

USO DE HERRAMIENTAS CFD COMO APOYO AL APRENDIZAJE DE LA MECÁNICA DE LOS FLUIDOS EN LA UNIVERSIDAD

Angel E. Stramaná^a, Leandro E. Panella^a, Miguel G. Coussirat^a Ernesto F. Gandolfo^a,

^aGrupo LAMA, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Mendoza,

Keywords: CFD, Enseñanza, Simulaciones numéricas, Prácticas de laboratorio.

Abstract. Es sabido que la Dinámica de Fluidos Computacional o CFD en notación inglesa, es una herramienta cada vez más utilizada por los ingenieros de diseño en el ámbito de la Mecánica de Fluidos. Es por tanto, cada vez más importante que en los estudios de grado se inicie al alumno en la formación relacionada con el uso de estas herramientas numéricas. Luego, el objeto de este trabajo es la incorporación de herramientas de CFD como un complemento para mejorar el dictado de la cátedra Mecánica de los Fluidos y Máquinas Fluidodinámicas de cuarto año de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Facultad Regional Mendoza Universidad Tecnológica Nacional, FRM UTN. Si bien ésta metodología aún no ha sido incorporada a la cátedra, este trabajo se realiza en vistas de poder hacerlo en un futuro muy próximo.

Se cree que una buena metodología para la introducción de CFD en la enseñanza dentro de los cursos de grado es relacionarla con algunas de las prácticas de laboratorio tanto de pérdidas de carga primarias como secundarias en geometrías fijas y variables que se realizan en la FRM UTN como primer paso, para luego extenderlas a casos en donde la contraparte experimental no existe aún en el laboratorio.

Para cumplir este objetivo se simuló tuberías rectas, codos, placas orificio y tubos Venturi con diversas dimensiones y condiciones de trabajo. Para modelar la turbulencia se utilizaron modelos considerados como Standard en las simulaciones de flujos industriales. Se seleccionaron estas geometrías por ser relativamente simples, lo que permite no perder la perspectiva a la hora de observar el flujo en su interior. Una mayor complejidad de las geometrías puede producir gradientes adversos de presión o desprendimiento de capa límite, lo que conlleva una simulación incorrecta del flujo turbulento usando estos modelos Standard, implicando así, el uso de modelos para la turbulencia mucho más complejos y que no siempre garantizan mejores resultados, lo que a priori no es objeto del presente trabajo.

Se contrastaron los resultados numéricos obtenidos en las simulaciones numéricas con sus contrapartes experimentales, observando pequeñas discrepancias. Pese a estas discrepancias, producto del modelado del flujo turbulento, algunas ya ampliamente conocidas dentro de la comunidad CFD, las simulaciones obtenidas tienen un cierto grado de realidad y permite mostrarle al alumno la compleja fenomenología que implica el estudio en detalle del flujo de fluidos, la cual no siempre es intuitiva.

1 INTRODUCCIÓN

Las actuales tendencias dentro del ámbito de Investigación, Desarrollo e Innovación, I&D+i, en la ingeniería electromecánica implica el uso cada vez más extensivo de herramientas de última generación para el estudio de problemas relacionados con este ámbito. Dentro de estas herramientas tanto el uso de programas de simulación numérica como las simulaciones físicas a través de experimentos de laboratorio ha cobrado mucha importancia en las últimas décadas. Una de estas herramientas que ha tomado gran importancia en la actualidad es la Mecánica de Fluidos Computacional, CFD. Actualmente, la CFD implica su combinación con otros modelos numéricos en el análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados como reacciones químicas por medio de simulación computacional, o bien fenómenos de acoplamiento flujo-estructura; denominando a esta combinación de modelos, modelado del tipo multi-física. La técnica es muy poderosa y abarca un rango muy amplio de áreas de aplicación industriales y no industriales.

Debido a su potencia y su complejidad, la que implica ciertos peligros en su uso, se cree que es de gran importancia la enseñanza de CFD en las carreras de grado ingenieriles a efectos de generar recursos humanos formados adecuadamente para el uso de estas herramientas. Esto implica, en opinión de los autores, una formación teórica más profunda de la que viene dando en la Facultad Regional Mendoza de la Universidad Tecnológica Nacional (FRM-UTN). Actualmente en la FRM-UTN hay un interés creciente en que los recursos humanos formados en ella, adquieran las necesarias capacidades teórico/prácticas que les permita la aplicación de esas herramientas, además de la toma de conciencia de que los actuales cursos de grado no siempre cubren estas temáticas de reciente desarrollo. Para cubrir esta falencia, es que se ha propuesto un proyecto (presentado para ser aprobado por la Secretaría de Ciencia y Técnica y el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva) para introducir y promover el uso asiduo de las herramientas numéricas en el ámbito de cursos de grado en las distintas carreras de ingeniería de la FRM-UTN. El proyecto pretende que el usuario de estas herramientas tenga la necesaria capacidad de análisis para la evaluación de su uso de forma correcta, de modo de lograr un equilibrio en las herramientas de análisis de que dispone el profesional formado en la FRM-UTN.

Se pretende además que esta formación ayude a la motivación de los estudiantes de la carrera que busquen una formación más específica en estas tecnología con el objeto de formar egresados con mejor formación en este ámbito específico de la ingeniería, y dirigirlos en sus trabajos de tesis dentro del proyecto que permitan su formación como futuros investigadores y docentes de la FRM-UTN.

En el proyecto, se han definido estrategias específicas para cumplir estos objetivos. Dentro de éstas, se cree que una buena metodología para introducir al alumno en la "especialidad CFD" es la de complementar la formación teórica de grado con aplicaciones sencillas CFD que permitan profundizar los aspectos teóricos mediante programas de cálculo CFD usados como una "caja gris", tratando de que el alumno vincule conocimientos básicos de la mecánica de fluidos, con alguno de los contenidos que poseen estos programas, seleccionando casos considerados como "clásicos" en la mecánica de fluidos, de fácil entendimiento y comprensión para el alumno, para vincular los aspectos teóricos y prácticos mediante la herramienta CFD en asignaturas de grado relacionadas con esta temática. Concretamente, se harán aplicaciones de CFD que permitan ser contrastadas o bien con soluciones teóricas simples (handbook solutions), o bien con los ensayos experimentales, asociados a las prácticas de laboratorio de la Cátedra "Mecánica de Fluidos y Máquinas Fluidodinámicas", MFMF de

la FRM-UTN, luego se pretende, una vez “validados” los resultados CFD obtenidos, mostrar visualizaciones y/o animaciones que sirvan para complementar la formación del alumno.

