremo un segundo conducto del mismo diámetro. Este tipo de efecto tiene su principal aplicación en la medición de la velocidad de flujo (Fauroux, Eterovic, Degaetani 2018, pp. 3-4). La Ilustración 2-4 muestra un tubo de Venturi, artefacto donde ocurre el efecto Venturi que se utiliza para medir el caudal.

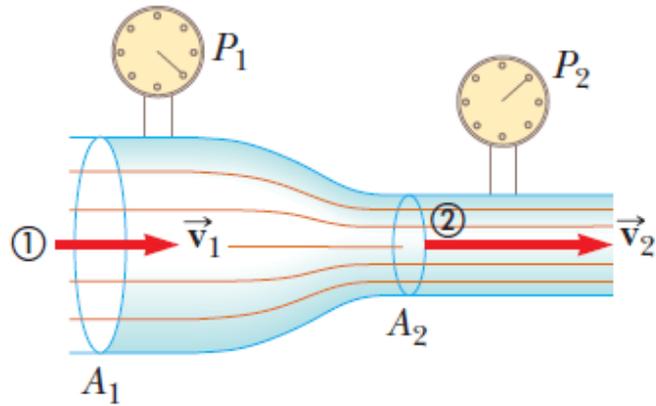


Ilustración 2-4: Representación del efecto Venturi

Fuente: García Gutiérrez 1999, p. 25

Realizado por: Ruiz, J., 2023

2.2.3.1 Tubo de Venturi

El tubo de Venturi se utiliza para medir la razón de flujo en una tubería, aprovechando el efecto Venturi explicado anteriormente. En esencia, el tubo de Venturi consta de una tubería corta recta (baja presión), o garganta, entre dos tramos cónicos (alta presión). Basándose en la ilustración 6-2, al colocar tomas de presión (manómetro diferencial) en la pared de la sección mayor A_1 y en la pared de la garganta o sección menor A_2 se puede medir la velocidad aprovechando el efecto de Venturi. Conociendo la velocidad antes y después del estrechamiento y calculando la caída de presión se halla fácilmente la velocidad en el punto problema (Valiente Barderas 2016, p. 218).

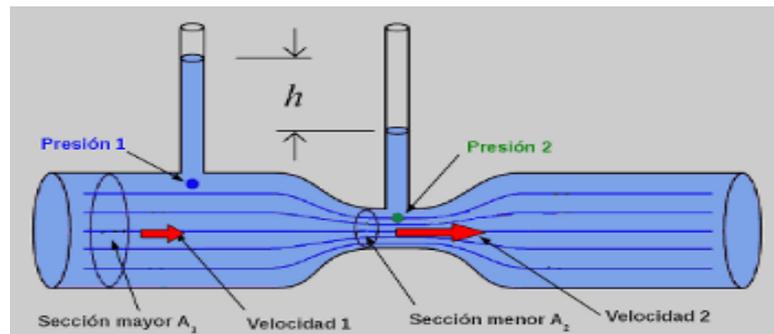


Ilustración 2-5: Tubo de Venturi

Fuente: Alandete 2019, p. 1

Realizado por: Ruiz, J., 2023

2.2.4 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional o CFD es el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y los fenómenos que gobiernan estos procesos, por medio de modelos numéricos determinísticos a partir de una malla en la zona del dominio actualizado. Aunque muchos todavía practican el método analítico y se seguirán realizando muchos experimentos, la tendencia es claramente hacia una mayor confianza en el enfoque computacional para los diseños industriales, particularmente cuando los flujos de fluidos son muy complejos (Versteeg, Malalasekera 2007, pp. 1-2).

La técnica es muy poderosa y abarca una amplia gama de áreas de aplicación industriales y no industriales como: ingeniería automotriz (reducción de coeficientes de arrastre para automóviles y camiones, mejora de la entrada de aire en motores, etc.), ingeniería biomédica (flujo de sangre en corazones artificiales y a través de olores, respiración, etc.), ingeniería química (líquido que fluye a través de tuberías) (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 3-4).

2.2.4.1 Ecuaciones de flujo

La simulación CFD se basa fundamentalmente en las ecuaciones que gobiernan la dinámica de fluidos, estas representan enunciados matemáticos de las leyes de conservación de la física. Para esto se formulan las bases matemáticas para un modelo diferencial de propósito general de flujo de fluidos y transferencia de calor, a partir de los principios básicos de conservación de masa, momento y energía (ecuaciones 7, 8 y 9 respetivamente) en tres dimensiones. Las ecuaciones de gobierno se derivan de la consideración de un pequeño volumen de control infinitesimal para conservar la masa y la energía, y que la fuerza neta que actúa sobre el volumen de control es equivalente a la tasa de cambio del momento lineal en el tiempo (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 65-68).

$$\begin{aligned} & \left(\rho\mu - \frac{\partial(\rho\mu)}{\partial x} \frac{1}{2} dx \right) dydz - \left(\rho\mu + \frac{\partial(\rho\mu)}{\partial x} \frac{1}{2} dx \right) dydz \\ & + \left(\rho\nu - \frac{\partial(\rho\nu)}{\partial y} \frac{1}{2} dy \right) dx dz - \left(\rho\nu + \frac{\partial(\rho\nu)}{\partial y} \frac{1}{2} dy \right) dx dz \\ & + \left(\rho w - \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} dz \right) dx dy - \left(\rho w + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \frac{1}{2} dz \right) dx dy \end{aligned} \quad (7)$$

Dónde: ρ = Densidad; μ, ν, w = Vectores de velocidad; t = Tiempo; x, y, z = Coordenadas; p = Presión; T = Temperatura

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial(-p + \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + SM_y \quad (8)$$

$$\rho \frac{Dw}{Dt} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial(-p + \tau_{zz})}{\partial z} + SM_z$$

Con SM_y , SM_z el incremento de momento en y , z respectivamente. SE es el incremento de la energía producida por fuentes externas y $\text{div}(k \text{ grad } T)$ es la adición del calor en grados de temperatura (Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 67).

$$\begin{aligned} \rho \frac{DE}{Dt} = & (-\text{div}(\rho\mu)) + \frac{\partial(\mu\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\mu\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(\mu\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} \\ & + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \\ & + \text{div}(k \text{ grad } T) + SE \end{aligned} \quad (9)$$

El movimiento de los fluidos se describe gracias a las ecuaciones Navier-Stokes. Estas ecuaciones controlan y permiten la solución de modelos CFD, surgen al plantear la ecuación fundamental de la dinámica, donde se relaciona la viscosidad del fluido, las fuerzas de superficie y la deformación de la partícula elemental del fluido (Versteeg, Malalasekera 2007, pp. 21-23). Para un fluido newtoniano incompresible, el movimiento del fluido satisface la ecuación de Navier-Stokes de viscosidad constante:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla * (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (10)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla * (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (11)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla * (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (12)$$

Las ecuaciones 10, 11 y 12 no tienen solución analítica y en ocasiones resulta difícil comprender la situación exacta en que se encuentra el fluido, en casos concretos pueda haber excepciones, por lo tanto, para obtener resultados con certeza es necesario usar métodos experimentales o simulaciones numéricas, he aquí el papel de los softwares CFD (Hu 2012, p. 437).

2.2.4.2 Modelos de turbulencia

Muchos, si no la mayoría, de los flujos de importancia para la ingeniería son de naturaleza turbulenta. Los flujos en el régimen laminar están completamente descritos por las ecuaciones de

continuidad y momento, en casos simples, pueden resolverse analíticamente. Es posible que los flujos más complejos deban abordarse numéricamente con técnicas de CFD. Los ingenieros están interesados principalmente en la predicción del comportamiento del flujo medio, pero no se puede ignorar la turbulencia, porque las fluctuaciones dan lugar a tensiones de Reynolds adicionales en el flujo medio. Estas tensiones adicionales deben modelarse en CFD industrial (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 98-105). Tomando en cuenta la manera de resolver o modelar, existen 3 familias de modelos:

- “Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), este es modelo con menos demanda computacional y el más ampliamente usado en ingeniería, introduce un promediado de las fluctuaciones turbulentas.
- “Direct Numerical Simulation (DNS)”, en este modelo cuenta con un pequeño tamaño de malla capaz de simular las fluctuaciones turbulentas, por esta razón la resolución es completa y no se añade ningún modelo turbulento, además, su coste computacional es muy elevado.
- “Large Eddy Simulation (LES)”, resuelve estructuras grandes y tiene un coste computacional más bajo que el modelo DNS.

Se considera realmente notable que los modelos de turbulencia RANS, como los modelos $k-\epsilon$, logran expresar las características principales de muchos flujos turbulentos por medio de una escala de longitud y una variable que define la escala de tiempo. El modelo $k-\epsilon$ estándar se valora por su solidez y es ampliamente preferido en los cálculos de flujo interno industrial (Versteeg, Malalasekera 2007, p. 114).

2.2.4.3 Discretización

Es la aproximación de una variable continua en un número finito de puntos. El proceso de obtención de la solución computacional consta de dos etapas. La primera etapa implica la conversión de las ecuaciones diferenciales parciales y las condiciones auxiliares (iniciales y de frontera) en un sistema de ecuaciones algebraicas discretas. Esta primera etapa se conoce comúnmente como etapa de discretización (Tu, Yeoh, Liu 2013, pp. 155-156).

- Método diferencias finitas: es el más antiguo de los métodos para la solución numérica de ecuaciones diferenciales parciales. En cada punto nodal de la malla utilizada para describir el dominio del flujo de fluidos, las expansiones de la serie de Taylor se utilizan para generar aproximaciones en diferencias finitas a las derivadas parciales de las ecuaciones gobernantes. En principio, las diferencias finitas se pueden aplicar a cualquier tipo de sistema de malla, sin

embargo, el método se aplica más comúnmente a mallas estructuradas ya que requiere una malla que tenga un alto grado de regularidad (Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 158).

- Método de los volúmenes finitos: el dominio computacional se subdivide en un número finito de volúmenes de control contiguos, que expresan la conservación exacta de sus propiedades. En el centro de cada uno de los volúmenes de control, se calculan los valores de las variables. Como el método de volumen finito funciona con volúmenes de control y no con nodos, tiene la capacidad de adaptarse a cualquier tipo de mallas. Aquí, en lugar de mallas estructuradas, se pueden emplear grillas no estructuradas que permiten una gran cantidad de opciones para la definición de la forma y ubicación de los volúmenes de control (Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 163).
- Método de los elementos finitos: es similar al método de volumen finito. Tanto el método de elementos finitos como el de volumen finito son adecuados para dominios computacionales irregulares, lo que significa que pueden adaptarse a geometrías complejas. Sin embargo, una característica distintiva del método de elementos finitos es que las ecuaciones gobernantes se aproximan primero por multiplicación con las llamadas funciones de forma antes de que se integren en todo el dominio computacional (Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 168).

2.2.4.4 Mallado

Por definición, una malla en sí misma consiste en una disposición de un número discreto de puntos que se superponen a toda la geometría del dominio. A través de la subdivisión de este dominio, se genera un número de celdas de rejilla o malla más pequeñas. La generación de mallas o cuadrículas representa una consideración importante para lograr las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan el problema de CFD, ya que, puede determinar el éxito o el fracaso en la obtención de una solución computacional (Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 125).

En términos de (Versteeg, Malalasekera 2007, pp. 126-133), los diferentes arreglos de malla que se pueden usar para discretizar para solucionar las ecuaciones de flujo con el método de volumen finito. Las opciones disponibles se pueden categorizar como arreglos de malla estructurados y no estructurados.

La categoría de mallas estructuradas: consiste en el ordenamiento de los elementos en memoria o cuadrícula en orden, por lo tanto, involucra las ecuaciones de gobierno en su forma más simple (Ilustración 2-6), pero la discretización de los problemas de flujo con límites de dominio curvos es imprecisa. Existe un tipo de mallas con estructura de bloques, que se construyen a partir de subregiones, cada una de las cuales se malla por separado. Esta técnica puede superar muchas de

las dificultades asociadas con geometrías complejas y permite mejorar la calidad de la malla en casos complejos.

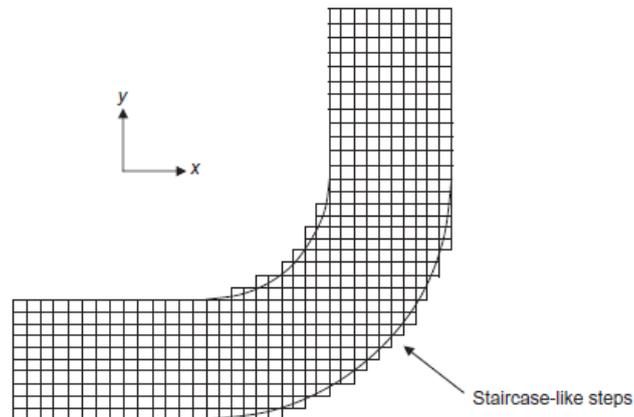


Ilustración 2-6: Malla estructurada para geometría de codo de 90°

Fuente: Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 130

Realizado por: Ruiz, J., 2023

La categoría de mallas no estructuradas: no implica una estructura de líneas de cuadrícula (Ilustración 2-7). Los volúmenes de control pueden tener formas arbitrarias, lo que simplifica el mallado de geometrías complejas. El enfoque ahora se usa ampliamente en CFD industrial.

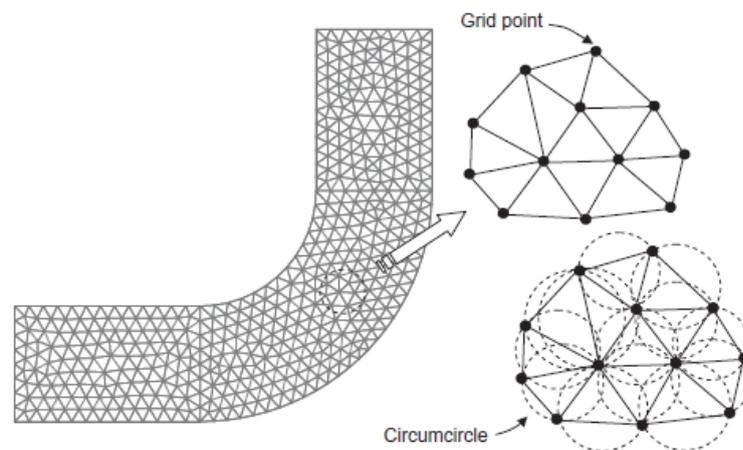


Ilustración 2-7: Malla no estructurada para la geometría de codo de 90°

Fuente: Tu, Yeoh, Liu 2013, p. 133

Realizado por: Ruiz, J., 2023

2.2.4.5 Ansys Fluent

Ansys Fluent es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD) de uso general que se utiliza para modelar el flujo de fluidos, la transferencia de calor y masa, las reacciones químicas

y más. Fluent ofrece una interfaz moderna y fácil de usar que agiliza el proceso de CFD desde el preprocesamiento hasta el post-procesamiento dentro de un flujo de trabajo de una sola ventana, basado en el método de volúmenes y elementos finitos aplicado a una malla. Fluent es conocido por sus capacidades avanzadas de modelado de física, que incluyen modelado de turbulencia, flujos monofásicos y multifásicos, combustión, modelado de baterías, interacción fluido-estructura y mucho más. Ansys, Inc., Posee una paquetería completa para simulación, comenzando con un módulo de dibujo en 3D, modelos matemáticos y esquemas de solución, un módulo para crear cualquier tipo de malla y un paquete de post- procesamiento (ANSYS 2022).

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Materiales

La tabla 3-1 muestra los medios utilizados para desarrollar el proyecto de grado actual, mientras que la ilustración 3-1 da a conocer la metodología empleada en el desarrollo del presente trabajo.

Tabla 3-1: Recursos utilizados durante el desarrollo del proyecto.

Elementos	Descripción
Computador	Computadora y características: <ul style="list-style-type: none">• Microsoft Windows 11- 64 Bits.• 12 GB RAM.• 6 GB RAM dedicada (FPS).• Tarjeta gráfica Intel® UHD Graphics 620.
Bibliografía	Artículos de investigación científica afines al modelado y simulación CFD de accesorios de tubería. Trabajos de grado con temáticas afines a la simulación numérica y su uso en la enseñanza. Textos básicos de mecánica de fluidos. Contenido multimedia para la autoformación en modelado y simulación numérica usando software Ansys® Fluent
Documentos	Formato para guías de práctica de laboratorio de la Facultad de ciencias-ESPOCH.
Softwares	Ansys® Student 2023 R1 (Código Abierto) Paquete Microsoft Office®

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Las características del computador son las referencias del sistema del equipo para asegurar el rendimiento adecuado del software ANSYS® Fluent. La bibliografía proporciona los datos necesarios para elaborar los modelos y simulaciones para su posterior uso como materiales educativos interactivos. Estos están relacionados con cada tema de estudio y serán redactados en base a los formatos establecidos por la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Se usa la

última versión ANSYS® Student 2023 R2 para llevar a cabo las simulaciones en el proceso de desarrollo.