Los casos seleccionados son: a) casos con geometría simple: pérdidas primarias (tuberías rectas) y pérdidas secundarias en accesorios de instalaciones (codos); b) casos con geometrías más complejas, (instrumentos utilizados para medir caudales, del tipo placa orificio y tubo Venturi). En todos los casos se estudiarán mediante CFD distintas condiciones de trabajo, (diferentes caudales), observando las variables necesarias para llevar a cabo el cómputo de las curvas de los coeficientes de dichos instrumentos. Luego se procederá a comparar los resultados obtenidos en la simulación, con los datos obtenidos de forma empírica en las prácticas de laboratorio y los obtenidos de la bibliografía. Se busca con esto que el alumno vincule estos coeficientes empíricos con la realidad del flujo en el interior de todas estas geometrías.

2 CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LOS CASOS SELECCIONADOS

2.1 Pérdidas de carga primarias en tuberías rectas y localizadas en accesorios:

Se presenta a continuación de modo muy resumido el marco general y algunos aspectos de la teoría que se explican en los cursos de grado de Mecánica de Fluidos. En los cursos de grado de la carrera ingeniería electromecánica de la FRM-UTN es usual presentar los principios de conservación de masa, de cantidad de movimiento y de la energía en sus versiones integrales (volumen de control más Teorema de Transporte de Reynolds, VC más TTR), no haciéndose mucho hincapié en sus contrapartes basadas en ecuaciones diferenciales (partícula fluida) por falta de tiempo, ya que la asignatura es anual pero se dedica un cuatrimestre a desarrollar los contenidos del programa asociados a la teoría básica de Mecánica de Fluidos. El sólo ver las versiones integrales de los principios de conservación, de alguna forma hace perder la perspectiva de algunos efectos “sutiles” que el flujo del fluido produce (deformación de la partícula fluida, detalles de estado turbulento del flujo, disipación de energía debida a efectos viscosos, etc.) y que se trasladan a coeficientes de tipo empírico, indicando al alumno que los valores de estos coeficientes salen de tablas, sin abundar en muchos más detalles. Como apoyo a esta teoría se han implementado una serie de prácticas de laboratorio en donde se determinan estos efectos viscosos mediante mediciones experimentales (prácticas de pérdidas primarias, localizadas y determinación de coeficientes de corrección de medidores de caudal tipo placa orificio y Venturi).

Como ejemplo, al aplicar la teoría del volumen de control más el teorema de transporte de Reynolds al principio de conservación de la energía sobre un sistema hidrodinámico estacionario (flujo permanente) con un fluido ideal, en su forma integral, permite formular la ecuación de Bernoulli, Ec.(1). Siendo la nomenclatura a utilizar en las siguientes ecuaciones la que sigue: w_r , pérdidas energéticas debidas al rozamiento fluido [$J/kg=m^2/s^2$]; L , longitud del conducto o tubería [m]; D , diámetro del conducto o tubería [m]; c , velocidad promedio en la sección del conducto o tubería [m/s]; ρ , densidad del fluido [kg/m^3]; f , factor de fricción para tuberías, pérdidas principales [Adimensional]; K , factor de fricción para accesorios, pérdidas secundarias [Adimensional]; Δp_r , pérdida de carga (presión) debida a roce interno [Pa]; ε , rugosidad de la pared de la cañería [m].

$$\frac{p_i}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} + z_i = cte \quad (1)$$

Para un fluido real, la Ec.(1) incorpora un término que da cuenta de la "realidad" del fluido,

esto es, los efectos viscosos del fluido, que se traduce en pérdidas de energía del tipo irreversibles en el seno del fluido, siendo este término un término disipativo de energía y por tanto se lo suele denominar término debido a las pérdidas de carga, quedando:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{c_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{c_2^2}{2g} + z_2 + h_{1-2} = cte \quad (2)$$

En donde el término h_{1-2} es una función de este tipo de pérdidas, las que sólo pueden evaluarse de forma experimental y se representan a través de coeficientes que tienen en cuenta estos efectos, e.g., factor de fricción f . La exactitud en su determinación experimental dependerá de la precisión de los instrumentos de medida y de lo cuidadoso que sea el montaje del banco de ensayos para que los errores en las medidas sean contemplados mediante alguna teoría de errores para conocer su magnitud. Si se hace mediante modelado numérico, la exactitud depende de varios factores, entre ellas los submodelos físicos y esquemas de discretización utilizados dentro del código CFD, teniendo en cuenta que los submodelos traen implícitos también coeficientes de ajustes semi-empíricos. Una vez determinado el h_{1-2} puede calcularse por ejemplo la diferencia de presiones necesarias para tener un cierto caudal, o resolver problemas similares en función de que variables se conocen y cuáles no. La ecuación para el flujo de fluido real, luego se la aplica a circuitos hidráulicos, los que además de tuberías rectas poseen accesorios de distintos tipos para su armado o su operación. Debido a esta complejidad creciente, aparecerán nuevos coeficientes que tienen en cuenta las pérdidas de carga h_{1-2} debidas a la inclusión de estos accesorios. Se pasa luego a aplicaciones que implican el diseño de instalaciones calculando todas estas pérdidas de energía a efectos, generalmente, de seleccionar la potencia de una bomba hidráulica que provea la energía necesaria para que el circuito funcione bajo los requerimientos solicitados.

En la Cátedra MFMF, a partir de los conceptos analizados mediante el principio de conservación de la energía VC más TTR y de cara al diseño de circuitos hidráulicos, se caracteriza el término h_{1-2} , definiendo dos tipos de pérdida de carga:

- Pérdidas de carga primarias: pérdidas que se producen en las tuberías rectas que transportan el fluido.
- Pérdidas de carga localizadas (o secundarias): debidas a todos los accesorios que no son tuberías rectas situados en el circuito hidráulico.

Para las pérdidas primarias, el modelado teórico a partir de las ecuaciones que describen la interacción del flujo con la pared de la tubería es complejo y la obtención de resultados analíticos está limitada a situaciones simples (régimen laminar). La aproximación realizada para poder obtener resultados en el caso de una situación más general, que implica flujo turbulento, es una aproximación semi-empírica, que se obtiene a partir del análisis dimensional, (ecuación de Darcy-Weisbach), que para el caso de una tubería recta horizontal es expresada como:

$$h_{1-2} = f \frac{L}{D} \frac{c^2}{2g} \rightarrow w_r = \frac{h_{1-2}}{g} = f \frac{L}{D} \frac{c^2}{2} \rightarrow \Delta p_r = \rho w_r = f \rho \frac{L}{D} \frac{c^2}{2} \quad (3)$$

Para obtener el valor del coeficiente de fricción f para flujos turbulentos, se utiliza la ecuación empírica de Haaland (o bien el diagrama de Moody), ver detalles en [White 2003](#), como muestra la [Ec.\(4\)](#). Luego la [Ec.\(5\)](#) determina como se calcula si el flujo es laminar.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1,8 \log \left[\left(\frac{\varepsilon/D}{3,7} \right)^{1,1} + \frac{6,9}{Re} \right] \quad (4)$$

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (5)$$

Para el caso de pérdidas secundarias, por analogía se plantea una formulación similar:

$$w_r = K \frac{c^2}{2} \rightarrow \Delta p_r = \rho w_r = \rho K \frac{c^2}{2} \quad (6)$$

La complejidad implícita en el flujo real (viscoso) se resume dentro del factor de fricción f , para el caso de las pérdidas principales y dentro del factor de forma K , para las pérdidas localizadas. Estos dos coeficientes se obtienen experimentalmente y permiten evaluar con una precisión razonable las pérdidas energéticas (traducidas en caídas de presión) que se dan en una instalación hidráulica. En este trabajo se vincula mediante CFD este marco teórico con los coeficientes experimentales tratando de explicar/justificar más detalladamente su origen.

2.2 Medidores de Caudal: Placa orificio y Tubo Venturi

Como aplicaciones de los principios de conservación más volumen de control más teorema de transporte de Reynolds se demuestra cómo puede medirse un caudal mediante la medida de diferencia de presiones si se usa una geometría especial. Estos medidores de caudal se encuentran comúnmente en la industria y se denominan Tubo Venturi y Placa orificio, [Figura 1a](#). La teoría para el desarrollo de las ecuaciones que rigen el comportamiento de ambos es similar y por tanto se presenta la del tubo Venturi, que consta de dos troncos de cono entre los que se intercala una sección cilíndrica (garganta). Posee dos tomas de presión 1 y 2 las que se conectan a un manómetro diferencial a efectos de medir la caída de presión entre ambas. El tubo Venturi se intercala en el circuito hidráulico (tramo de tubería recta de cierta longitud mínima), formando parte del mismo. Siendo la dirección del flujo la indicada por la flecha, la contracción cónica (tobera) tiene generalmente un ángulo de aproximadamente $\alpha = 20^\circ$ y la expansión cónica (difusor) un ángulo de entre $7^\circ < \varphi < 8^\circ$ como se muestra en la [Figura 1b](#).

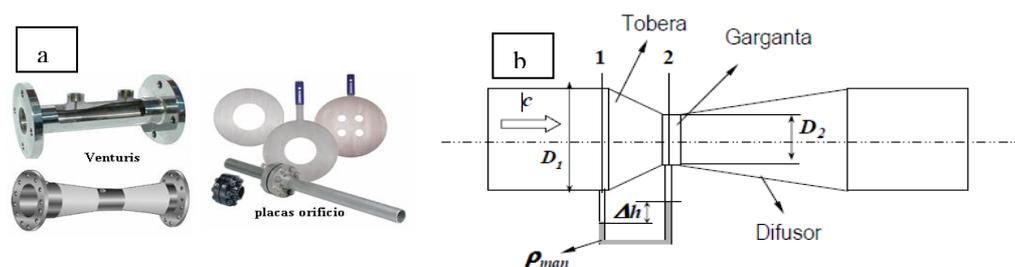


Figura 1: a) Tubos Venturi y Placas orificios de uso común en la industria; b) Tubos Venturi con tomas de presión a la entrada (1) y en la garganta (2).

Según se desprende de la aplicación de las ecuaciones de continuidad y Bernoulli se observa que el flujo en el interior del mismo, produce una caída de presión en la parte de su contracción debido al aumento de velocidad. Luego, al aumentar el diámetro en su parte divergente, recupera gran parte de esa caída de presión ya que disminuye la velocidad sin grandes pérdidas de carga. Para medir caudales volumétricos a partir de medir presiones en las secciones 1 y 2, se puede obtener una expresión combinando estas ecuaciones despreciando las pérdidas de carga que se producen entre estas secciones. La subsecuente inclusión de los efectos viscosos en la ecuación obtenida, mediante la inclusión de un coeficiente ad-hoc, conduce a la expresión final de cálculo que es:

$$\dot{V} = K_v A_2 \sqrt{\frac{2|\Delta p|}{\rho_{fluido}(1-\beta^4)}} \quad (7)$$

Siendo: K_v , coeficiente de velocidad (tiene en cuenta las pérdidas por fricción); g , la aceleración de la gravedad; D_1 y D_2 , diámetros de las respectivas secciones y $\beta=D_2/D_1$. Si hay un manómetro diferencial, del tipo de ramas en U con un fluido manométrico entre las tomas, la expresión para determinar la diferencia de presiones, Δp , utilizando las densidades, ρ , del fluido que fluye por la tubería, ρ_{fluido} , y el fluido que tiene el manómetro, ρ_{man} , es:

$$\Delta p = (\rho_{man} - \rho_{fluido})g\Delta h \quad (9)$$

Para el caso de placas orificios la teoría aplicada es similar, sólo cambiando el valor del coeficiente K_v . Este cambio se debe fundamentalmente a las diferencias de geometría (una placa orificio es menos precisa que un Venturi, pero mucho más barata) la cual es menos hidrodinámica que la geometría de un Venturi, que implica un incremento de las pérdidas introducidas en el circuito, efecto que puede visualizarse claramente a través de CFD, mostrando así al alumno que representan estos coeficientes de una manera más detallada, que es el objetivo perseguido.

3 METODOLOGÍA

Se pretende complementar la enseñanza, en la Cátedra MFMF de la FRM-UTN, de los fenómenos de pérdidas de carga que se producen en el movimiento del fluido dentro de tuberías bajo presión. Para ello se compararán los resultados obtenidos con CFD y medidas experimentales tanto para pérdidas primarias como para secundarias (realizadas en el laboratorio FRM-UTN) y para los coeficientes de contracción (obtenidos de la bibliografía). En todos los casos se evidenciará a que efectos contemplan estos coeficientes experimentales mediante CFD.

4 RESULTADOS

Se exponen aquí los resultados obtenidos de las prácticas de laboratorio y los cálculos CFD de los coeficientes tanto para las pérdidas primarias (f), pérdidas secundarias (K) y medidores de caudal (K_v).

4.1 Pérdidas de carga primaria, tubería recta

Resultados experimentales: El banco experimental que se tiene montado en el laboratorio tiene las dimensiones que se resumen en la [Tabla 1](#) además de resumir las características del fluido utilizado en el ensayo. La Tabla 2 resume los datos y resultados de la práctica de laboratorio de pérdidas primarias para una tubería recta bajo presión, donde, ΔP es la caída de presión de la cañería, h_f es la caída de presión expresada en unidades de longitud.