3.2. Esquema para el desarrollo metodológico de la simulación

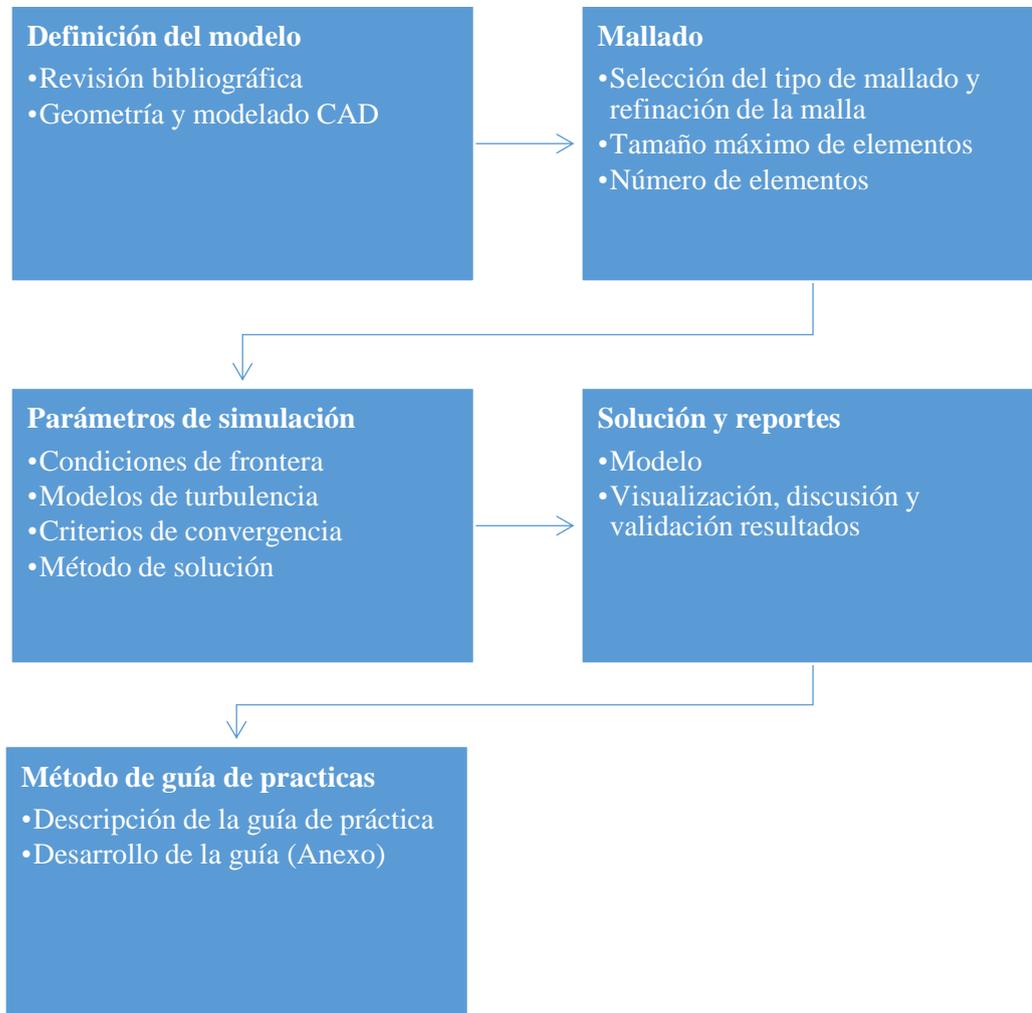


Ilustración 3-1: Metodología empleada en el desarrollo del trabajo

Realizado por: Ruiz J., 2023

3.3. Definición del modelo

3.3.1. Revisión bibliográfica

El presente trabajo tiene como objetivo aplicar modelos CFD en la académica, para esto se ha llevado a cabo una exhausta revisión bibliográfica sobre literatura técnica y científica relacionada con los accesorios de tuberías en cuestión. La finalidad esta revisión es contar con datos reales para modelar, simular y validar este trabajo. La tabla 3-2 presenta la bibliografía escogida para

validar los resultados, la naturaleza del trabajo experimental (E) o simulación numérica (CFD), el accesorio simulado y una breve descripción.

Tabla 3-2: Resumen de la literatura revisada

Autor/es	Accesorio de tubería	Fluido	Descripción
(Perumal, Ganesan 2016)	Codo de 90°, difusores	Agua -25°C	(CFD & E), analizan el coeficiente de pérdida en fluidos newtonianos. Contribuye al diseño eficiente de sistemas de transporte de fluidos.
(Esteves, Cristianini 2012)	Válvula de compuerta	Agua – 25°C	(CFD), evalúa el flujo de fluido en una válvula de compuerta con el fin de optimizar el rendimiento y diseño de sistemas de control de flujo.
(Tang, Juárez, Li 2019)	Tubo de Venturi	Agua – 25°C	(CFD & E), investiga el efecto de los parámetros estructurales en un tubo de Venturi, para mejorar la comprensión y diseño de sistemas de flujo con riesgo de cavitación.

Realizado por: Ruiz J., 2023

3.3.2. Geometrías y modelado CAD

En el marco metodológico de este estudio, se utilizó el software Ansys DesignModeler como la herramienta principal para el modelado CAD de las geometrías. El uso de Ansys DesignModeler permitió generar las geometrías de los accesorios y componentes requeridos en el estudio de forma adecuada. Se realizaron las correspondientes operaciones de modelado, como extrusiones, revoluciones y uniones, para obtener las formas deseadas. La revisión bibliográfica previa proporcionó las referencias necesarias para asegurar que los modelos geométricos fueran fieles a la realidad y se ajustaran a los estándares establecidos.

3.3.3.1. Codo de 90° y 45°

Con el objetivo de obtener la geometría precisa y realizar el modelado CAD de un codo de 90° se utilizó como referencia el modelo descrito por Perumal y Ganesan (2016). La herramienta empleada para llevar a cabo esta tarea fue Ansys DesignModeler de ANSYS®, la geometría del codo se definió con una longitud aguas arriba total de 30 pulgadas y una longitud aguas abajo de 30

pulgadas, para garantizar los principios de flujo completamente desarrollado. Además, se consideró un ratio de curvatura $R/r=1$ un factor clave para caracterizar adecuadamente los codos y analizar el comportamiento de los flujos y las pérdidas de presión asociadas, el esquema se presenta en la ilustración 3-2.

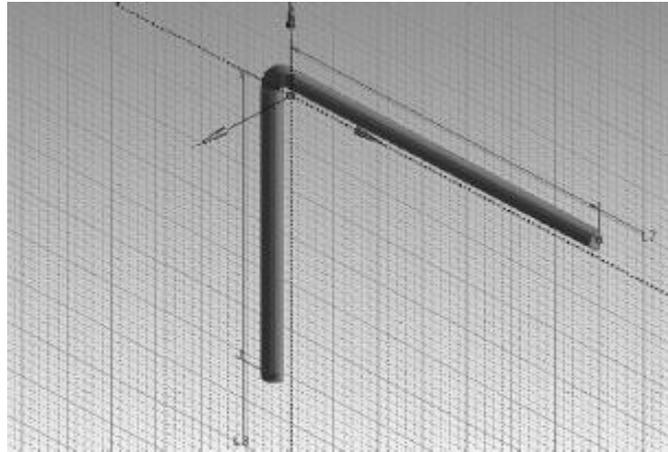


Ilustración 3-2: Geometría de codo a 90° con $R/r=1$

Fuente: Perumal, Ganesan 2016

Realizado por: Ruiz, J., 2023

3.3.3.2. Válvula de compuerta

Basándose en el estudio realizado por Esteves y Cristianini (2012), se siguieron sus directrices para obtener la geometría y realizar el modelado CAD de una válvula de compuerta DN20 confeccionada en latón. La válvula evaluada presenta una compuerta de 9 mm de espesor y un tornillo interno de $\frac{3}{4}$ " (19,05 mm) de diámetro. La ilustración 3-3 muestra la sección transversal de la válvula de compuerta en dos configuraciones parcialmente cerradas, con relaciones de apertura a/D de 0,50 y 0,75. La inapreciable contribución de dicho estudio citado ha sido imperativa para el riguroso proceso de modelado realizado en Ansys DesignModeler.

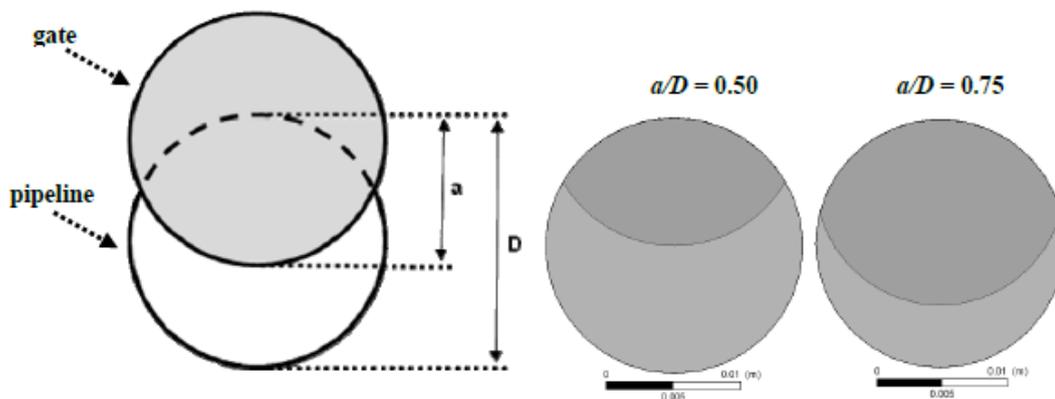


Ilustración 3-3: Válvula de compuerta configuraciones $a/D=0.5$ y $a/D=0.75$

Fuente: Esteves, Cristianini 2012

Realizado por: Ruiz, J., 2023

3.3.3.3. Tubo de Venturi

En aras de corroborar los datos experimentales y numéricos presentados por Tang, Juárez, Li (2019), se procedió a realizar la obtención de la geometría y el modelado CAD de un tubo de Venturi. La ilustración 3-4 representa de manera gráfica la estructura del tubo, que incluye una sección de contracción, una sección de garganta y una sección de difusión. Para determinar la relación de contracción, se utilizó la ecuación 13, que permite calcular la relación entre el diámetro de la sección de garganta y el diámetro de entrada.

$$\gamma = \frac{d}{D_{in}} \quad (13)$$

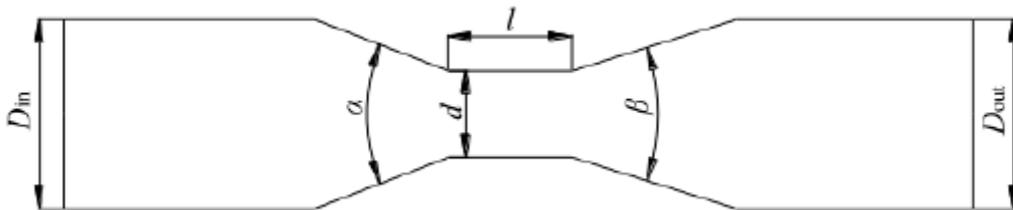


Ilustración 3-4: Esquema de la geometría: tubo de Venturi

Fuente: Tang, Juárez, Li 2019

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Se utilizó el modelo experimental de Tang, Juárez, Li (2019) para un tubo Venturi con ángulo de contracción α de 30° , relación de contracción de γ 0,28 y ángulo de difusión de β 20° . Los diámetros de entrada y salida del tubo fueron de 50 mm, y la longitud de la garganta fue de 10 mm. Esto permite validar los datos experimentales y numéricos previamente obtenidos en el estudio mencionado.

3.4. Mallado

La generación de la malla desempeña un papel fundamental en la simulación del flujo, ya que determina la estabilidad y precisión de las predicciones. En el caso particular, al simular el flujo a través de curvaturas de 90 grados, se utilizó una malla híbrida tetraédrica no estructurada para discretizar todo el dominio de flujo (Ilustración 3-5). Para capturar características y fenómenos específicos, se aplicaron técnicas de refinamiento de mallado localizado en los bordes de la

geometría con un espesor total de 5mm. El número total de elementos de la malla fue de 222 055, lo que permitió una resolución adecuada del flujo en el dominio de interés.

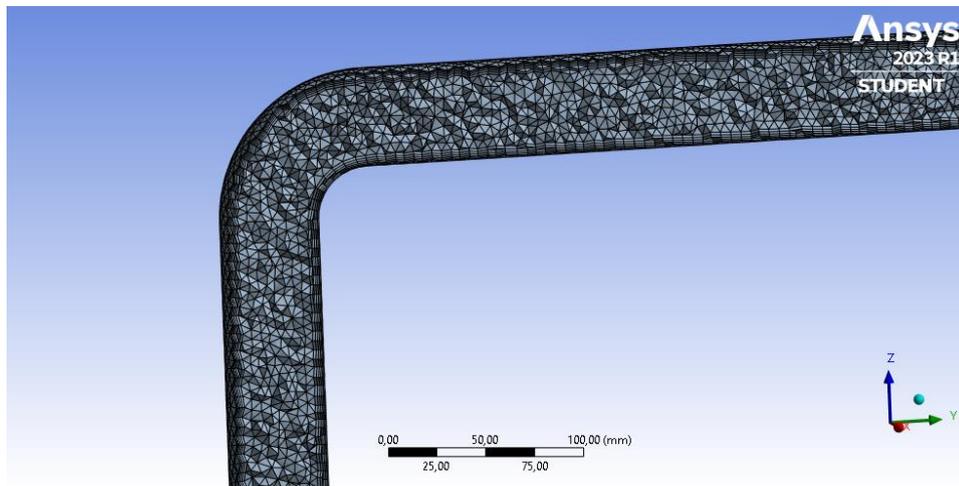


Ilustración 3-5: Malla no estructurada en geometría codo 90°

Realizado por: Ruiz, J., 2023

La generación de la malla para la simulación CFD de la válvula de compuerta se llevó a cabo utilizando una malla tetraédrica con refinamiento en los bordes del dominio fluido, en particular en las regiones con mayor gradiente de velocidad, como se muestra en la ilustración 3-6. Para lograr una malla de alta calidad, se aplicó un factor de expansión geométrica de capa de 1 mm en el proceso de refinamiento. Se estableció un tamaño máximo de malla de 2,5 mm (Ilustración 3-7). El número total de celdas de la malla generada fue 108095 para el caso de $a/D = 0,50$ y 109577 para el caso de $a/D = 0,75$, asegurando una adecuada resolución espacial del flujo en ambas condiciones.

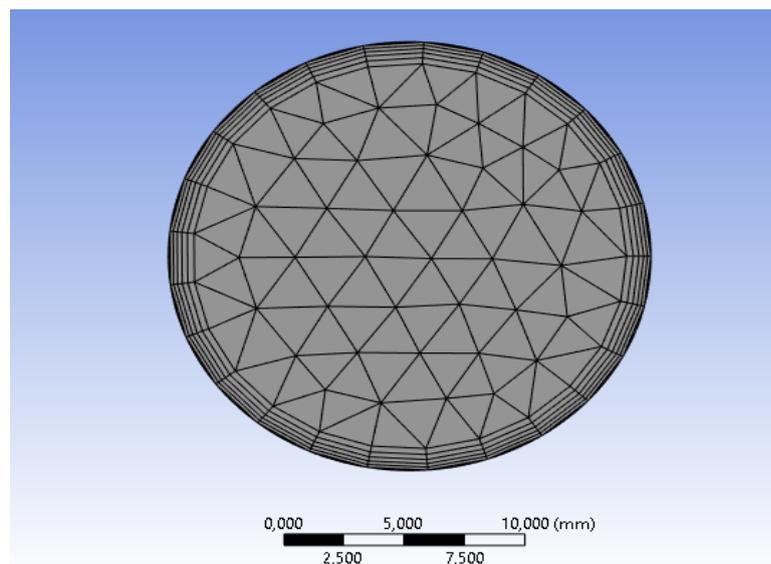


Ilustración 3-6: Refinamiento en malla para la geometría de válvula de compuerta

Realizado por: Ruiz, J., 2023

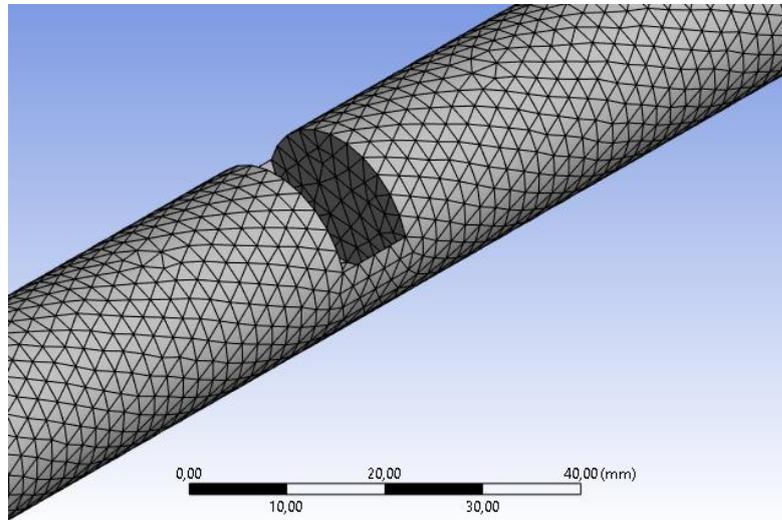


Ilustración 3-7: Malla no estructurada para una válvula de compuerta $a/D=0,75$

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Para la simulación CFD del tubo de Venturi, se generó la malla siguiendo el enfoque propuesto por Tang et al. (2019), quienes realizaron una prueba de independencia de malla utilizando cinco números de mallas diferentes. Con el objetivo de obtener un equilibrio óptimo entre precisión y tiempo computacional, se seleccionó un número de malla que demostró ser el más adecuado. En este caso, se utilizó un número de elementos de 191 964. Para la discretización del dominio computacional, se emplearon celdas hexaédricas estructuradas, lo que permitió una representación eficiente y precisa de la geometría y el flujo en el tubo de Venturi tal como se muestra en la ilustración 3-8.