Diámetro de la tubería	D	0.025 4	[m]
Longitud	L	1.27	[m]
Densidad del fluido	ρ	998	[kg/m ³]
Viscosidad dinámica	μ	0,001	[Pa·s] = [kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹]
Material de la tubería	Hierro fundido		
Fluido	Agua a 15° C		

Tabla 1: Datos del fluido y de la cañería.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Caudal [l/min]	29	37	40
Velocidad [m/s]	0,95387053	1,21700723	1,31568349
Re	24179,8549	30850,1597	33351,524
ΔP [mmHg]	10	16	18
ΔP [Pa]	1333,22368	2133,15789	2399,80263
h_f	0,13590455	0,21744729	0,2446282
f	0,05855193	0,05755112	0,05539744

Tabla 2: Datos y resultados de la práctica de laboratorio.

Resultados de la simulación computacional: A continuación resumimos los resultados obtenidos de la simulación realizada con el fin de contrastar con los resultados experimentales obtenidos en el ensayo del laboratorio. La [Tabla 3](#) muestra los datos y los resultados de pérdida de carga obtenidos mediante simulación.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Caudal [l/min]	29	37	40
Caudal [m ³ /s]	0,00048333	0,00061667	0,00066667
Velocidad [m/s]	0,95387053	1,21700723	1,31568349
Re	24179,8549	30850,1597	33351,524
ΔP [Pa]	1022	1742	2031

Tabla 3: Datos y resultados de la simulación.

En éstas se ven ciertas diferencias entre los valores obtenidos en los experimentos y con CFD para el ΔP con el que se determina el f . Se considera que el error es aceptable para el propósito de este trabajo ya que no se ha realizado una corrección de la rugosidad relativa de la cañería por su envejecimiento que produce un aumento de la pérdida de carga. Como trabajo futuro se incluirá el efecto de la rugosidad de la tubería, ya que en el banco experimental debe controlarse ese parámetro no bien determinado/controlado aún.

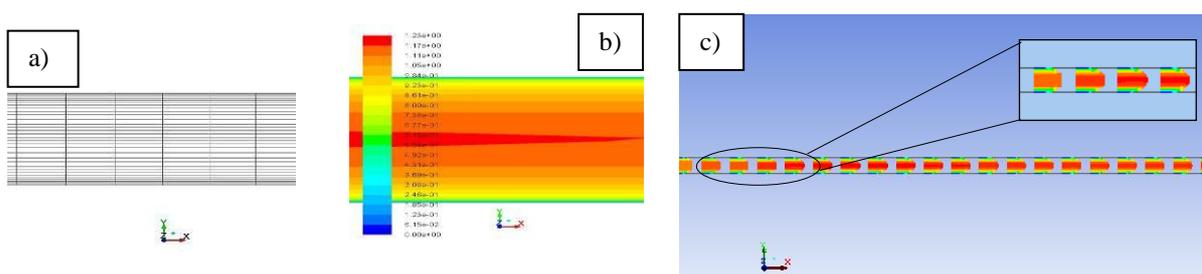


Figura 2: a) Malla usada en la tubería recta; b) Contornos de velocidades; c) Patrón del flujo. Vectores velocidad, con detalles de desarrollo de la capa límite.

En la [Figura 2a](#) se pueden observar detalles de la geometría y de la malla utilizada para la simulación, la cual es refinada cerca de las paredes con fin de poder captar correctamente lo que sucede dentro de la capa límite. En la [Figura 2b](#) se ven detalles, del campo de velocidades del fluido a través de la tubería bajo presión. En este gráfico queda claro que la pérdida de carga no se produce debido a un rozamiento pared-fluido sino que se produce debido a un rozamiento interno del fluido, ya que la velocidad de la pared como puede observarse es cero y las fuerzas viscosas que actúan en la pared no ejercen por tanto trabajo según se explica

cuando se aplican los principios de conservación en su forma integral a un volumen de control como el de la figura, siendo las pérdidas irreversibles dentro del volumen de control y no en las paredes. Se ve claramente que el gradiente de velocidades es el factor que introduce las pérdidas por fricción. Se relaciona este hecho con la definición de viscosidad y ley de Newton para la viscosidad a efectos de que el alumno tenga una primera intuición del fenómeno (después se dan detalles relacionados con la turbulencia). Este es un tema que siempre presenta problemas de comprensión por parte del alumno y se cree que ésta es una buena metodología de apoyo, ya que se puede observar con todo detalle las distintas zonas de variación de la velocidad en la sección transversal de la tubería como se muestra en la [Figura 2c](#) donde se pueden observar los perfiles de velocidad a medida que se desarrolla el fluido dentro de la tubería.

Resultados teóricos: Mediante la simulación CFD de pérdidas primarias y su contrastación con los obtenidos mediante la fórmula empírica de Haaland (ver detalles en [White, 2003](#)) dada en la [Ec. \(4\)](#), se demuestra al alumno la validez del uso de CFD. En la [Tabla 4](#) se muestran los datos geométricos de la tubería. Como se puede observar en la misma se simula una tubería de pared lisa, donde circula agua a 15°C y en la [Tabla 5](#) se pueden observar los valores de f (factor de fricción) calculados mediante la fórmula de Haaland, [Ec. \(4\)](#). En la [Figura 3a](#) se pueden observar dichos resultados en forma gráfica representados por puntos.

Diámetro [m]	0,2
Longitud [m]	8
ε/D	0
μ [kg/m·s]	0,001
ρ [kg/m ³]	998

Tabla 4: Datos geométricos y del fluido.

Velocidad	Reynolds	f
1	199600	0.015507
2	399200	0.013609
4	798400	0.012039
10	1996000	0.010348
15	2994000	0.009712
20	3992000	0.009295

Tabla 5: Valores del coeficiente de fricción.

Donde μ es la viscosidad dinámica, y el resto de las variables han sido definidas anteriormente.

Resultados de la simulación computacional: Con el objeto de contrastar los valores obtenidos mediante CFD y la formulación empírica, se exponen en la [Tabla 6](#) los resultados obtenidos a partir de la simulación de las pérdidas de carga y se calculó f a partir de la [Ec. \(3\)](#). La idea a transmitir también aquí es que mediante CFD podrían variarse los parámetros característicos (Re y ε/D) en un rango mucho más amplio que en el laboratorio, permitiendo así “recorrer” todo el diagrama de Moody, ver [Figura 3b](#).

Velocidad [m/s]	P_1 [Pa]	P_2 [Pa]	Re	f
1	303.8	0	199600	0.01522
2	1062.7	0	399200	0.01331
4	3760.2	0	798400	0.011774
10	20254.92	0	1996000	0.010148
15	42843.98	0	2994000	0.00954
20	72994.76	0	3992000	0.009143

Tabla 6: Resultados de la simulación.

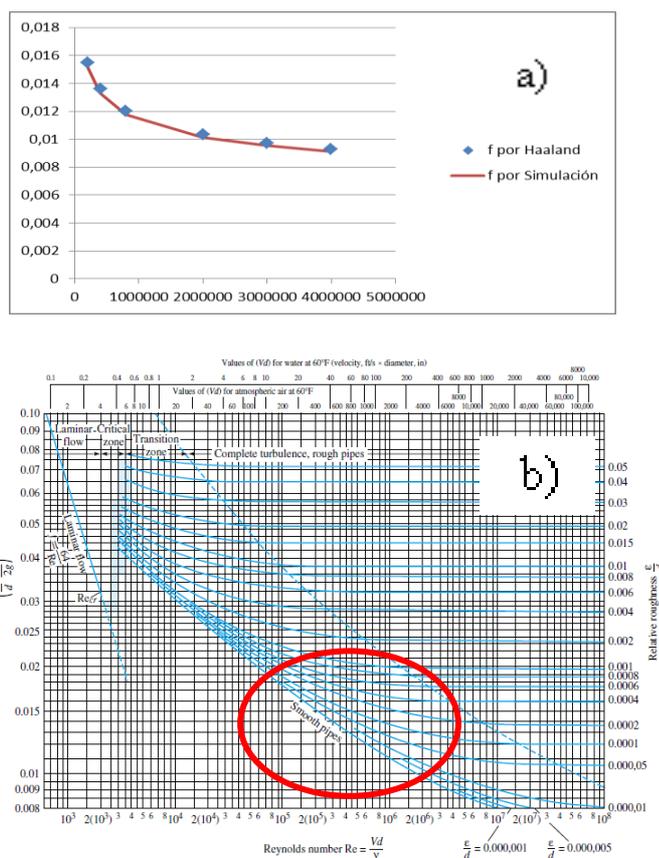


Figura 3: a): Comparativa entre factor de fricción f obtenido por Haaland y por simulación CFD. b): Diagrama de Moody indicando la zona modelada en la figura a).

En la [Figura 3a](#) se presenta la curva numérica obtenida a partir de los datos obtenidos con CFD y los valores obtenidos por Haaland, y en la [Figura 3b](#) la zona del diagrama de Moody ([White, 1998](#)), donde encuentran las curvas obtenidas. Se observa que los valores obtenidos mediante la simulación se asemejan a los que se calculan mediante la fórmula de Haaland, lo que permite así validar la simulación y lograr el objetivo de mostrarle al alumno cuán próximo a la realidad son los resultados CFD. Este análisis también permiten entender cómo se construye el diagrama de Moody ([White, 1998](#)), usado en el cálculo de pérdidas de carga.

4.2 Pérdidas de carga secundarias, Codo de 90°

De forma similar se estudió un codo de 90° que se posee en el banco de ensayos de laboratorio con el fin de contrastar los resultados CFD con los obtenidos durante la práctica de laboratorio, los resultados obtenidos de las comparaciones de coeficientes (no mostrados aquí) son de similar calidad a los de las pérdidas primarias ya discutidos en el anterior párrafo. A modo ilustrativo si se muestran los resultados CFD obtenidos para el campo de velocidades y de presiones, ver [Figura 4](#), a efectos de enseñar al alumno a identificar la naturaleza de las pérdidas que están recogidas en estos coeficientes y que los experimentos si permiten medir pero no visualizar.

Adicionalmente se simuló otro codo de 90° extrayendo directamente los datos (geometría y coeficiente de factor de forma, K de la bibliografía, e.g.: [White, 1998](#) y [Fox, 1998](#)). La [Figura 5](#), muestra datos del K para un codo de 90°. Al igual que el caso anterior se pretende contrastar los datos obtenidos de bibliografía, también provenientes de ensayos experimentales, con los valores CFD obtenidos. La geometría para la simulación CFD tiene una relación de radio de

curvatura, R , a diámetro, d , de 2 y pared lisa, y posee un $K=0,15$.

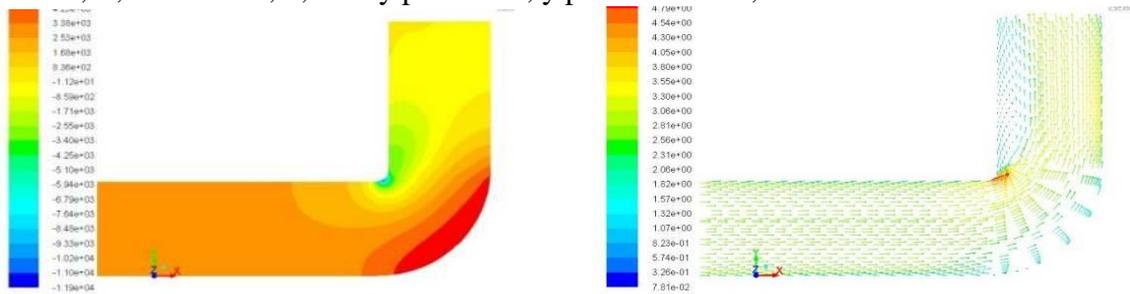


Figura 4: Codo recto 90°. Campo de presiones y de velocidades.

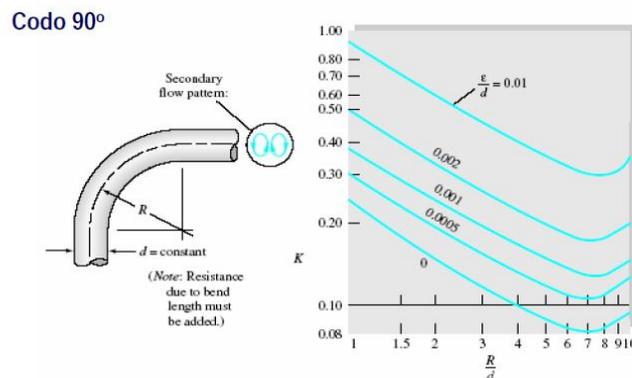


Figura 5: Coeficientes de forma K.

Para la simulación CFD se utilizaron para simular la turbulencia un modelo $k-\epsilon$, y un modelo $k-\omega$. Se obtuvieron resultados más precisos con éste último para este caso, entendiendo que presentar resultados con un único modelo turbulento, deben considerarse como preliminares, (Coussirat, 2003). En la Tabla 7 se exponen los resultados de la simulación y en la Figura 6 se presenta la gráfica de K en función del Reynolds. Como puede observarse el K varía para bajos Reynolds y luego tiende a ser constante. Se puede observar también que el valor ya constante del K coincide con el obtenido por la gráfica experimental ya que en estas gráficas no se tienen generalmente en cuenta las variaciones de K para bajos Re .