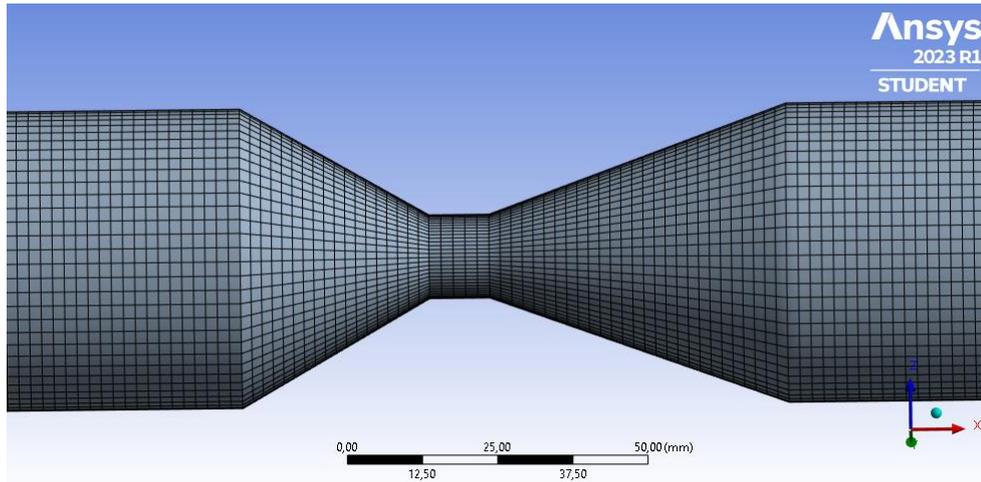


Ilustración 3-8: Mallado estructurado para la geometría de Tubo Venturi

Realizado por: Ruiz, J., 2023

3.5. Parámetros de simulación

En el estudio CFD, los parámetros de simulación utilizados para cada geometría se encuentran resumidos en la tabla 3-3. En esta tabla, se describen las condiciones de entrada y salida del flujo, los materiales utilizados y los modelos de turbulencia. Además, los criterios de convergencia para asegurar resultados numéricos estables y precisos.

Tabla 3-3: Parámetros para las simulaciones

-	Codo de 90°	Válvula de compuerta	Tubo de Venturi
---	--------------------	-----------------------------	------------------------

Condiciones de frontera	Entrada	v(m/s) = 0,1752 1,2264 0,3504 1,4016 0,5256 1,5768 0,7008 1,7520 0,8760 3,5039 1,0512 8,7598	v(m/s) = 0,05249 0,09974 0,68241 1,575	Pman (Pa) = 150000 200000 250000 300000
	Salida	Pman (Pa) = 0	Pman (Pa) = 0	Pman (Pa) = 100000
Modelos de turbulencia	k-ε/laminar (Estándar) - Funciones de pared estándar	k-ε(RNG) /laminar - Funciones de pared estándar	k-ε/laminar (RNG) - Funciones de pared escalable	
Materiales	Acero	Cobre	Acero	
Criterios de convergencia	10 ⁻⁴ para todas las variables	10 ⁻⁴ para todas las variables	10 ⁻⁵ para todas las variables	
Métodos de solución	Simple – segundo orden	Simple – Primer y segundo orden	Acoplado – primer orden	

Realizado por: Ruiz, J., 2023

En la simulación CFD, las condiciones de frontera establecen los límites del flujo en el dominio de simulación. El modelo de turbulencia se utiliza para capturar los efectos turbulentos en el flujo régimen turbulento ($1000 \leq \text{Número de Reynolds} \leq 30000$), k-ε para este caso y laminar para $\text{Número de Reynolds} \leq 1000$. Los criterios de convergencia definen los umbrales de error aceptables para garantizar resultados estables. Los métodos de solución son utilizados para resolver las ecuaciones de conservación. En la tabla 3-3 se detalla la información mencionada, incluyendo para todas las geometrías condiciones de temperatura estándar (300K), la consideración de pared sin deslizamiento y el enfoque para simulaciones en estado estacionario.

3.6. Solución y reportes

En la fase de Solución y Reportes, se generarán los contornos de presión y velocidad para las geometrías de la simulación en estado estacionario. Para el análisis gráfico, se seleccionan tres gráficas que representan diferentes condiciones y regímenes para cada geometría, incluyendo sus valores mínimos y máximos correspondientes. Estas representaciones gráficas se analizarán, permitiendo la exploración de diversos fenómenos hidráulicos presentes en el sistema de tuberías debido a la existencia de accesorios. Luego de este análisis, se medirá la presión para los

parámetros descritos en la sección 3.5, en aguas arriba y aguas abajo de cada accesorio, con el objetivo de calcular los coeficientes de pérdida "k". Estos valores serán cotejados con las referencias bibliográficas. En particular, en el caso del tubo de Venturi, se verificará su validez al confrontar los resultados del caudal obtenidos en Fluent con bibliografía.

3.7. Método para prácticas de dinámica de fluidos computacional

Con el propósito de integrar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en la enseñanza de la mecánica de fluidos de la Carrera de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH, se ha llevado a cabo un proceso de socialización en colaboración con docentes y tutores del proyecto. La Mecánica de Fluidos abarca el estudio de propiedades y principios fundamentales del comportamiento de los fluidos, así como las pérdidas mayores y localizadas, además de la selección de bombas para el transporte de fluidos. El objetivo es mejorar la metodología de enseñanza en esta área mediante el desarrollo de prácticas específicas, en este sentido, se decidió que el tema central de estudio sería las pérdidas menores en accesorios. Esta elección se fundamentó en su relevancia industrial y su potencial para ilustrar conceptos esenciales de la fluidodinámica. Además, esta selección, que también cumple la función de introducción a la simulación CFD, se benefició de la simplicidad de las geometrías, lo que facilita la comprensión de los principios fundamentales. Para más detalles, se remite a la tabla 3-4 correspondiente.

Tabla 3-4: Detalle para metodología prácticas de simulación numérica CFD

Materia	Conocimientos esenciales	Nombre de la práctica
Mecánica de fluidos	Estática y dinámica de los fluidos Pérdidas de carga por longitud y por accesorios	Análisis computacional de pérdidas menores en tuberías, ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en régimen turbulento

Realizado por: Ruiz, J., 2023

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Para la obtención de los resultados es necesario ejecutar la simulación y establecer un número de iteraciones. En caso de que no se cumplan los criterios de convergencia, el programa (Ansys Fluent) se detendrá al concluir el número de iteraciones establecido. La tabla 4-1 muestra el número de iteraciones empleadas en la simulación para las geometrías de estudio, además, se muestra un número aproximado al que el programa debe converger.

Tabla 4-1: Número de iteraciones empleadas en la simulación

Tipo de geometría	Número de iteraciones	Convergencia (aprox.)
Codo de 90°	500	410
Válvula de compuerta (a/D=0.75 & a/D=0.5)	450	250
Tubo de Venturi	500	500

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Para proceder al análisis de pérdidas de carga, se obtuvo los resultados mediante la herramienta Ansys CFD Post y su medición de la presión tanto aguas arriba como aguas abajo. El conocer las presiones antes y después del accesorio en estudio permite calcular la caída de presión, parámetro imprescindible para la validación de resultados y el cálculo del coeficiente “k” del accesorio.

En el flujo de un fluido incompresible a través de una sección horizontal de tubería uniforme sin entrada/salida de trabajo, la caída de presión se puede expresar mediante un balance de energía mecánica basado en la Ec. 14:

$$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} \quad (14)$$

Donde P es la presión estática de flujo y ρ es la densidad del fluido, g la gravedad, mientras que los subíndices indican los puntos 1 y 2, respectivamente (Darby, Chhabra 2016, p. 35). Para calcular el coeficiente de pérdidas de cada accesorio “k” se emplea la Ec. 15 que viene de la Ec. 6, mostrada en el capítulo 2, y tiene la siguiente forma.

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}} \quad (15)$$

Donde K es el coeficiente de pérdidas del accesorio, ΔP la caída de presión, v la velocidad promedio del fluido y g la gravedad. Además, se calculó el error porcentual entre los resultados presentados en la revisión bibliográfica y los obtenidos del presente estudio. Para el cálculo del error se empleó la Ec. 16.

$$\%error = \frac{|x - x_0|}{x_0} * 100 \quad (16)$$

Donde:

- x: valor aproximado (resultados del presente estudio).
- x_0 : valor real (resultados presentados en la revisión bibliográfica).

4.1. Modelos CAD

En el marco de este proyecto, se lleva a cabo la creación y presentación de los modelos CAD de una válvula de compuerta, un codo a 90° y un tubo de Venturi utilizando un software especializado, Ansys DesignModeler en todos los casos. Los Anexos A, B y C muestran los modelos acotados que van a ser utilizados en la práctica de laboratorio de simulación numérica, estos modelos serán descargados por los estudiantes para el desarrollo de la práctica y lo podrán hacer desde el enlace que se detalla a continuación: [ARCHIVOS PRÁCTICAS CFD](#)

Estos modelos geométricos han sido diseñados para representar las formas y dimensiones reales de los accesorios en cuestión basándose en la información proporcionada por los autores Perumal & Ganesan, (2016); Esteves & Cristianini, (2012) y Tang, Juárez, Li et al., (2019) en sus trabajos. Cabe recalcar que algunos accesorios cuentan con características específicas de diseño proporcionadas por los fabricantes, sin embargo, se considera que la información proporcionada por los autores es suficiente para cumplir el objetivo de aplicar CFD en la academia.

4.2. Visualización de resultados y validación

4.2.1 Pérdidas de carga secundarias para codos de 90°

Con el fin de establecer una relación entre los patrones de contorno de presión y los valores numéricos específicos, la tabla 4-2 proporciona los valores de presiones mínimas y máximas asociados a cada contorno mostrado en la ilustración 4-1. Los valores de presión aguas arriba y aguas abajo de los codos ilustrados (ilustración 4-1) fueron obtenidos mediante mediciones tal como se indica en la Tabla 4-4.

Luego de analizar los contornos de presión para la geometría de un codo de 90° en diferentes números de Reynolds, se puede apreciar la influencia del principio de conservación del momento en el flujo. Este principio establece que el cambio de dirección del flujo genera una fuerza sobre el codo, lo cual resulta en un incremento de la presión en el exterior y una disminución en el interior de este (Torrás et al. 2006, p. 214). La Ilustración 4-1 muestra de manera precisa este fenómeno en distintos números de Reynolds (10,000; 100,000; y 1,000,000), permitiendo entender la distribución de presión resultante del cambio de dirección del flujo, mostrando cómo la presión alcanza su valor máximo y mínimo en un plano cercano a los 45° del codo.

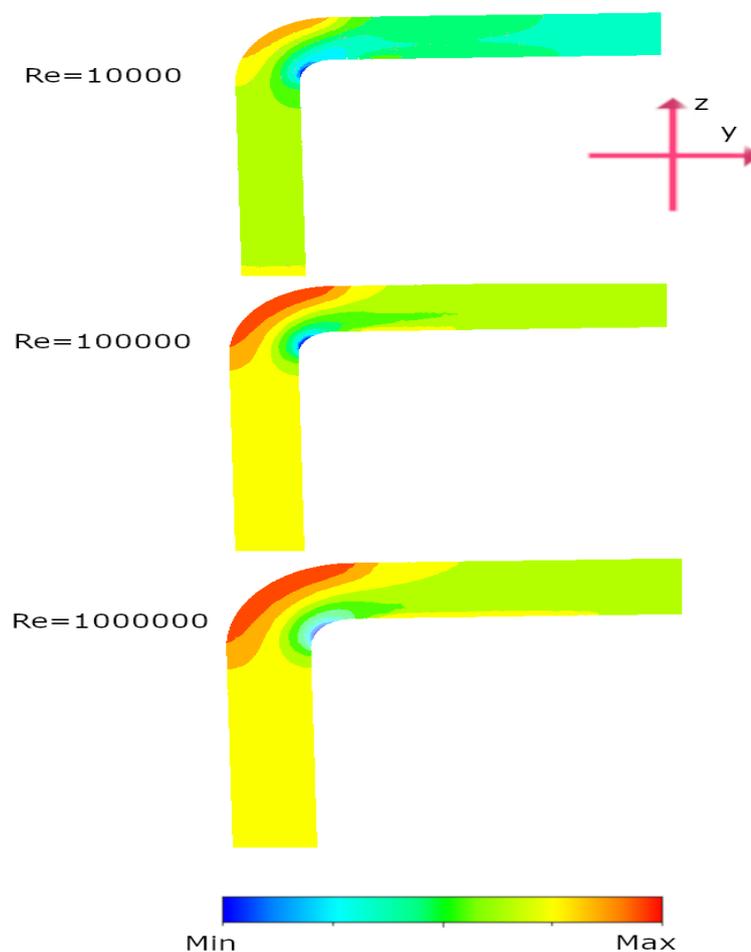


Ilustración 4-1: Contornos de presión para la geometría de codo a 90° en distintos Reynolds, en las figuras el flujo de entrada es en la dirección $-z$

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-2: Valores de presión mínima y máxima para la geometría de codo a 90°, ver ilustración 4-1

Número de Reynolds	10000	100000	1000000
P_{\max}	3.701e+01	1.850e+03	1.582e-05
P_{\min}	-3.356e+00	-1.989e-03	-2.328e-05

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Los contornos de velocidad, mostrados en la ilustración 4-2, revelan una disminución de la velocidad en el exterior y un aumento en el interior debido al cambio de dirección del flujo. La tabla 4-3 proporciona los valores de las velocidades máximas asociadas a cada simulación, se observó que el régimen laminar ($Re=1000$), presenta zonas de estancamiento debido a las bajas velocidades muy cercanas a cero en el interior del codo en aguas abajo.

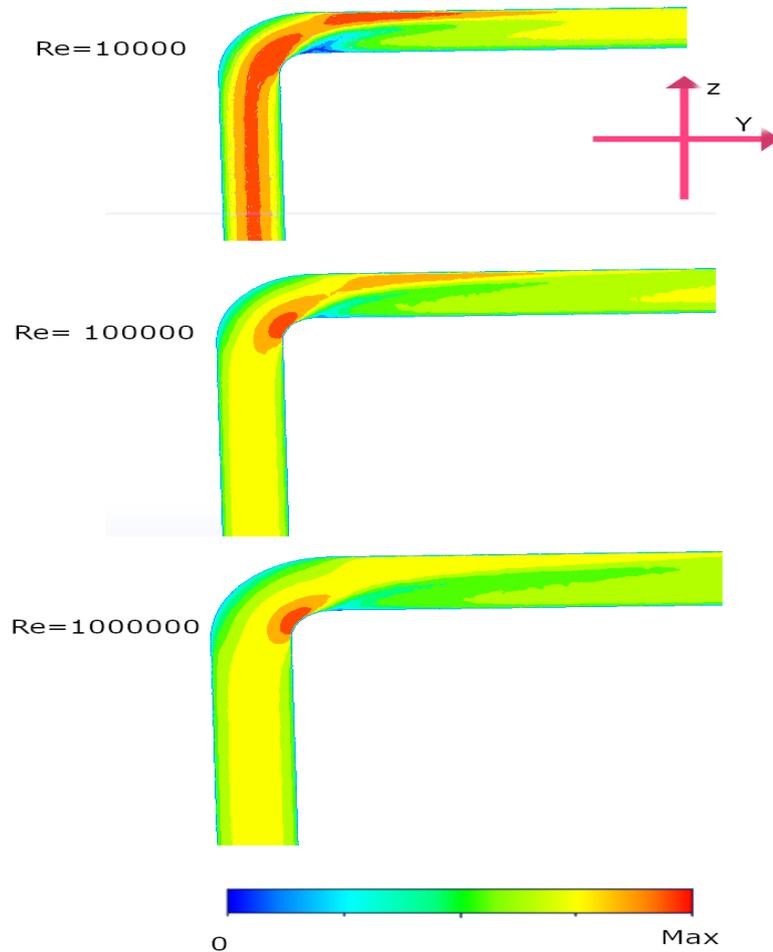


Ilustración 4-2: Contornos de velocidad para la geometría de codo a 90° en distintos Reynolds, en las figuras el flujo de entrada es en la dirección $-z$

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-3: Valores de velocidad máxima para la geometría de codo a 90°, en todos los casos la velocidad mínima fue 0 (m/s), ver ilustración 4-2

Número de Reynolds	1000	100000	1000000
V_{\max}	2.517e-01	2.613	2.659e+01

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Los resultados obtenidos fueron validados mediante el cálculo del coeficiente de pérdidas "k" para el accesorio de codo a 90° utilizando las ecuaciones 14 y 15. Se realizaron simulaciones para diferentes números de Reynolds, abarcando un rango desde 10,000 hasta 1,000,000 tal como se detalla en la sección 3.5. Los resultados de la simulación se presentan en la Tabla 4-4, y la Ilustración 4-3 muestra la gráfica del coeficiente "k" en función de Reynolds. Se observa que el valor de "k" varía para bajos Reynolds y luego tiende a estabilizarse en un valor constante. Se observan coincidencias en los valores constantes de "k" en el régimen turbulento, pero una mayor discrepancia en el régimen laminar entre los resultados de este estudio y los de Perumal & Ganesan (2016) para codos de 90°, con un error porcentual máximo del 18.61%.

Tabla 4-4: Valores de “k” calculados en la simulación (Codo 90°) y resultados de otros autores

Velocidad entrada	Presión entrada	Presión salida	Re	K Simulación	K Perumal (2016)	%Error
0,1752	19,8200	13,7900	10000	0,3929	0,3312	18,6154
0,3504	57,1200	33,5200	20000	0,3844	0,3421	12,3692
0,5256	101,5370	50,4100	30000	0,3702	0,3345	10,6576
0,7008	166,9100	77,8484	40000	0,3627	0,3274	10,7756
0,8760	248,4520	111,7210	50000	0,3564	0,3196	11,5137
1,0512	342,2460	151,9990	60000	0,3443	0,3155	9,1471
1,2264	448,9600	191,2000	70000	0,3428	0,3106	10,3433
1,4016	552,3820	229,3160	80000	0,3289	0,3076	6,9199
1,5768	708,0710	310,3230	90000	0,3200	0,3053	4,7884
1,7520	833,6270	355,3980	100000	0,3116	0,3036	2,6545
3,5039	2978,640	1193,870	200000	0,2907	0,2919	0,3827
8,7598	16536,200	5993,780	500000	0,2748	0,2663	3,1753
17,5197	46247,000	6738,310	1000000	0,2574	0,2699	4,6264

Realizado por: Ruiz, J., 2023

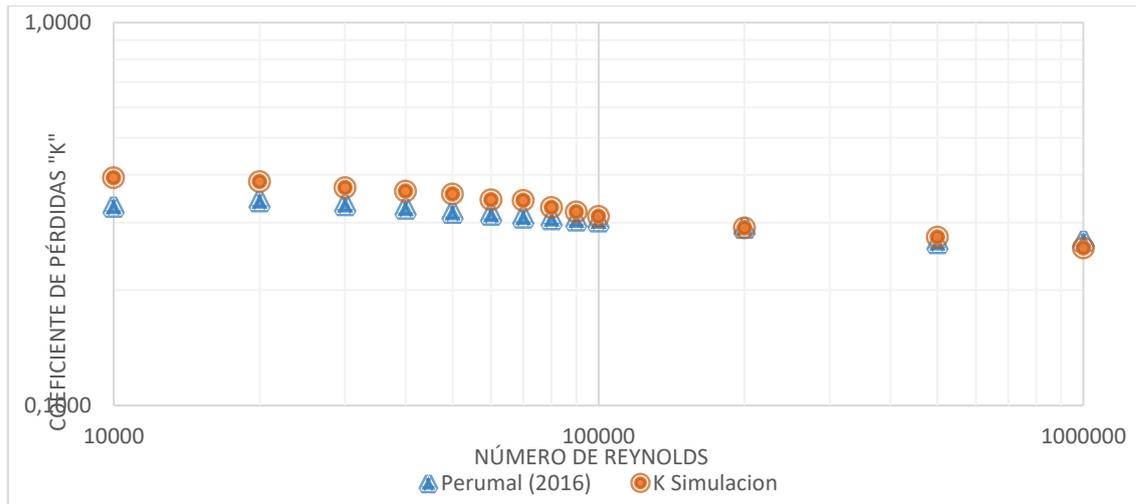


Ilustración 4-3: Validación de resultados de la simulación (Codo 90°), coeficiente “k” vs número de Reynolds

Realizado por: Ruiz, J., 2023

4.2.2. Pérdidas de carga secundaria en una válvula de compuerta usando dos grados de apertura $a/D=0.50$ y $a/D=0.75$

La ilustración 4-4 muestra los contornos de presión en la geometría de la válvula de compuerta, considerando dos grados de apertura ($a/D=0.5$ y $a/D=0.75$) y distintos números de Reynolds (1000, 13000 y 30000) en regímenes laminar y turbulento (L, laminar; T, turbulento). Para interpretar estos resultados, se consultó la Tabla 4-5, la cual muestra los valores de presiones máximas y mínimas asociadas a cada configuración. Asimismo, los valores de presión obtenidos en las simulaciones se recabaron mediante mediciones aguas arriba y aguas abajo del accesorio, tal como se detalla en la Tabla 4-7.

Los contornos de presión indican una mayor disminución en el régimen laminar ($Re=1000$) y una estabilidad en los valores en el régimen turbulento. Para la apertura $a/D=0.75$, la caída es abrupta debido a una interacción intensa entre el flujo y las superficies internas del accesorio, mientras que, la apertura $a/D=0.5$ muestra una caída más gradual, indicando una transición fluidodinámica menos perturbada en esta configuración. La notable reducción de presión en situaciones de bajos números de Reynolds y mayores aperturas evidencia la presencia de cavitación, lo que ocasiona la formación de burbujas de vapor, este fenómeno puede tener consecuencias perjudiciales, como la formación de incrustaciones y la erosión de las superficies internas de la válvula (Mott et al. 2015, p. 411). En estos casos en particular, se reportan considerables valores de presión negativos, indicando que la presión en la tubería es menor que la presión atmosférica, lo que puede generar un vacío y potencialmente ocasionar el colapso de la tubería.

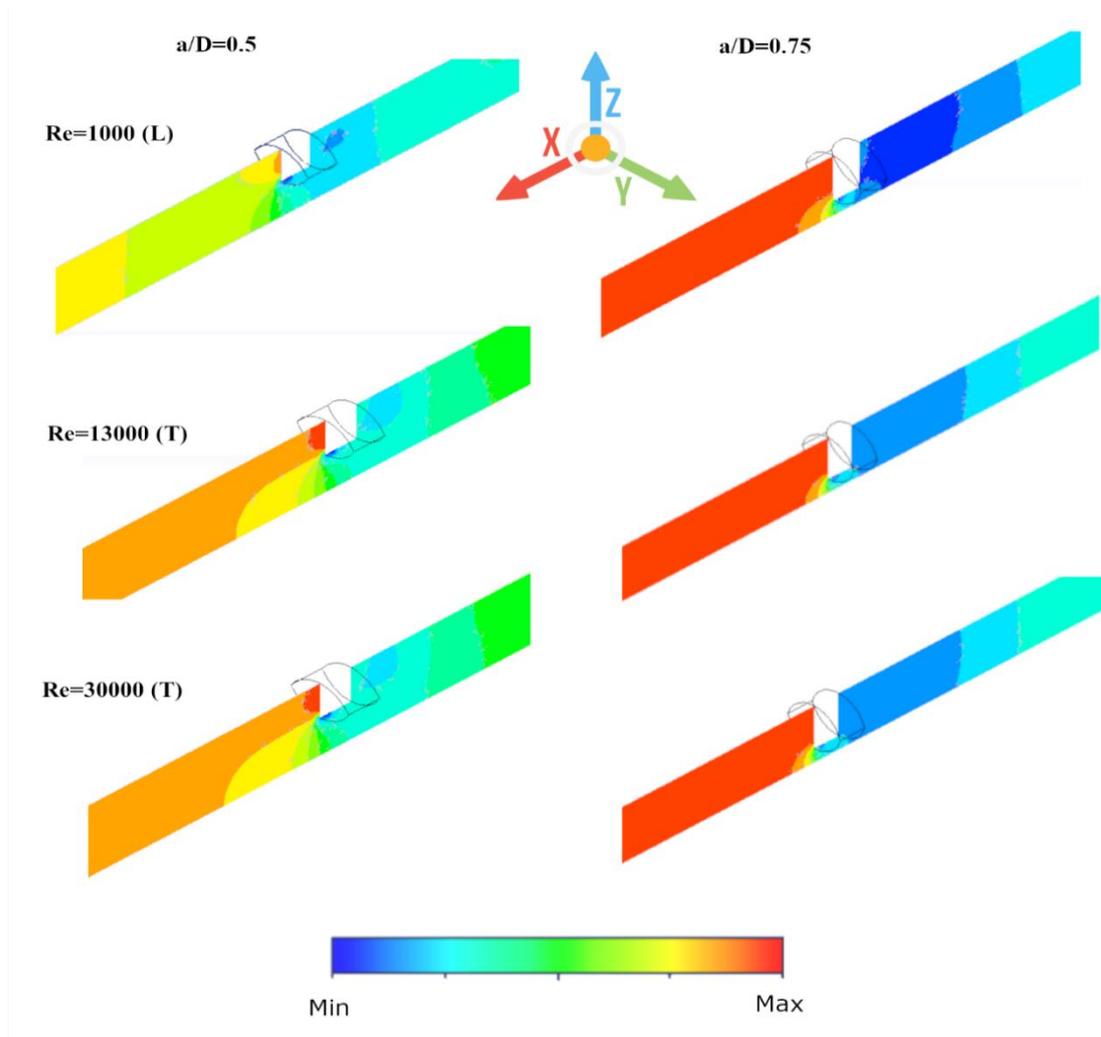


Ilustración 4-4: Contornos de presión para una válvula de compuerta de ¾” en varios regímenes de flujo y aperturas. En las figuras, el flujo de fluido va de la dirección x a la -x

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-5: Valores de presiones máximas y mínimas para una válvula de compuerta de ¾” en varios regímenes de flujo (L, laminar; T, turbulento) y aperturas, ver ilustración 4-4

		Número de Reynolds			
		a/D	1000 (L)	13000 (T)	30000 (T)
P _{max}	0.5		8.636e+00	6.107e+02	2.887e+03
	0.75		2.696e+01	3.362e+03	1.71e+04
P _{min}	0.5		-8.678e-01	-5.003e+02	-2.952e+03
	0.75		-9.816e+00	-1.803e+03	-1.033+04

Realizado por: Ruiz, J., 2023

La ilustración 4-5 muestra las líneas de corriente de velocidad que ilustran el flujo de fluido a través de la válvula de compuerta. Los resultados revelan un comportamiento distintivo del flujo en diferentes secciones del sistema. En el área de entrada, el flujo es uniforme y experimenta un cambio brusco de dirección al interactuar con la superficie de la compuerta, generando una pequeña zona de recirculación en sentido antihorario en aguas arriba (ver ilustración 4-5). Este fenómeno se observa en todo el rango de números de Reynolds evaluados y para ambas aperturas de la válvula. A medida que el fluido atraviesa la compuerta, se acelera, formando extensas áreas de recirculación en aguas abajo. Estas áreas de recirculación son más pronunciadas a medida que aumenta el número de Reynolds y a mayores aperturas de la válvula. En cada zona de recirculación, la velocidad del fluido disminuye, resultando en áreas de estancamiento.

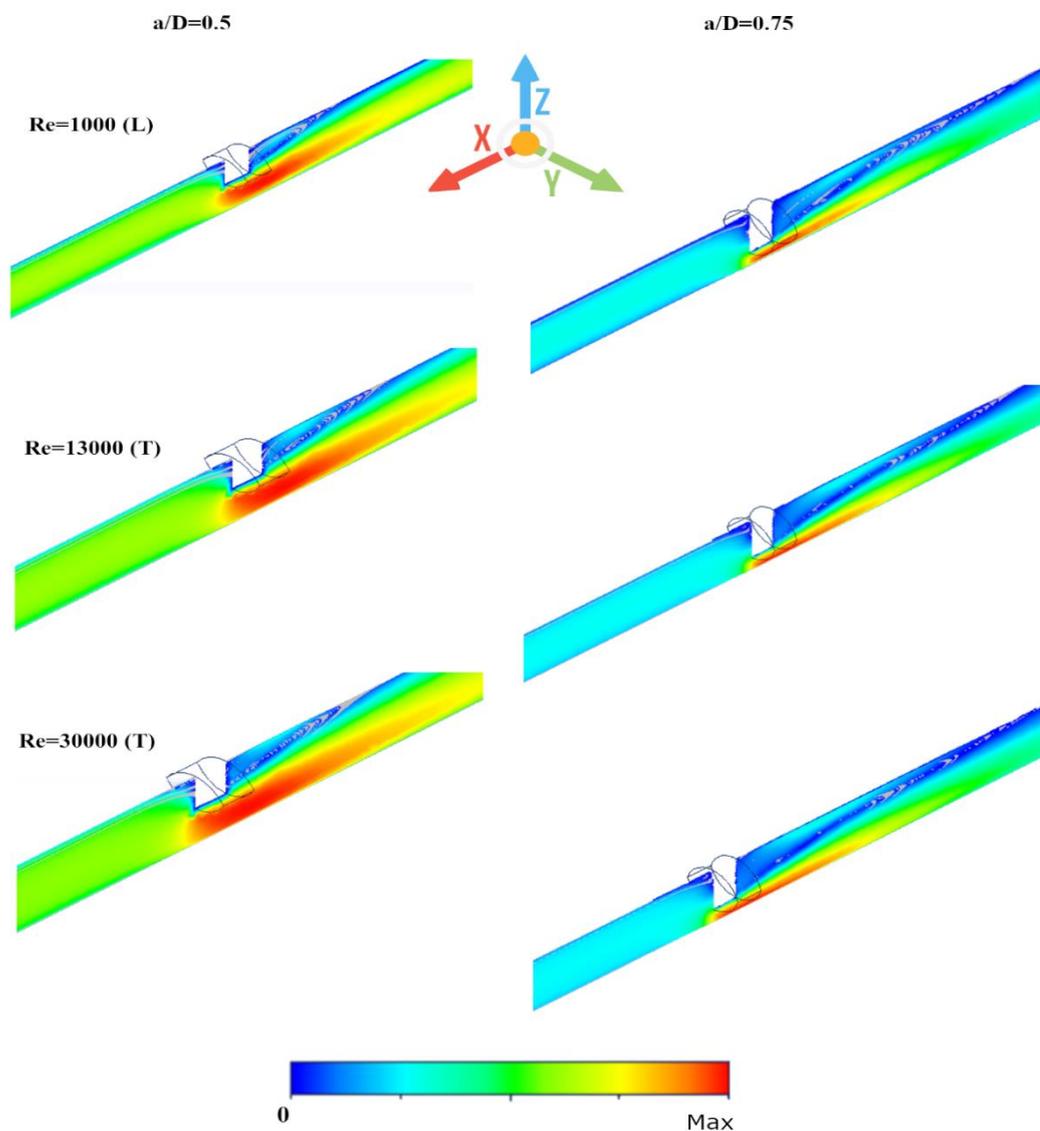


Ilustración 4-5: Líneas de corriente de velocidad para una válvula de compuerta de $\frac{3}{4}$ " en varios regímenes de flujo y aperturas. En las figuras, el flujo de fluido va de la dirección x a la -x

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-6: Valores de velocidad para una válvula de compuerta de ¾” en varios regímenes de flujo (L, laminar; T, turbulento) y aperturas, ver ilustración 4-5.

Número de Reynolds				
	a/D	1000 (L)	13000 (T)	30000 (T)
Vmax (m/s)	0.50	1.063e-01	1.292	2.953
	0.75	2.327e+01	2.880	6.616

Realizado por: Ruiz, J., 2023

La caída de presión del fluido en las válvulas se puede cuantificar utilizando el coeficiente de pérdida de la válvula (k , Ecuación 15). La ilustración 4-6 muestra el coeficiente de pérdida de la válvula de compuerta (k) en función del Número de Reynolds, mientras que la tabla 4-7 expone los datos correspondientes para los dos sistemas parcialmente cerrados evaluados ($a/D=0.50$ y $a/D=0.75$). Como era de esperar, el coeficiente de pérdidas ha mostrado un valor constante en el régimen de flujo turbulento, y valores significativamente más altos en el sistema más cerrado ($k_{a/D=0.75} > k_{a/D=0.50}$) (Hwang, Pal 1998; Esteves, Cristianini 2012, p. 8).

Por otro lado, la tabla 4-8 muestra los porcentajes de error para cada grado de apertura. Los porcentajes de error más altos para la apertura $a/D=0.75$ en comparación con $a/D=0.5$ pueden atribuirse a la mayor complejidad fluidodinámica en la configuración más cerrada y algunos detalles en el modelo que pudieron pasar por alto. Como menciona White (2008), p. 379, “las válvulas son componentes sensibles a los detalles de diseño y fabricación, lo que puede generar posibles errores de hasta el 50% en los resultados”. En las simulaciones con geometrías contemporáneas, esta complejidad inherente de las válvulas justifica los elevados porcentajes de error observados para $a/D=0.75$.