Velocidad entrada [m/s]	Velocidad salida [m/s]	Presión entrada [Pa]	Presión salida [Pa]	Altura de referencia entrada [m]	Altura de referencia salida [m]	Re	K
1	1	287.8	119.25	0	0	25349,2	0.33777555
1.5	1.5	579.3	238.2	0	0	38023,8	0.30380762
2	2	946.9	363.3	0	0	50698,4	0.29238477
6	6	7012	2590	0	0	152095,2	0.24615898
20	20	65159	22425	0	0	506984	0.2140982
40	40	239083	78826	0	0	1013968	0.2007227
60	60	517614	167754	0	0	1520952	0.19475618
100	100	1368535	449176	0	0	2534920	0.18424028
150	150	2919479	898460	0	0	3802380	0.18000615

Tabla 7: Resultados de la simulación.

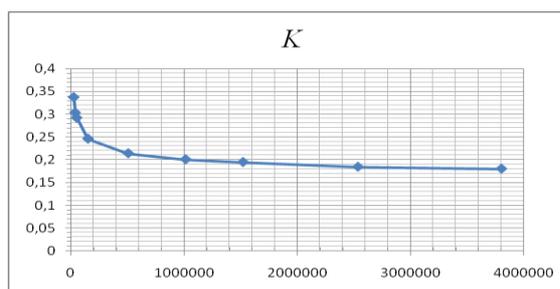


Figura 6: Factor de forma K en función del Reynolds, Re .

En la Figura 7 se muestra la malla utilizada para la simulación, la misma tiene continuación recta de la entrada y la salida para lograr una correcta medición de la caída de presión.

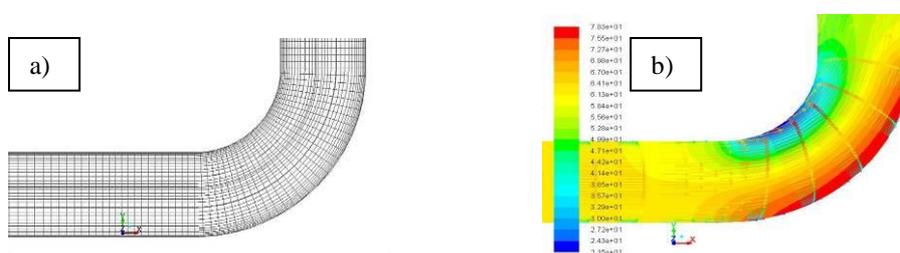


Figura 7: a) Malla usada en el codo; b) Patrón del flujo: Vectores de velocidad y distribución de presiones.

Al igual que en caso anterior se visualizan la geometría y distintas características del flujo en la misma, dando cuenta así de la caída de presión donde el valor de las velocidades es alto y viceversa. En la Figura 8 se observa la energía cinética turbulenta, mostrando cómo afecta la presencia del codo en la tubería el estado turbulento del flujo. Esto permite observar también, en conexión con la práctica de pérdidas primarias, que a la salida del codo el flujo está perturbado producto de los vórtices que se generan a la salida del codo y necesitará un cierto recorrido para volver a estar en estado desarrollado.

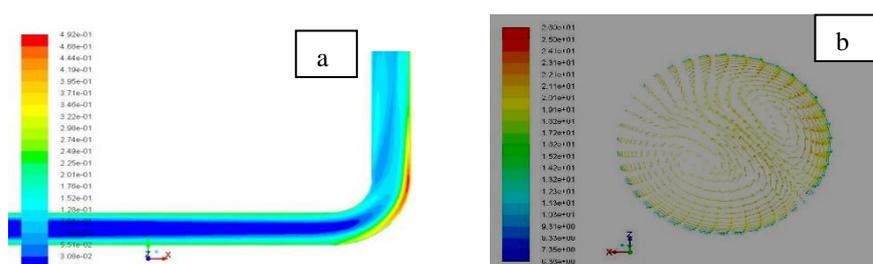


Figura 8: a) Energía cinética turbulenta. b) Vorticidad generada a la salida del codo.

4.3 Medidor de Caudal: Tubo Venturi, Curva de K_v

Resultados experimentales: El coeficiente K_v no es constante, sino que depende del número de Reynolds. Se obtiene mediante un trabajo de calibración que debe hacerse al instrumento o bien las provee el fabricante del aparato. En este caso se utilizaron las curvas obtenidas de la bibliografía utilizada (e.g. White, 1998, Fox, 1999), ver Figura 9.

Simulación CFD: En la Tabla 8 se muestran los datos correspondientes a la geometría y al fluido utilizado en la simulación. La geometría definida consta de dos tramos rectos de

tubería, uno a la entrada del Venturi y otro en su salida, ambos de suficiente longitud para no perturbar mediante las condiciones de borde impuesta en sus extremos al flujo dentro del Venturi. A la entrada se prescribió un caudal y a la salida se prescribió una condición del tipo Neumann para presiones y velocidades. El fluido es agua a 15°C, el tubo Venturi tiene una relación de diámetros de 0.5 y el diámetro de la tubería de 4 pulgadas. Se utilizó un modelo turbulento Standard $k-\epsilon$ con funciones de pared también estándar (ver detalles en ANSYS-Fluent, 2011). En la [Tabla 9](#) se resumen los resultados CFD obtenidos. Para el cálculo de K_v , se utiliza la [Ec.\(7\)](#) usando como Δp la que se obtiene de la simulación CFD.

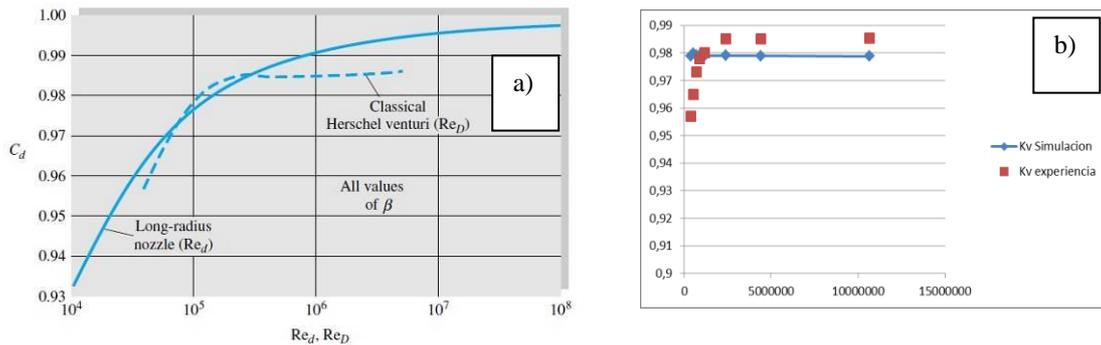


Figura 9: a) Coef. K_v (C_d en la figura) de bibliografía (White, 1998). b) resultados para K_v , CFD

V [m/s]	0.000001
Diámetro de entrada [m]	0.1016
Diámetro de contracción [m]	0.0508
Area de contracción [m ²]	0.002027
ρ [kg/m ³]	998

Tabla 8: Datos geométricos y del fluido.
Tabla 9: Resultados de la simulación.