Tabla 4-7: Valores de “ k ” calculados en la simulación (válvula de compuerta) y resultados de otros autores

Velocidad entrada	Re	K (simulación) a/D= 0.5	K (simulación) a/D=0.75	K Steves (2012) a/D=0.5	K Steves (2012) a/D=0.75
0,05249	1000	2,415070	16,619120	2,42743465	12,6568278
0,09974	1900	2,142708	15,078868	2,02464558	11,4417303
0,68241	13000	1,579184	12,968432	1,40499653	9,78108881
1,04987	20000	1,566914	12,650661	1,40633305	9,77720102
1,575	30000	1,501148	11,961806	1,38575064	9,71024134

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-8: Porcentaje de error para los sistemas evaluados (a/D=0.5 y a/D=0.75) respecto a Esteves & Cristianini (2012)

Reynolds	%Error (a/D=0.5)	%Error (a/D=0.75)
1000	0,50938768	31,3055676
1900	5,83124337	31,7883555
13000	12,3976867	32,5867931
20000	11,4184319	29,3893894
30000	8,32743817	23,187527

Realizado por: Ruiz Jose, 2023

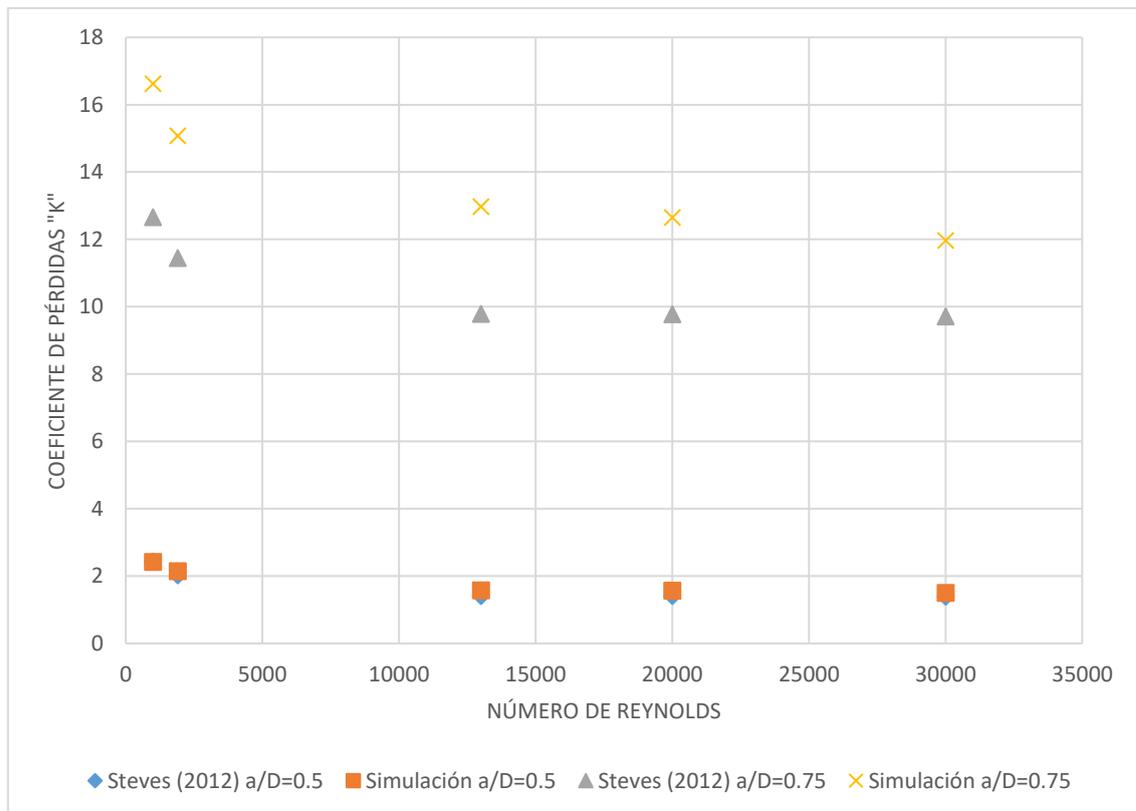


Ilustración 4-6: Validación de resultados de la simulación (válvula de compuerta), coeficiente “k” vs número de Reynolds

Realizado por: Ruiz, J., 2023

4.2.3 Pérdidas de carga y medición de caudal en tubos de Venturi

La ilustración 4-7 muestra el contorno de presión para la geometría de un tubo de Venturi con presiones de entrada de 150000, 250000 y 350000 Pa. En la tabla 4-9 se presentan los valores de presión máxima y mínima como referencia para la ilustración mencionada. En el punto de transición entre la sección convergente y la garganta, se produce una disminución abrupta en la presión en los contornos del tubo. Del mismo modo, se registra una caída de presión de menor

intensidad en la región opuesta, ubicada en el extremo derecho de la garganta. Es importante destacar que la mayor reducción de presión se produce en la garganta del tubo, y esto se debe a la aceleración del flujo y al cumplimiento del principio de la continuidad, resultado de la diferencia significativa de presión entre la entrada y la salida del tubo Venturi (de las Heras, Soldevila 2012, pp. 259-260).

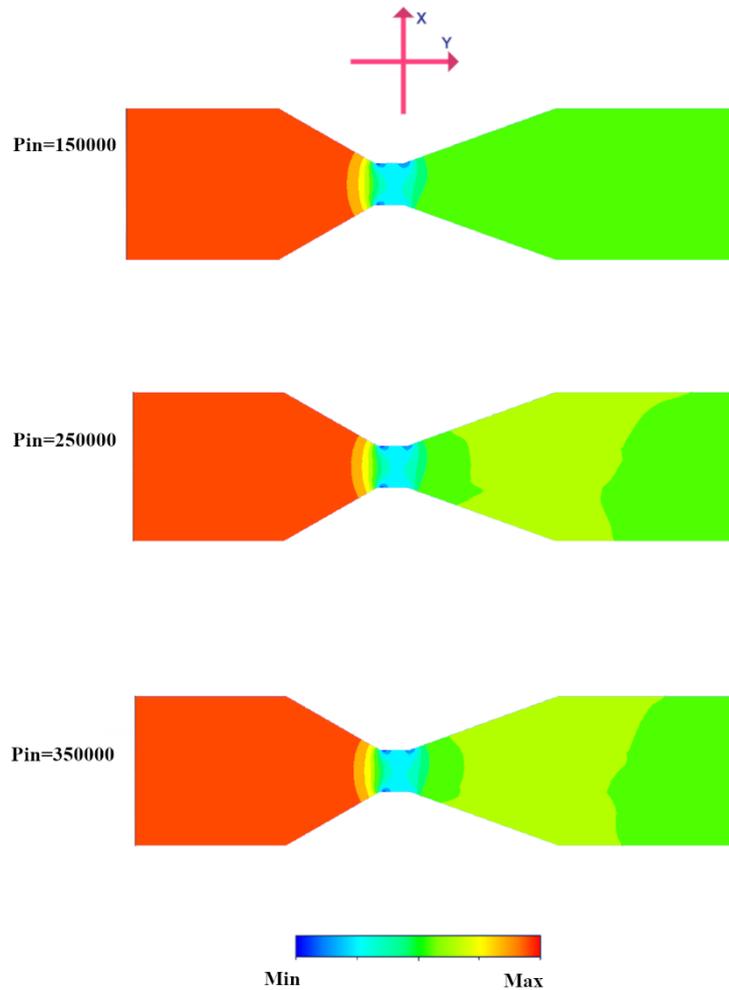


Ilustración 4-7: Contornos de presión para geometría de Tubo Venturi a diferentes presiones de entrada

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-9: Valores de presión máxima y mínima para un Tubo Venturi en distintas presiones de entrada, ver ilustración 4-7

P_{in}	150000	250000	350000
P_{max}	149735	249256	348782
P_{min}	-40631.9	-121948	-267449

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Al examinar el contorno de velocidad correspondientes a la geometría del tubo de Venturi, mostrado en la ilustración 4-8, se puede apreciar un fenómeno significativo: el incremento de la velocidad del flujo en la zona de la garganta y su posterior disminución en la sección divergente del tubo. En esta última región, las líneas de contorno de velocidad adquieren una forma parabólica, debido a la influencia de la capa límite. Es importante destacar que la máxima velocidad del flujo se encuentra en la simetría axial del eje y , disminuyendo progresivamente hacia las paredes del tubo Venturi. Esto implica la existencia de un gradiente de velocidad en el campo de flujo (Li et al. 2022, p. 4). Los valores máximos de velocidad se muestran en la tabla 4-10.

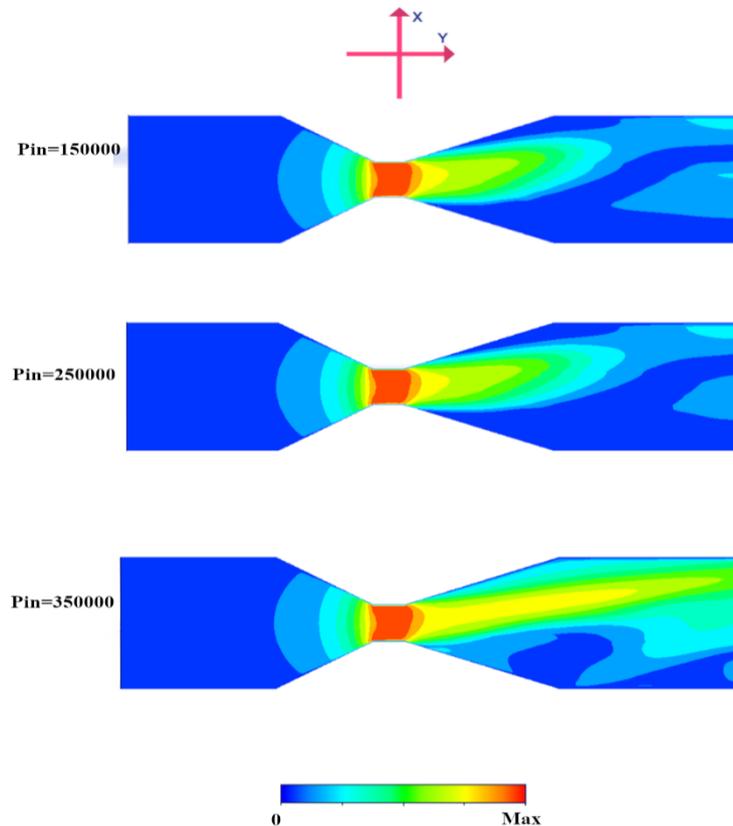


Ilustración 4-8: Contornos de velocidad para geometría de Tubo Venturi a diferentes presiones de entrada

Realizado por: Ruiz, J., 2023

Tabla 4-10: Valores de velocidad máxima para un Tubo Venturi en distintas presiones de entrada, en todos los casos la velocidad mínima fue 0 (m/s), ver ilustración 4-8

P_{in}	150000	250000	350000
V_{max}	12.4564	22.9386	295675

Realizado por: Ruiz, J., 2023

La tabla 4-11 presenta una comparación entre el caudal medido y simulado por (Tang, Juárez, Li 2019) y el caudal predicho mediante simulaciones numéricas. Se observa una buena concordancia general entre los resultados obtenidos mediante simulación y los resultados experimentales. Se registró diferencias entre los valores de Tang (2019) y medidos en distintas presiones diferenciales, siendo la diferencia máxima del 33%. Los valores fueron obtenidos mediante la herramienta “Reportes de flujos” en la sección “Resultados” en Fluent.

Tabla 4-11: Comparación entre los valores obtenidos por Tang et al., (2019) y los simulados

Pre. In (Mpa)	Pre. Out (MPa)	Medido (Kg/s)	Tang (2019) (Kg/s)	Sim. (Kg/s)	%Error
0,15	0,1	1,64	1,7	1,80553	6,20764706
0,2	0,1	2,38	2,49	2,66	6,82730924
0,25	0,1	2,43	2,53	2,872	13,5177866
0,3	0,1	2,42	2,54	3,36	32,2834646
0,35	0,1	2,43	2,55	3,41	33,7254902

Realizado por: Ruiz, J., 2023

4.3 Descripción de guía de práctica de simulación numérica

Los resultados de esta investigación se han materializado en material didáctico desarrollado para práctica de laboratorio basadas en las simulaciones y modelos desarrollados. Esta guía ofrece a los estudiantes de Ingeniería Química de la ESPOCH la oportunidad de experimentar de manera práctica y comprender los fenómenos relacionados con el flujo de fluidos en codos, válvulas y un tubo de Venturi.

La práctica se centra en la simulación numérica de pérdidas localizadas en tuberías en régimen turbulento, específicamente considerando pérdidas menores en un codo de 90°, válvulas parcialmente abiertas y un tubo de Venturi. Esta práctica se encuentra detalladamente expuesta en el anexo D. La guía incluye una sección teórica introductoria, seguida de la metodología de simulación. Se describe el software utilizado y se explican los pasos seguidos, incluyendo la

definición de las condiciones de contorno y la elección del modelo de turbulencia. La sección de discusión de resultados interpreta los hallazgos de la simulación, se analiza las gráficas de velocidad y presión.

4.3.1 Análisis computacional de pérdidas menores en tuberías, ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en régimen turbulento

Esta práctica se centra en la simulación numérica de tuberías para el estudio de pérdidas menores causadas por un Tubo de Venturi, válvula de compuerta y codo de 90 en régimen turbulento. Los estudiantes analizarán cómo estas pérdidas influyen en la caída de presión en el sistema al simular fluidos newtonianos. Se les proporcionará casos de flujo turbulento para explorar el comportamiento del flujo de fluidos. Cada estudiante llevará a cabo simulaciones CFD con distintas presiones de entrada para realizar un análisis gráfico y matemático. Deben incluir lo siguiente en su informe de laboratorio:

- Contornos de velocidad
- Contornos de presión estática
- Cálculo de la pérdida de carga calculada utilizando el factor de coeficiente de pérdidas “k”
- Interpretación de gráficas de velocidad y presión en flujo turbulento

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplicó modelos CFD como complemento didáctico de la cátedra de mecánica de fluidos de la carrera de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, lo que permitió revelar a los estudiantes la existencia de distintos fenómenos hidráulicos como puntos de estancamiento, cavitación, pérdidas de carga y presiones negativas a causa de la presencia de accesorios en sistemas de tuberías. Dada la naturaleza de estos fenómenos, a menudo son costosos de evaluar mediante pruebas de campo o equipos de laboratorio, la simulación numérica proporcionó una manera eficaz de visualizar y estudiar en profundidad estos procesos. La información y simpleza de las geometrías, además de una metodología clara y secuencial son clave para introducir a la simulación CFD, lo que facilita la comprensión de los principios fundamentales del pensum de mecánica de fluidos.

Se modeló, mediante la herramienta de ANSYS® DesignModeler, una válvula de compuerta, un codo de 90° y un tubo de Venturi. Estos modelos, basados en parámetros específicos, permiten una replicación simplificada y prometen su aplicación en simulaciones CFD con geometrías

simples aplicadas a la academia. La falta de modelos físicos y algunos detalles de diseño pudieron afectar la validez del modelo, encontrando errores porcentuales durante la validación de hasta el 33% en el caso la válvula de compuerta y el tubo de Venturi, estos se discutieron en la sección de resultados.

Se simuló, con ayuda del software ANSYS® Fluent, el comportamiento de un fluido que circula en codos, válvulas y un tubo de Venturi. Esto se logró gracias a definición de condiciones de frontera, como la velocidad o presión de entrada y presión manométrica de 0 a la salida, el modelo de turbulencia se escogió entre $k-\epsilon$ y laminar según el régimen de flujo. Los resultados se compararon con datos de bibliografía y fueron los valores en régimen turbulento los que presentaron mejores resultados con errores porcentuales por debajo del 19% y del 13% en $a/D=0.5$ para el codo y la válvula de compuerta, respectivamente. El tubo de Venturi presentó diferencias de hasta el 33%.

Se realizó un análisis de las pérdidas de carga en una válvula de compuerta, codo y un tubo de Venturi mediante simulación numérica. Al interpretar los contornos de presión y velocidad a diferentes valores de Reynolds, se identificaron puntos de estancamiento en la válvula y el codo, así como cavitación y presiones negativas significativas en la válvula de compuerta. Se evidenció la aplicación del principio de conservación del momento en el flujo a través del codo de 90° , por un aumento de la presión en el exterior y una disminución en el interior. La válvula de compuerta, en situaciones de bajos números de Reynolds y mayores aperturas, presentó una marcada reducción de presión, indicativa de cavitación. La mayor caída de presión en el tubo de Venturi se presentó en la garganta, originada por la aceleración del flujo y el principio de continuidad, acentuado por la diferencia de presiones entre la entrada y salida del tubo. En todos los accesorios, las pérdidas fueron más notorias a bajos números de Reynolds, en consonancia con estudios previos revisados en la literatura.

Se elaboró la guía de práctica de simulación numérica “Análisis computacional de pérdidas menores en tuberías, ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en varios regímenes de flujo” para su uso en la cátedra de mecánica de fluidos de Ingeniería Química en la ESPOCH, este trabajo pretende enriquecer el aprendizaje al unir teoría y práctica. La simulación numérica resulta bastante útil para replicar experiencias tradicionalmente basadas en mediciones experimentales para la enseñanza de mecánica de fluidos en un entorno virtual. Se realizó una cuidadosa identificación y estructuración de los aspectos clave de la práctica, abarcando desde la formulación de ecuaciones fundamentales hasta la interpretación de resultados y conclusiones. Además, se brindó una detallada descripción de los pasos técnicos esenciales para

la ejecución exitosa de las simulaciones, que se encuentran evidenciados en los anexos de este trabajo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda llevar a cabo un análisis más detallado de los parámetros de simulación utilizados, considerando variaciones en modelos de turbulencia, condiciones de frontera y métodos de solución para evaluar su impacto en la precisión de los resultados. Esto permitirá identificar configuraciones óptimas que maximicen la concordancia entre las simulaciones y los valores teóricos o experimentales.

Para mejorar la validación de los resultados obtenidos, se sugiere en trabajos futuros la realización de experimentos en laboratorio que permitan comparar directamente los valores simulados con los valores medidos. Esto proporcionaría una base sólida para evaluar la capacidad del modelo CFD en reproducir con precisión los fenómenos hidráulicos estudiados, y permitiría ajustes necesarios en los parámetros de simulación.

Se recomienda desarrollar materiales didácticos complementarios, como tutoriales y guías visuales, que ayuden a los estudiantes a comprender los conceptos fundamentales de la simulación numérica y su aplicación en fenómenos fluidodinámicos. Estos recursos podrían enriquecer la enseñanza de la mecánica de fluidos y mejorar la experiencia de aprendizaje de los estudiantes.

Se propone la mejora continua y estructurada de las prácticas simulación numérica basada en CFD en la cátedra de mecánica de fluidos, acompañada de una revisión y actualización periódica de las guías de prácticas. Este enfoque garantizará que los estudiantes adquieran habilidades y conocimientos prácticos actualizados, alineándolos con las tecnologías y enfoques metodológicos más recientes, esenciales tanto en la industria como en la investigación

BIBLIOGRAFÍA

ADAIR, Desmond, BAKENOV, Zhumabay y JAEGER, Martin, 2014. Building on a traditional chemical engineering curriculum using computational fluid dynamics. *Education for Chemical Engineers*. Vol. 9, n.º 4, pp. e85-e93. DOI 10.1016/j.ece.2014.06.001.

ALANDETE, Leopoldo, 2019. *Sistema de generación de energía eléctrica por aprovechamiento de corrientes de agua* [en línea]. Patent special issue y special section 20192019. Recuperado a partir de : <https://www.docsiy.com/es/patente-de-un-tubo-de-venturi/5972090/>. [accedido 25 febrero 2023]. WO2010086474A1.

ANSYS, Inc, 2022. Getting Started with Ansys Fluent - Basics . *ANSYS Innovation Courses* [en línea]. 2022. Recuperado a partir de : <https://courses.ansys.com/index.php/courses/getting-started-with-ansys-fluent-basics/> [accedido 26 febrero 2023].

BORJA, Danielita, 2012. *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE TUBERÍAS EN PARALELO PARA LA MEDICIÓN DE LAS CONSTANTES DE ACCESORIOS* [en línea]. Riobamba : Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Recuperado a partir de : <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1980> [accedido 24 febrero 2023].

ÇENGEL, Yunus A., CIMBALA, John M. y BALDERAS TAPIA, Luis, 2018. *Mecánica de fluidos : fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill Interamericana. ISBN 1456260944.

CHUQUÍN, Nelson Santiago, CHUQUÍN, Juan Pablo y CHUQUÍN, Daniel Antonio, 2019. *Hidráulica en Tuberías y Accesorios (Válvulas Industriales): Pérdidas , Casos reales de Aplicación y Selección de Bombas Centrífugas*. ISBN 9789942802552.

COMEVAL VALVE SYSTEMS, 2019. Válvulas Industriales, Glosario y Definiciones. *Formación* [en línea]. 2019. Recuperado a partir de : <https://www.comeval.es/formacion/formacion-valvulas-idustriales-glosario-definiciones/> [accedido 27 febrero 2023].

DARBY, Ron y CHHABRA, Raj, 2016. *Chemical Engineering Fluid Mechanics*. Third edit. ISBN 9781498724456.

DE LAS HERAS, Salvador y SOLDEVILA, Jordi, 2012. *Mecánica de fluidos en ingeniería* [en línea]. ISBN 978-84-7653-936-1. Recuperado a partir de : www.upc.edu/idp

ESTEVEZ, Augusto y CRISTIANINI, Marcelo, 2012. Using computational fluid dynamics (CFD) for evaluation of fluid flow through a gate Valve. *International Journal of Food Engineering*. Vol. 8, n.º 4. DOI 10.1515/1556-3758.2207.

FAUROUX, Luis Enrique, ETEROVIC, Jorge Esteban y DEGAETANI, Omar Jorge, 2018. El Efecto Venturi Y Su Incidencia En El Rendimiento De Turbinas Micro-Hidraulicas the Venturi Effect and Its Incidence in the Performance of Micro-Hydraulic Turbines. . Vol. 1, pp. 2525-1333.

FLETCHER, David F., 2022. The future of computational fluid dynamics (CFD) simulation in the chemical process industries. *Chemical Engineering Research and Design*. Vol. 187, pp. 299-305. DOI 10.1016/J.CHERD.2022.09.021.

GAJBHIYE, Bhavesh D. et al., 2020. Teaching turbulent flow through pipe fittings using computational fluid dynamics approach. *Engineering Reports*. Vol. 2, n.º 1, p. e12093. DOI 10.1002/ENG2.12093.

GARCÍA GUTIÉRREZ, Luis, 1999. *TEORÍA DE LA MEDICIÓN DE CAUDALES Y VOLÚMENES DE AGUA E INSTRUMENTAL NECESARIO DISPONIBLE EN EL MERCADO*. Madrid. ISBN 84-7840-361-2.

GÖEBEL, Jan, 2021. ¿Qué es una simulación CFD (simulación de flujo)? *Ingeniería Goebel* [en línea]. 2021. Recuperado a partir de : <https://www.goebel-engineering.com/es/que-es-una-simulacion-de-cfd-flujos/amp/> [accedido 7 diciembre 2022].

GOLSHAN, Shahab et al., 2020. Review and implementation of CFD-DEM applied to chemical process systems. *Chemical Engineering Science*. Vol. 221, p. 31. DOI 10.1016/j.ces.2020.115646.

HU, Howard H., 2012. Computational Fluid Dynamics. En : *Fluid Mechanics*, pp. 421-472. Elsevier. DOI 10.1016/B978-0-12-382100-3.10010-1.

HU, Junling, ZHANG, Linfeng y XIONG, Xingguo, 2008. Teaching Computational Fluid Dynamics (CFD) to design engineers. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*. DOI 10.18260/1-2--3898.

HWANG, Ching Yi J. y PAL, Rajinder, 1998. Pressure Losses in Globe and Gate Valves during Two-Phase Oil/Water Emulsion Flow. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. Vol. 37, n.º 2, pp. 636-642. DOI 10.1021/IE970345Z.

LI, Peng et al., 2022. Flow field characteristics analysis of Venturi tube with cavity. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 2343, n.º 1. DOI 10.1088/1742-6596/2343/1/012005.

LIM, Young-il, 2021. *Computational Fluid Dynamics (CFD) of Chemical Processes*. ISBN 9783039439331.

LÓPEZ, Mariano et al., 2016. Uso De La Mecánica De Fluidos Computacional Como Apoyo a La Enseñanza De La Mecánica De Los Fluidos En La Universidad. . N.º September 2014, pp. 8-11.

MIRÓ-HERRERO, Rafael y GOZÁLVEZ-ZAFRILLA, José M., 2008. UTILIZACIÓN DE PROGRAMAS DE COMPUTACIÓN FLUIDODINÁMICA (CFD) EN LA ENSEÑANZA DE LA VENTILACIÓN INDUSTRIAL. *Asociación Iberoamericana de didáctica universitaria* [en línea]. Recuperado a partir de : <https://www.aidu-asociacion.org/utilizacion-de-programas-de-computacion-fluidodinamica-cfd-en-la-ensenanza-de-la-ventilacion-industrial/> [accedido 22 febrero 2023].

MOTT, Robert L. et al., 2015. *Mecánica de fluidos*. Pearson. ISBN 6073232888.

PERUMAL, Kumar y GANESAN, Rajamohan, 2016. CFD modeling for the estimation of pressure loss coefficients of pipe fittings: An undergraduate project. *Computer Applications in Engineering Education*. Vol. 24, n.º 2, pp. 180-185. DOI 10.1002/cae.21695.

QUISHPE SONGOR, Diego Javier, 2021. *Manual de prácticas virtuales de laboratorio, aplicando modelación numérica (CFD) para uso en las asignaturas de mecánica de fluidos e hidráulica aplicada* [en línea]. Quito : Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado a partir de : <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20753> [accedido 22 febrero 2023].

RAMACHANDRAN, Rani Puthukulangara et al., 2017. Computational Fluid Dynamics in Drying Process Modelling—a Technical Review. *Food and Bioprocess Technology* 2017 11:2. Vol. 11, n.º 2, pp. 271-292. DOI 10.1007/S11947-017-2040-Y.

RESNICK, Robert y HALLIDAY, David, 2004. *Física I*. ISBN 88-87030-839.

ROLNY, Rodrigo, MANCUSO, Francisco y COUSSIRAT, Miguel, 2017. Aplicación de la mecánica de fluidos computacional como complemento de enseñanza en la universidad: estudio de flujos compresibles. [en línea]. Vol. 273, n.º 5500, pp. 755-770. Recuperado a partir de : <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/94983> [accedido 22 febrero 2023].

ROLNY, Rodrigo et al., 2018. Aplicación de la Mecánica de Fluidos Computacional a Flujos Compresibles sin Cambios de Área, No Isentrópicos como Complemento de Enseñanza en la Universidad. *Mecánica Computacional* [en línea]. Vol. 36, n.º 22, pp. 1049-1058. Recuperado a partir de : <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/5604> [accedido 22 febrero 2023].

SERT, Cuneyt y NAKIBOGLU, Gunes, 2007. Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) in teaching fluid mechanics. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*. DOI 10.18260/1-2--2351.

STRAMANÁ, Angel E et al., 2014. Uso de Herramientas CFD como Apoyo al Aprendizaje de la Mecánica de los Fluidos en la Universidad. *Mecánica Computacional* [en línea]. Vol. 33, n.º 33, pp. 2127-2141. Recuperado a partir de : <http://venus.ceride.gov.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4811> [accedido 22 febrero 2023].

STREETER, Victor L, WYLIE, E Benjamin y BEDFORD, Keith W, 2000. *Mecánica de los Fluidos*. 9. ISBN 958-600-987-4.

TANG, Pan, JUÁREZ, Juan Manzano y LI, Hong, 2019. Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the venturi tube using the CFD method. *Water (Switzerland)*. Vol. 11, n.º 10. DOI 10.3390/w11102194.

TORRAS, S et al., 2006. Simulación computacional de la hidrodinámica del flujo incompresible a través de un codo. *Revista científica UNET*. Vol. 18, pp. 212-216.

TU, Jiyuan., YEOH, Guan Heng. y LIU, Chaoqun., 2013. *Computational fluid dynamics : a practical approach*. Elsevier/Butterworth-Heinemann. ISBN 0080982433.

VALIENTE BARDERAS, Antonio, 2016. *Ingeniería de Fluidos*. México D.F.

VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W., 2007. *Introduction to Computational Fluid Dynamics, An: The Finite Volume Method* [en línea]. Second. Essex, England : Pearson Education Limited. ISBN 0131274988. Recuperado a partir de : <http://www.mie.utoronto.ca/labs/mussl/cfd20.pdf> [accedido 25 febrero 2023].

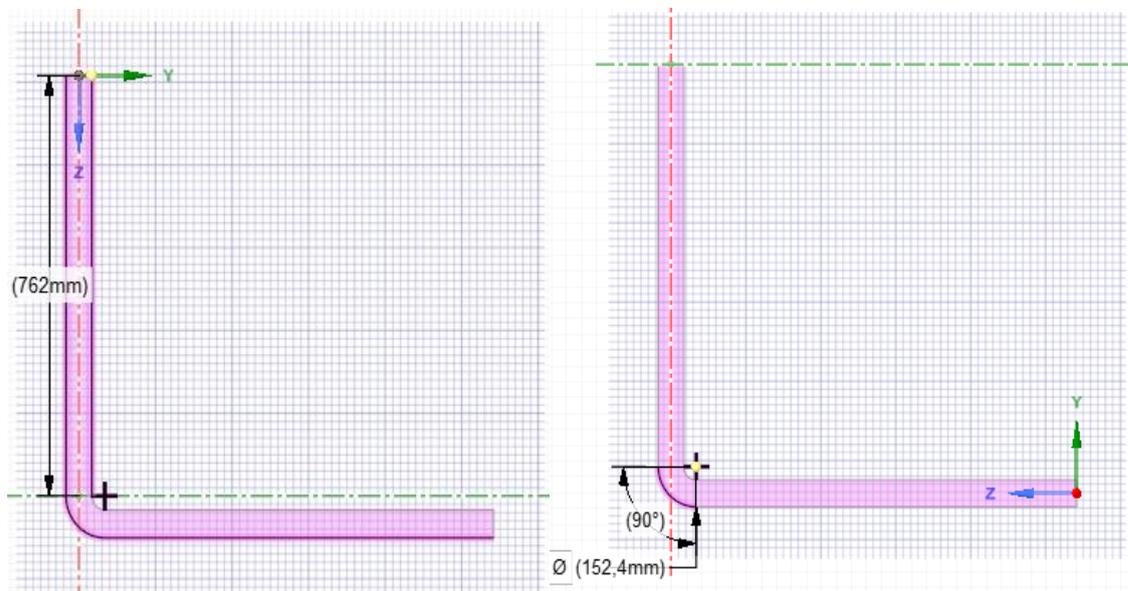
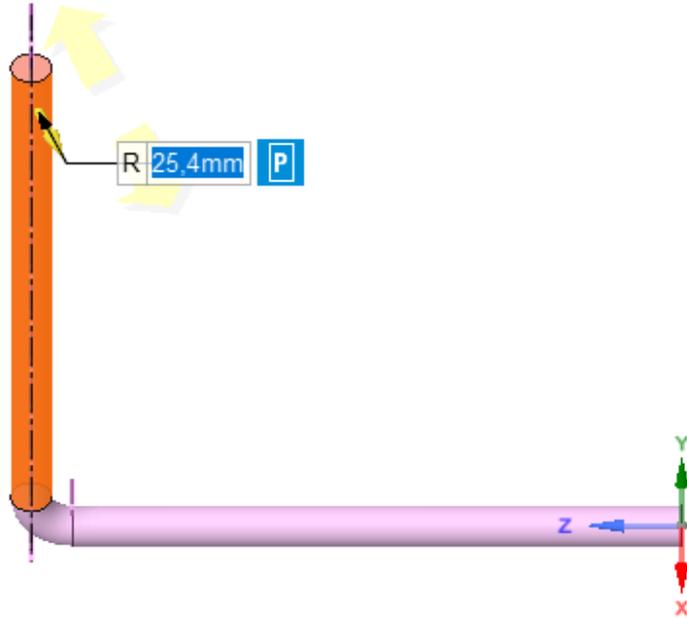
WENDT, John F. et al., 2009. *Computational fluid dynamics: An introduction*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783540850557.

WHITE, Frank M., 2008. *Mecánica de fluidos*. McGraw-Hill. ISBN 8448166035.

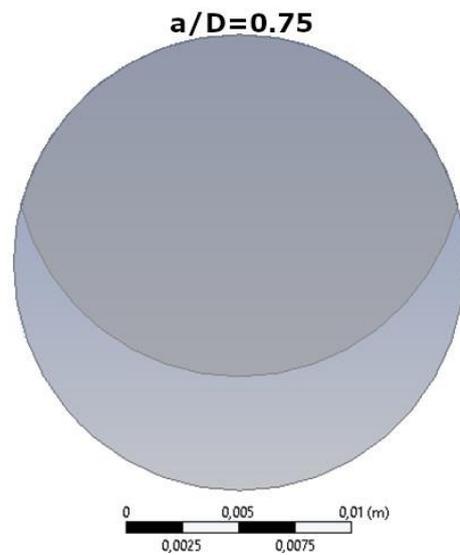
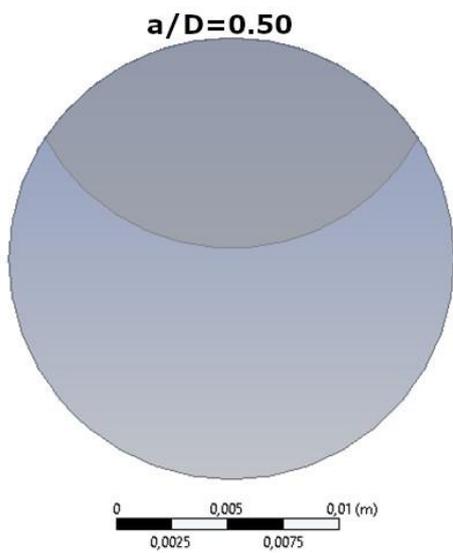
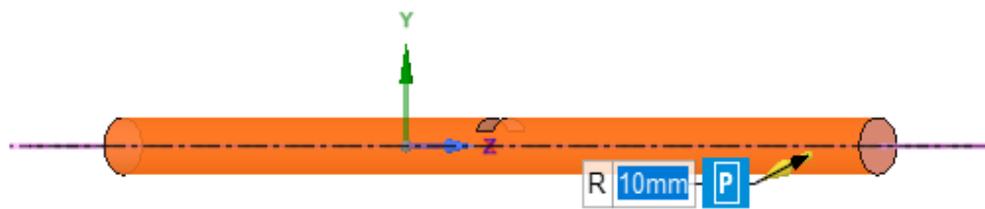
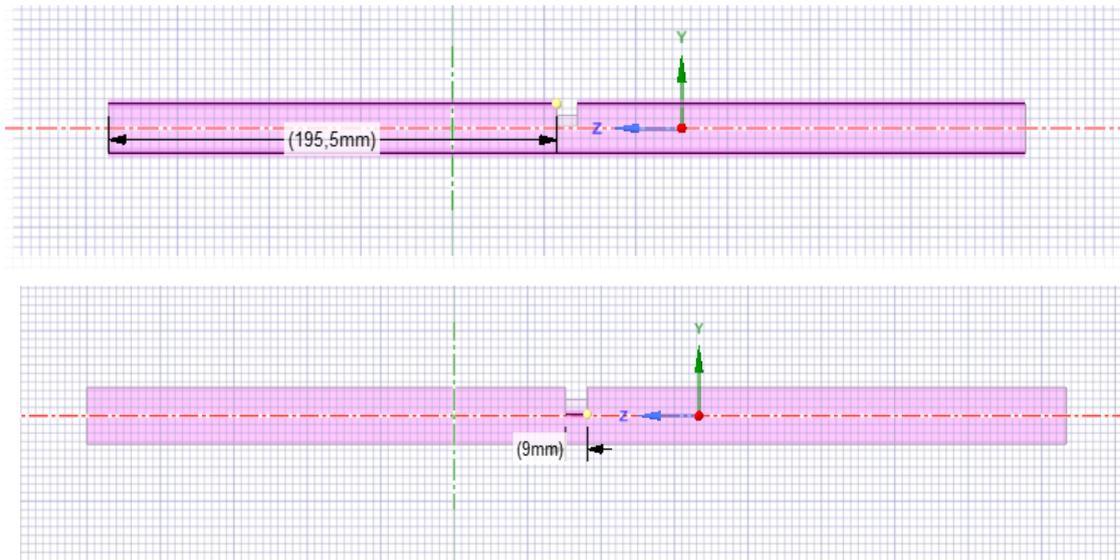
WISMER, Samantha E., DOSSE, Lee A. y BARRY, Matthew M., 2022. INTEGRATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS INTO AN INTRODUCTORY FLUID MECHANICS COURSE. *Proceedings of the Thermal and Fluids Engineering Summer Conference*. Vol. 2022-May, pp. 441-449. DOI 10.1615/TFEC2022.EMT.040708.