Re	Q [m ³ /s]	P ₁ [Pa]	P ₂ [Pa]	K_v
388803	0,03102	12278,7	-102117,92	0,979
526540	0,04202	38891,46	-170509,97	0,980
724646	0,05782	39638,25	-357437,97	0,979
906180	0,07231	101878	-519065	0,979
1170410	0,09339	97203	-939254	0,979
2405120	0,19192	374239	-4001236	0,979
4420630	0,35275	1182938,8	-13602511	0,979
1066792	0,85126	6342079,5	-79771120	0,979

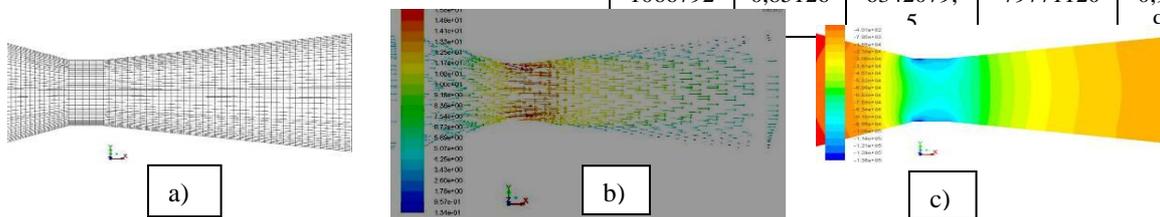


Figura 10: a) Malla usada para el Venturi. b) Vectores velocidad. c) Campo presiones

En la [Figura 10](#) se puede observar un detalle (zoom) de la geometría utilizada para la simulación y se muestran velocidades y la presión a lo largo de la tubería, mostrando claramente la caída de presión que se produce en la zona de contracción (tobera) y luego, gracias a la expansión suave (difusor), como se recupera parte de dicha presión, relacionándose todos estos efectos con el proceso del desarrollo y perturbación de la capa

límite en la zona de la garganta y en la zona divergente del tubo.

En la [Figura 11](#) se muestran detalles de la variación de la energía cinética turbulenta, respectivamente, marcando esta variable los efectos de producción de turbulencia en donde hay grandes gradientes de velocidad, características típicas de capas límites desarrollándose y/o perturbándose, dando lugar a zonas con fuerte vorticidad.

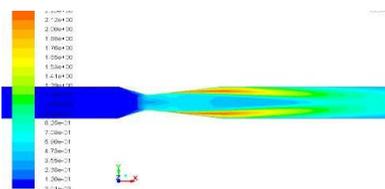


Figura 11: Venturi. Contornos de energía cinética turbulenta.

4.4 Medidor de Caudal: Placa orificio, Curva de K_v

Resultados experimentales: Este coeficiente, al igual que para el caso del tubo Venturi, no es constante, sino que depende del número de Reynolds. Se obtiene mediante un trabajo de calibración que debe hacerse al instrumento o bien las provee el fabricante del aparato. En este caso se utilizaron las curvas obtenidas de la bibliografía utilizada (e.g. [White](#), 1998, [Fox](#), 1999). En la [Figura 12](#) se muestra la curva experimental de los coeficientes K_v .

Resultados CFD: Una simulación CFD similar se hizo para una placa orificio intercalada en una tubería del mismo diámetro. Lo que se hizo fue reemplazar el tubo Venturi por la placa orificio esto es, se impusieron idénticas condiciones que para el caso del tubo Venturi en términos de condiciones de borde y mallado.

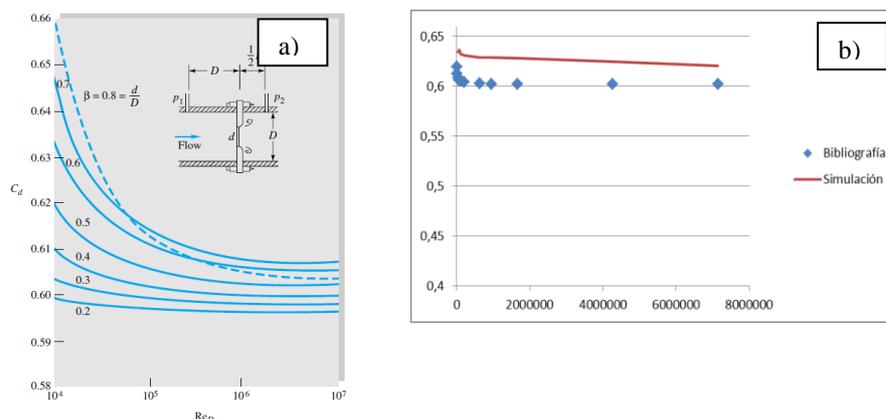


Figura 12: a) Coef. K_v , (C_d en la figura) de bibliografía (White, 1998). b) resultados para K_v , CFD.

Los resultados de la Tabla 10 muestran los datos correspondientes a la geometría y al fluido utilizado en la simulación. Para ello se consideró que el fluido es agua a 15°C , una relación de diámetros de 0.5 y diámetro de la tubería de 4 pulgadas. Se utilizó un modelo turbulento $k-\varepsilon$ con funciones de pared estándar y en la [Tabla 11](#) se resumen los resultados obtenidos mediante CFD. En la [Figura 12b](#) se muestra la comparación entre la gráfica de los valores del coeficiente de contracción obtenidos mediante la simulación con los obtenidos de la bibliografía, [Figura 12a](#). Se puede observar que hay cierta discrepancia entre los obtenidos por simulación y los experimentales. Esta discrepancia se puede atribuir al modelado de la

turbulencia, el que se ha hecho de una manera preliminar, siendo estos resultados aceptables en cuanto a lo que éste trabajo pretende mostrar. Como futuros trabajos se pretenden utilizar modelos más complejos para verificar si esta brecha entre resultados experimentales y de simulación se reduce.

v [m ² /s]	0.000001
Diámetro de entrada [m]	0.1016
Diámetro de contracción [m]	0.0508
Área de contracción [m ²]	0.002027
ρ [kg/m ³]	998
β [adimensional]	0.5

Tabla 10: Datos geométricos y del fluido.