ANEXOS

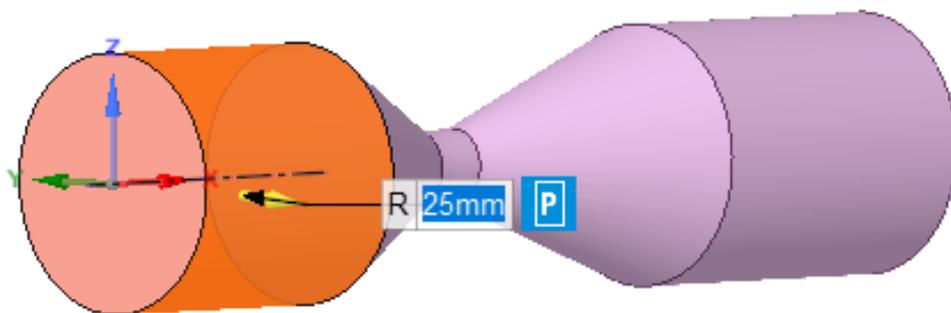
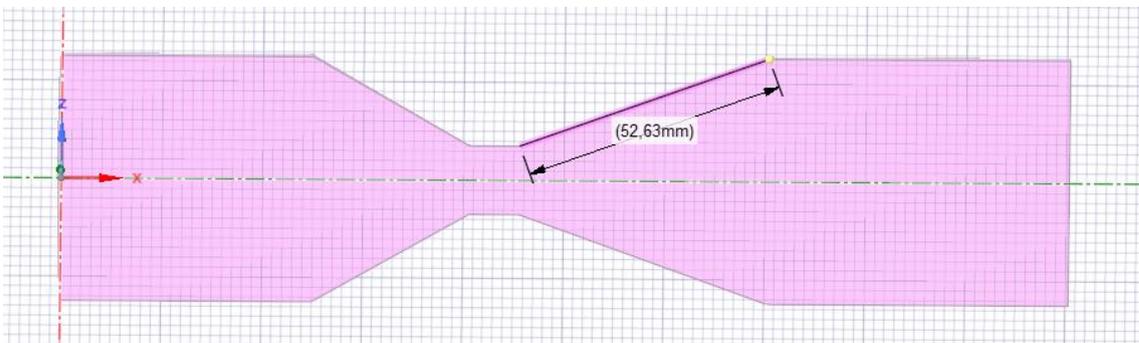
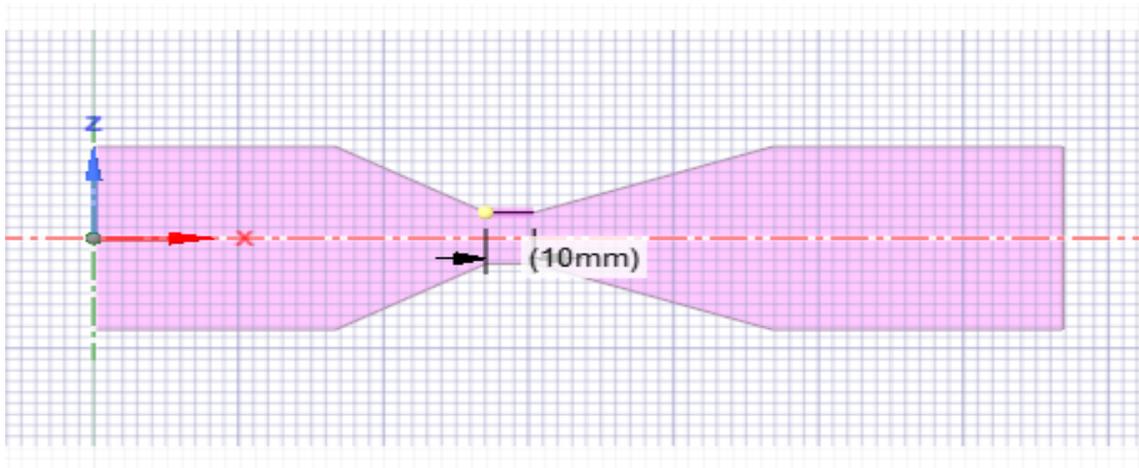
ANEXO A: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (CODOS 90°)



ANEXO B: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (VÁLVULA DE COMPUERTA)



ANEXO C: MODELOS GEOMÉTRICOS TRIDIMENSIONALES ACOTADOS (TUBO DE VENTURI)



ANEXO D: GUIA DE PRÁCTICA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA (SIN RESOLVER)

INFORME N° 1

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE PÉRDIDAS MENORES EN TUBERÍAS, OCASIONADAS POR CODOS (90°), VÁLVULA DE COMPUERTA Y UN TUBO DE VENTURI EN RÉGIMEN TURBULENTO

1. Objetivos

1.1. General:

Analizar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) las pérdidas menores en tuberías ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en régimen turbulento

1.2 Específicos (mínimo 3)

2. Marco teórico

-Pérdidas secundarias.

-Cavitación, puntos de recirculación en sistemas hidráulicos

- Dinámica de fluidos computacional

-Principio de la continuidad y conservación del momento

3. Parte Experimental

3.1. Materiales y Equipos:

- Computador Windows de 64 bits, procesador multi-core, como Intel Core i5 o equivalente. Memoria RAM: Al menos 8 GB de RAM.
- Materiales de oficina
- Modelos CAD de geometrías (Codo, válvula y tubo de Venturi), disponible en: [ARCHIVOS PRÁCTICAS CFD](#)
- Manual de introducción a Ansys Workbench disponible en: [MANUAL DE USO ANSYS](#)

3.2. Procedimiento de mallado, simulación y post procesamiento:

1. Ejecutar el programa Workbench 2023 R2.
2. Seleccionar Fluid Flow (Fluent) de la columna Toolbox y arrastrar a Project Schematic.
3. En “Workbench”, Clic derecho en “Geometry” y seleccionar “Import geometry”, se importan los modelos CAD previamente descargados.
4. Ahora, clic derecho en “Geometry” y clic en “Edit Geometry in DesignModeler”. Luego, en la ventana que se abra, clic en “Generate”, visualizar el modelo y obtener las imágenes correspondientes. Cerrar la ventana “DesignModeler”.
5. En “Workbench” Clic derecho en Mesh y seleccionar “Edit”. Dentro de Ansys Mesh, seleccionar la preferencia física (Physics preference), escoger la opción CFD. A continuación, establecer el tamaño de elemento “Element size” según la tabla 1 de la sección de datos.

6. Dentro de Ansys Mesh, click derecho en la opción “Mesh” y seleccionar “Inflation”, a continuación, en la sección “Inflation Option” seleccionar “Total thickness” y escoger el valor especificado de la tabla 1 de la sección de datos. Este paso no aplica para el tubo de Venturi.
7. Señalar entrada del flujo y asignar un nombre presionando la letra N, repetir el mismo proceso para salida y pared del flujo.
8. Dar click a “Generate”, visualizar malla y obtener las imágenes correspondientes. Cerrar la ventana “Mesh” y dar doble clic en la herramienta “Setup”.
9. Realizar un Check del mallado y verificar el método de solución (pressure-based) y el tipo de flujo (steady).
10. En la pestaña “Models”, escoger el modelo de viscosidad (Model viscous), k-epsilon 2eqn en todos los casos, el tipo de modelo k-e y el tratamiento cercano a pared (Near-Wall Treatment) según la tabla 2 de la sección de datos.
11. En la pestaña “Materials”, cargar y seleccionar el agua como fluido de trabajo y el acero como material de las paredes de los dispositivos.
12. Ingresar las condiciones de contorno en la pestaña “Boundary conditions”.
13. Establecer los valores de referencia según la tabla 2.
14. Inicializar la simulación en la pestaña “Initialization”
15. Ingresar el número de iteraciones (150) y correr la simulación en la pestaña “Run Calculation”.
16. De vuelta en el “Workbench”, dar doble clic en “Results”.

3.3. Procedimiento de análisis matemático:

17. Toma de presión aguas arriba y aguas abajo de los accesorios
18. Cálculo del factor de coeficiente de pérdidas “k” usando los datos de presión previamente obtenidos.
19. Visualización e interpretación de los contornos de presión y velocidad en base a la literatura (marco teórico). Obtener las imágenes correspondientes a los contornos de presión y velocidad.
20. Guardar las simulaciones y repetir el procedimiento para todos demás casos de estudio (codo de 90°, Válvula de compuerta $a/D=0.5$ y $a/D=0.75$, Tubo de Venturi).

4. Datos

4.1 Modelo CAD de geometrías importadas

4.2. Parámetros de la Simulación y mallado

Tabla 1: Parámetros para el mallado de las geometrías

	Codo de 90°	Válvula de compuerta para $a/D=0.5$ y $a/D=0.75$	Tubo de Venturi

Tipo de mallado	Malla tetraédrica no estructurada	Malla tetraédrica no estructurada	Malla hexaédrica estructurada
Refinamiento	Refinamiento (Inflation) en los bordes, espesor total (Total thickness) de 5mm	Refinamiento (Inflation) en los bordes, espesor total (Total thickness) 1mm	No
Tamaño de elemento	Tamaño de elementos (Element size): 5.5 mm	Tamaño de elementos (Element size): 2.5 mm	Tamaño de elementos (Element Size): 2 mm

Tabla 2: Parámetros para la simulación

		Codo de 90°	Válvula de compuerta para a/D=0.5 y a/D=0.75	Tubo de Venturi
Condiciones de contorno	Entrada	v(m/s) = 1,5768	v(m/s) = 1,575	v(m/s) = 1.575
	Salida	Pman(Pa) = 0	Pman(Pa) = 0	Pman(Pa) = 0
Modelos de viscosidad (Viscous model) y tratamiento cercano a pared		k-ε (Estándar) - Tratamiento de pared estándar (Estándar wall functions)	k-ε(RNG) - Tratamiento de pared estándar (Estándar wall functions)	k-ε(RNG) - Tratamiento de pared escalable (Escalable wall functions)
Métodos de solución		Simple	Simple	Acoplado

Tabla 3: Propiedades del fluido en los casos de estudio

	Codo de 90°	Válvula de compuerta para a/D=0.5 y a/D=0.75	Tubo de Venturi
Diámetro (m)	0,0508	0,02	0,05
Velocidad (m/s)	1,5768	1,575	1,575
Reynolds	9x10 ⁴	3x10 ⁴	5x10 ⁵

Viscosidad cinemática (m ² /s)	8,9E-07	8,9E-07	8,9E-07
Gravedad (m/s ²)	9,8	9,8	9,8
Peso específico (N/m ³)	9810	9810	9810

4.3 Imágenes del mallado de geometrías

Ilustración: Codo de 90°

Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023

Ilustración: Válvula de compuerta con a/D=0.5

Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023

Ilustración: Válvula de compuerta con a/D=0.75

Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023

Ilustración: Tubo de Venturi

Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023

5. Cálculos y Resultados

5.1 Simulación e interpretación de resultados gráficos

Tabla 3: Contorno de velocidad y presión para la geometría de codo a 90°

Contorno de velocidad	Contorno de presión
Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023	Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:	Interpretación:

Tabla 4: Contorno de velocidad y presión para la geometría de válvula de compuerta a/D=0.5

Contorno de velocidad	Contorno de presión
Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023	Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:	Interpretación:

Tabla 5: Contorno de velocidad y presión para la geometría de válvula de compuerta a/D=0.5

Contorno de velocidad	Contorno de presión
------------------------------	----------------------------

Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023	Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:	Interpretación:

Tabla 6: Contorno de velocidad y presión para la geometría de tubo de Venturi

Contorno de velocidad Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023	Contorno de presión Ilustración Realizado por: APELLIDO, Nombre, 2023
Interpretación:	Interpretación:

5.2 Análisis matemático

Tabla 7: Análisis matemático de resultados

	Codo de 90°	Válvula de compuerta		Tubo de Venturi
		a/D=0.5	a/D=0.75	
Presión aguas abajo (Pa)				
Presión aguas arriba (Pa)				
Cálculo de caída de presión (MCA)	$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$			
Cálculo del coeficiente de pérdidas "k"	$K = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}}$			

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

7 Cuestionario

¿De qué manera afecta la presencia de presiones negativas en una instalación?

¿De qué manera afecta la cavitación y puntos de recirculación en un sistema de tuberías?

¿Qué es el principio de la continuidad y como explica su existencia durante la simulación del tubo de Venturi?

¿Qué es el principio de la conservación del momento y como explica su existencia durante la simulación del codo de 90°?

8 Referencias Bibliográficas

Citas

Bibliografía

Internet

RESUMEN (150 palabras)

ANEXO E: GUIA DE PRÁCTICA DE SIMULACIÓN NUMÉRICA (RESUELTA)

INFORME N° 1

ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE PÉRDIDAS MENORES EN TUBERÍAS, OCASIONADAS POR CODOS (90°), VÁLVULA DE COMPUERTA Y UN TUBO DE VENTURI EN RÉGIMEN TURBULENTO

1. Objetivos

1.1 General:

Analizar mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) las pérdidas menores en tuberías ocasionadas por codos (90°), válvula de compuerta y un tubo de Venturi en régimen turbulento

1.2 Específicos (mínimo 3)

2. Marco teórico

-Pérdidas secundarias.

-Cavitación, puntos de recirculación en sistemas hidráulicos

- Dinámica de fluidos computacional

-Principio de la continuidad y conservación del momento

3. Parte Experimental

3.1. Materiales y Equipos:

- Computador Windows de 64 bits, procesador multi-core, como Intel Core i5 o equivalente. Memoria RAM: Al menos 8 GB de RAM.
- Materiales de oficina
- Modelos CAD de geometrías (Codo, válvula y tubo de Venturi), disponible en: [ARCHIVOS PRÁCTICAS CFD](#)
- Manual de introducción a Ansys Workbench disponible en: [MANUAL DE USO ANSYS](#)

3.2. Procedimiento de mallado, simulación y post procesamiento:

1. Ejecutar el programa Workbench 2023 R2.
2. Seleccionar Fluid Flow (Fluent) de la columna Toolbox y arrastrar a Project Schematic.
3. En “Workbench”, Clic derecho en “Geometry” y seleccionar “Import geometry”, se importan los modelos CAD previamente descargados.
4. Ahora, clic derecho en “Geometry” y clic en “Edit Geometry in DesignModeler”. Luego, en la ventana que se abra, clic en “Generate”, visualizar el modelo y obtener las imágenes correspondientes. Cerrar la ventana “DesignModeler”.
5. En “Workbench” Clic derecho en Mesh y seleccionar “Edit”. Dentro de Ansys Mesh, seleccionar la preferencia física (Physics preference), escoger la opción CFD. A continuación, establecer el tamaño de elemento “Element size” según la tabla 1 de la sección de datos.

6. Dentro de Ansys Mesh, click derecho en la opción “Mesh” y seleccionar “Inflation”, a continuación, en la sección “Inflation Option” seleccionar “Total thickness” y escoger el valor especificado de la tabla 1 de la sección de datos. Este paso no aplica para el tubo de Venturi.
7. Señalar entrada del flujo y asignar un nombre presionando la letra N, repetir el mismo proceso para salida y pared del flujo.
8. Dar click a “Generate”, visualizar malla y obtener las imágenes correspondientes. Cerrar la ventana “Mesh” y dar doble clic en la herramienta “Setup”.
9. Realizar un Check del mallado y verificar el método de solución (pressure-based) y el tipo de flujo (steady).
10. En la pestaña “Models”, escoger el modelo de viscosidad (Model viscous), k-epsilon 2eqn en todos los casos, el tipo de modelo k-e y el tratamiento cercano a pared (Near-Wall Treatment) según la tabla 2 de la sección de datos.
11. En la pestaña “Materials”, cargar y seleccionar el agua como fluido de trabajo y el acero como material de las paredes de los dispositivos.
12. Ingresar las condiciones de contorno en la pestaña “Boundary conditions”.
13. Establecer los valores de referencia según la tabla 2.
14. Inicializar la simulación en la pestaña “Initialization”
15. Ingresar el número de iteraciones (150) y correr la simulación en la pestaña “Run Calculation”.
16. De vuelta en el “Workbench”, dar doble clic en “Results”.

3.4. Procedimiento de análisis matemático:

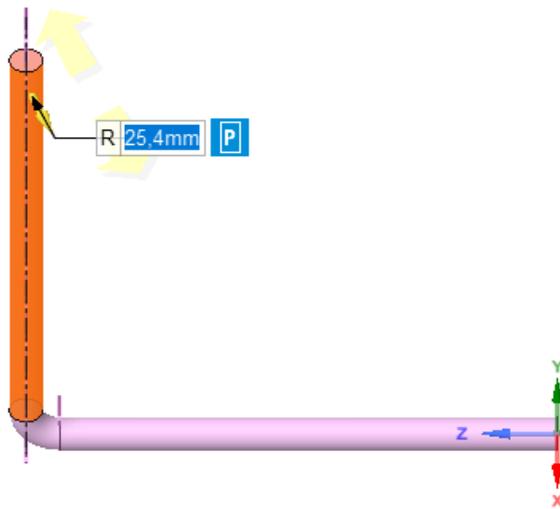
17. Toma de presión aguas arriba y aguas abajo de los accesorios
18. Cálculo del factor de coeficiente de pérdidas “k” usando los datos de presión previamente obtenidos.
19. Visualización e interpretación de los contornos de presión y velocidad en base a la literatura (marco teórico). Obtener las imágenes correspondientes a los contornos de presión y velocidad.
20. Guardar las simulaciones y repetir el procedimiento para todos demás casos de estudio (codo de 90°, Válvula de compuerta $a/D=0.5$ y $a/D=0.75$, Tubo de Venturi).

4. Datos

4.1 Modelo CAD de geometrías importadas

4.1.1 Codo de 90°

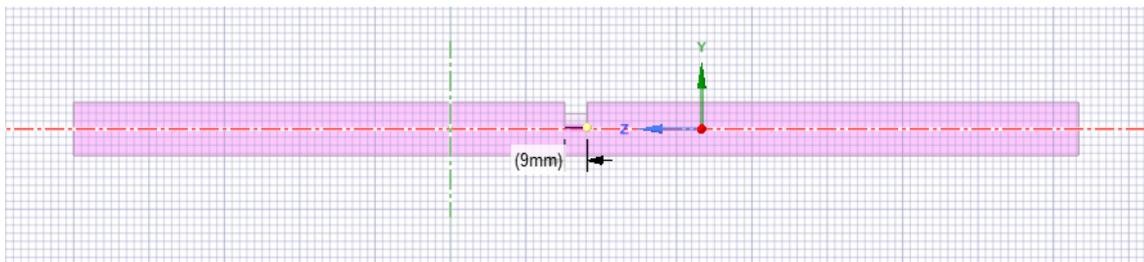
Ilustración 1: Modelo 3D codo de 90°



Realizado por: Ruiz, Jose 2023

4.1.2 Válvula de compuerta

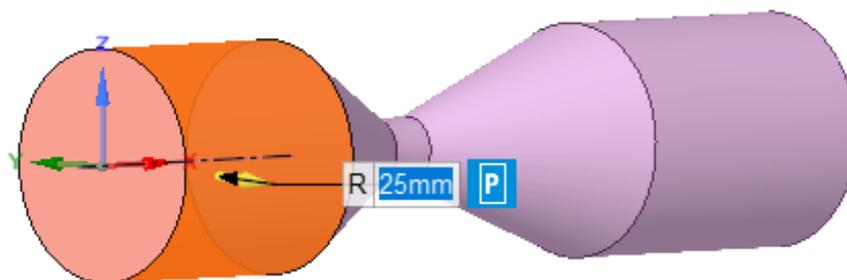
Ilustración 2: Modelo 3D válvula de compuerta



Realizado por: Ruiz, Jose 2023

4.1.3 Tubo de Venturi

Ilustración 3: Modelo 3D tubo de Venturi



Realizado por: Ruiz, Jose 2023

4.2. Parámetros de la Simulación y malla

Tabla 8: Parámetros para el mallado de las geometrías

	Codo de 90°	Válvula de compuerta para a/D=0.5 y a/D=0.75	Tubo de Venturi
Tipo de mallado	Malla tetraédrica no estructurada	Malla tetraédrica no estructurada	Malla hexaédrica estructurada
Refinamiento	Refinamiento (Inflation) en los bordes, espesor total (Total thickness) de 5mm	Refinamiento (Inflation) en los bordes, espesor total (Total thickness) 1mm	No
Tamaño de elemento	Tamaño de elementos (Element size): 5.5 mm	Tamaño de elementos (Element size): 2.5 mm	Tamaño de elementos (Element Size): 2 mm

Tabla 9: Parámetros para la simulación

		Codo de 90°	Válvula de compuerta para a/D=0.5 y a/D=0.75	Tubo de Venturi
Condiciones de contorno	Entrada	v(m/s) = 1,5768	v(m/s) = 1,575	v(m/s) = 1,575
	Salida	Pman(Pa) = 0	Pman(Pa) = 0	Pman(Pa) = 0
Modelos de viscosidad (Viscous model) y tratamiento cercano a pared		k-ε (Estándar) - Tratamiento de pared estándar (Estándar wall functions)	k-ε(RNG) - Tratamiento de pared estándar (Estándar wall functions)	k-ε(RNG) - Tratamiento de pared escalable (Escalable wall functions)

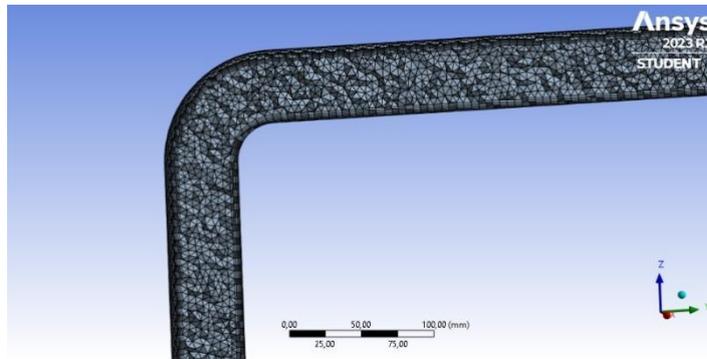
Tabla 3: Propiedades del fluido en los casos de estudio

	Codo de 90°	Válvula de compuerta para a/D=0.5 y a/D=0.75	Tubo de Venturi
Díámetro (m)	0,0508	0,02	0,05
Velocidad (m/s)	1,5768	1,575	1,57
Reynolds	9×10^4	3×10^4	5×10^5

Viscosidad cinemática (m ² /s)	8,9E-07	8,9E-07	8,9E-07
Gravedad (m/s ²)	9,8	9,8	9,8
Peso específico (N/m ³)	9810	9810	9810

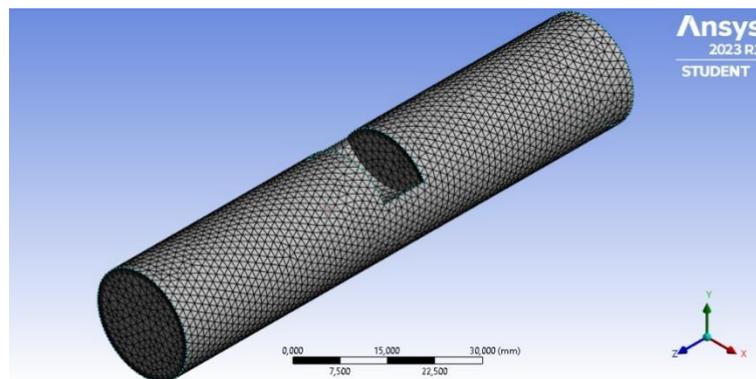
4.3 Imágenes del mallado de geometrías

Ilustración 4: Mallado de codo de 90°



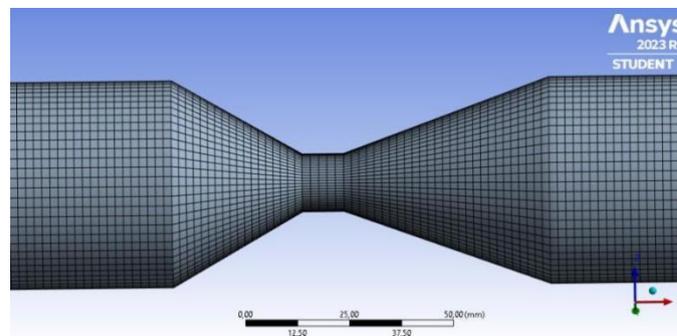
Realizado por: Ruiz, Jose 2023

Ilustración 5: Mallado de válvula de compuerta con a/D=0.5



Realizado por: Ruiz, Jose 2023

Ilustración 6: Mallado de tubo de Venturi



Realizado por: Ruiz, Jose 2023

5. Cálculos y Resultados

5.1 Simulación e interpretación de resultados gráficos

Tabla 10: Contorno de velocidad y presión para la geometría de codo a 90°

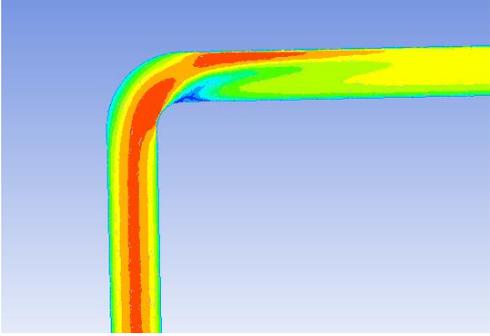
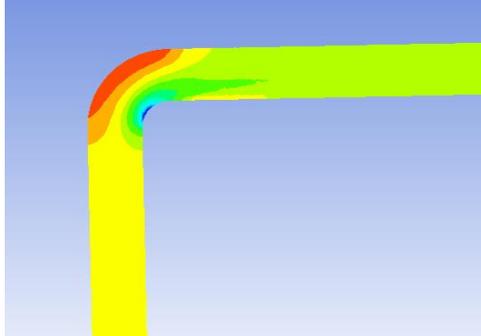
<p>Ilustración 7. Contorno de velocidad</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>	<p>Ilustración 8. Contorno de presión</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>
<p>Interpretación: Se observa un aumento de la velocidad en el interior del codo y una disminución en el exterior del codo, además se observan velocidades cercanas a cero en aguas abajo.</p>	<p>Interpretación: Se observa un aumento de la presión en el exterior del codo y una disminución de la presión en el interior del mismo.</p>

Tabla 11: Contorno de velocidad y presión para la geometría de válvula de compuerta $a/D=0.5$

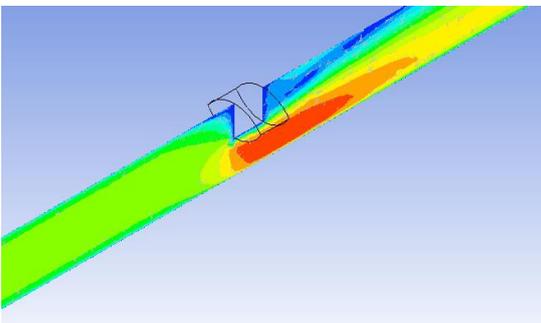
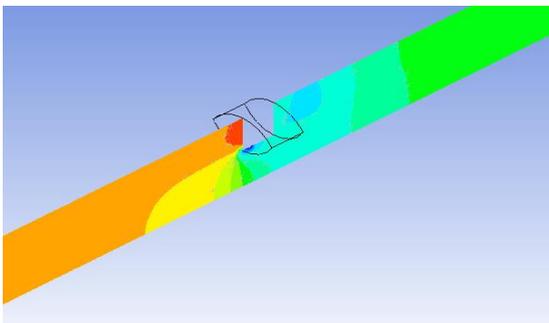
<p>Ilustración 9. Contorno de velocidad</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>	<p>Ilustración 10. Contorno de presión</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>
<p>Interpretación: Se observan dos puntos de estancamiento, en aguas arriba de menor magnitud y en aguas abajo con mayor magnitud.</p>	<p>Interpretación: Se observa una caída de la presión gradual, la presión máxima se encuentra en aguas arriba del accesorio.</p>

Tabla 12: Contorno de velocidad y presión para la geometría de válvula de compuerta $a/D=0.5$

<p>Ilustración 11. Contorno de velocidad</p>	<p>Ilustración 12. Contorno de presión</p>
---	---

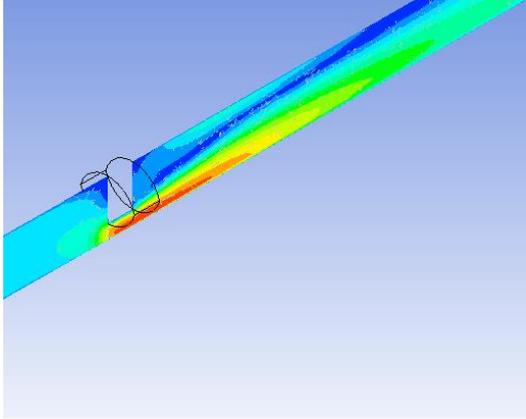
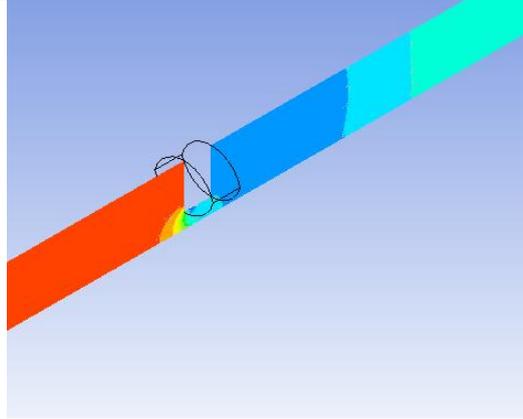
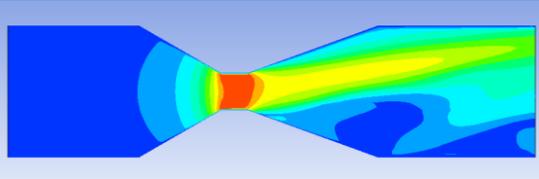
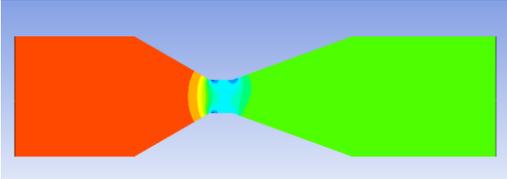
	
<p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>	<p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>
<p>Interpretación: De igual manera se observa la presencia de dos puntos de recirculación con mayor magnitud</p>	<p>Interpretación: Se observa la caída abrupta de la presión lo cual indica la presencia de cavitación.</p>

Tabla 13: Contorno de velocidad y presión para la geometría de tubo de Venturi

<p>Ilustración 13. Contorno de velocidad</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>	<p>Ilustración 14. Contorno de presión</p>  <p>Realizado por: Ruiz, Jose 2023</p>
<p>Interpretación: Se observa un aumento de la velocidad en la garganta y su posterior disipación en la sección divergente.</p>	<p>Interpretación: Se observa una caída de la presión en la sección de la garganta con presencia de cavitación.</p>

5.2 Análisis matemático

Tabla 14: Análisis matemático de resultados

	Codo de 90°	Válvula de compuerta	
		a/D=0.5	a/D=0.75
Presión aguas arriba (Pa)	708,0710	1844,19	14838,5
Presión aguas abajo (Pa)	310,3230	-17,23	5,89

Cálculo de caída de presión (MCA)	$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$ $\Delta P = 0,04054$	$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$ $\Delta P = 0,189$	$\Delta P = \frac{P_1 - P_2}{\rho g}$ $\Delta P = 1,512$
Cálculo del coeficiente de pérdidas "k"	$K = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}}$ $K = 0,3200$	$K = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}}$ $K = 1,5011$	$K = \frac{\Delta P}{\frac{v^2}{2g}}$ $K = 11,96$

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

6.2 Recomendaciones

7. Cuestionario

¿De qué manera afecta la presencia de presiones negativas en una instalación?

¿De qué manera afecta la cavitación y puntos de recirculación en un sistema de tuberías?

¿Qué es el principio de la continuidad y como explica su existencia durante la simulación del tubo de Venturi?

¿Qué es el principio de la conservación del momento y como explica su existencia durante la simulación del codo de 90°?

8. Referencias Bibliográficas

Citas

Bibliografía

Internet

RESUMEN (150 palabras)



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje

UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 18 / 01 / 2024

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: Jose Rey Ruiz Ganchozo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo



2101-DBRA-UPT-2023