Caudal	P1	P2	Re	Kv
0.000812224	2999	483	10178.7	0.043
0.003725752	2689.988	-1238.878	46690.7	0.634
0.005699406	6207.01	-2921.17	71424.3	0.637
0.009358688	17175.643	-7746.69	117282	0.633
0.016790371	54519.102	-26094.26	210415	0.631
0.050348131	498607.97	-230479.59	630957	0.629
0.077019218	1166125	-542601	965196	0.629
0.133370994	3500817	-1634969	1.67E+06	0.628
0.340998972	24306806	-9591724	4.27E+06	0.625
0.569940583	71563824	-24420110	7.14E+06	0.621

Tabla 11: Resultados de la simulación que dan lugar a los resultados CFD de la Figura 21b.

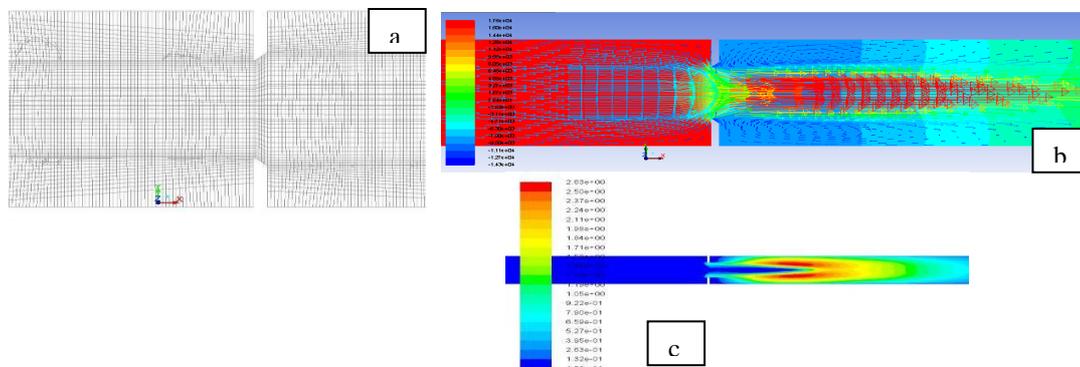


Figura 13: a) Malla usada para la placa orificio. b) Vectores velocidad y campo de presiones. c) Contornos de energía cinética turbulenta

En la [Figura 13b](#) se pueden observar los vectores de velocidad junto a los contornos de presión. De esta manera se pretende mostrar al alumno que luego de pasar por la contracción se genera vorticidad y una gran caída de presión. En la [Figura 14](#) puede observarse la distribución de la presión en la dirección del flujo tanto en la placa orificio como en el Venturi. Se han impuesto idénticas condiciones de borde en ambos medidores de caudal. A partir de éstas, el flujo tiene que “acomodarse” en cada caso y de allí que la presión de entrada para la placa orificio es mucho mayor. La recuperación de presión que se produce en el Venturi es mucho mayor que en la placa orificio ya que la suavidad de la geometría (tubo divergente con ángulo de divergencia pequeño), introduce pocas pérdidas de carga, al contrario de lo que ocurre en la placa orificio en donde los vórtices desprendidos de los bordes afilados introducen muchas más perturbaciones en el flujo, las que se alimentan en términos de energía de la corriente principal.

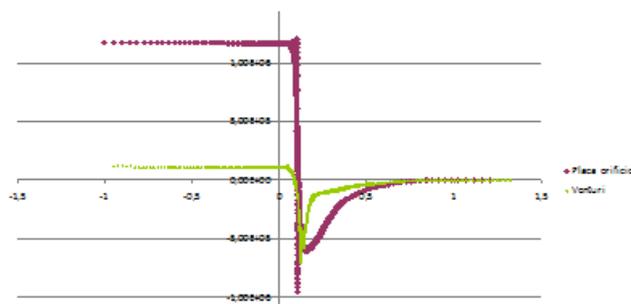


Figura 14: Comparativa de presiones para medidores de caudal. Izq.: Venturi. Der.: Placa orificio.

Estos vórtices se reestructuran en vorticidades con menores escalas de longitud y tiempo, las que van convectándose corriente abajo, con una continua reestructuración de sus escalas hasta llegar a valores tan pequeños de ambas escalas que terminan desapareciendo, disipados por fricción viscosa, transformándose su energía en calor irreversible y aumento de energía interna, típico efecto de "cascada de energía" en donde la turbulencia se crea por la relación flujo medio/vórtices de grandes escalas y se disipa por vórtices de pequeña escala/disipación por fricción viscosa, (Tennekes and Lumley, 1983); efectos que los diferentes modelos de turbulencia tratan de capturar con diferentes niveles de éxito.

5 CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la simulación CFD es confiable para el uso didáctico pudiéndose utilizar no sólo para complementar el aprendizaje de los alumnos sino también para paliar la falta de bancos de ensayos en el laboratorio ya que en general éstos suelen ser caros y requieren de mucho mantenimiento, lo que no está al alcance de la FRM-UTN en algunos casos. 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. La buena aproximación que se muestra entre el comportamiento experimental y el computacional ratifica una vez más que la computadora es un auxiliar útil para el docente, siendo una forma alternativa altamente recomendable para el estudio de los fenómenos relacionados con la dinámica de los fluidos, sobre todo en aquellas situaciones donde no se cuenta con recursos de laboratorio para realizar los experimentos o bien como complemento y refuerzo de lo visto en el laboratorio y en el desarrollo teórico. Se ha implementado una metodología eficaz de utilización de métodos numéricos en las carreras de grado, comenzando por geometrías simples y contrastando con sus contrapartidas experimentales, y aumentando la complejidad de las mismas, logrando no sólo la enseñanza de los principios de la mecánica de los fluidos sino también mostrar las capacidades de las herramientas computacionales.

6 REFERENCIAS

- ANSYS-Fluent V13, 2011, Inc. Proprietary. © 2011 ANSYS Inc. All rights reserved.
- Coussirat M., Theoretical/Numerical Study of Flows with Strong Streamlines Curvature. *PhD Thesis*, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, 2003.
- Fox, R., McDonald, A. & Pritchard, P., *Introduction to Fluid Mechanics*. Wiley and Sons, Inc., 6th (Sixth) Edition, 1999.
- Franzini, Joseph B., *Mecánica de los Fluidos*. Mc Graw Hill, 9na Edición, 1999.
- White, Frank M., *Mecánica de los Fluidos*. Mc Graw Hill, 5ta edición, 2003.
- White, Frank M., *Mecánica de los Fluidos*. Mc Graw Hill, 4ta edición, 1998.
- Tennekes and Lumley, *A First course in Turbulence*. Mit Press, 1983.