

Simulación de Flujo Incompresible y de una Fase en Accesorio de Tuberías (Codo 90° de alto radio) mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), para Cálculo de Factor de Pérdida K_L

Jines, José ^a

^a Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra. Escuela Superior Politécnica del Litoral
Campus "Gustavo Galindo". Km. 30.5 Vía Perimetral, Apartado Postal 09-01-5863,
Guayaquil, Ecuador. Ingeniero en Petróleo, FICT-ESPOL
jjines@espol.edu.ec

Resumen. El presente documento trata la simulación de flujo incompresible en un accesorio común de tubería (codo 90° de alto radio). El trabajo realizado tiene un interés práctico en ingeniería y cuenta con una componente de investigación básica en el desarrollo y validación de una metodología global que permite aportar conocimiento sobre la estructura interna de un modelo de flujos incompresibles. Fundamentalmente consiste en aplicar el modelo para flujo tridimensional, incompresible, adiabático y de una sola fase, mediante simulación con el código general FLUENT[9], previo modelado y mallado en código GAMBIT[2] (dibujo asistido por ordenador), obtenemos en primer lugar el número de iteraciones que el programa realizó para la convergencia de los resultados, perfiles de turbulencia, densidad, temperatura, velocidad y en especial las Presiones Estáticas en los tres ejes, a la entrada y salida del accesorio, estas permitieron encontrar junto con las pérdidas por fricción viscosas, las pérdidas totales en el codo para estimar el valor de coeficiente de pérdida (K_L)[11], previamente mediante hoja de cálculo se estima el coeficiente de fricción (f) por Método de Colebrook iterativo. El procedimiento experimental ha sido convalidado con los establecidos en bibliografía por algunos autores, para accesorios de tuberías y su valor de coeficiente de pérdida.

Palabras claves: FLUENT, GAMBIT, Flujo incompresible, Coeficiente de Pérdida, Factor de fricción iterativo de Colebrook.

1. Introducción

En la actualidad los modelos de simulación de flujos tanto compresibles como incompresibles son importantes para el análisis y diseño de accesorios, equipos e instalaciones que requieren sistemas de transporte de fluidos en general, en los que es preciso determinar la pérdida energética del flujo, entre otros como sistemas de potencia fluido neumáticos, redes de transporte de gases, sistemas de admisión y escape en motores de combustión interna, compresores, turbinas de gas y vapor, eyectores, sistemas de aire secundario en motores a reacción, entre otros. El propósito fundamental es modelar un accesorio de variación de dirección de flujo (codo 90° de alto radio), con el software comercial FLUENT [9] basado en volúmenes finitos y establecer con la simulación la caída de presión del sistema para calcular el coeficiente de pérdida K_L .

El fundamento del mismo se encuentra en la discretización de las ecuaciones de Continuidad, Cantidad de Movimiento y de Energía para fluido incompresible. La simulación se desarrolla con extensiones de tubería en los extremos del codo de 10 ID a la entrada y en la salida con 20 ID (ID = diámetro interno). Se verificará el régimen de flujo mediante la Ecuación de Reynolds,

además se tendrá que establecer la rugosidad relativa en diagrama de Moody y posteriormente el valor del factor de fricción por el método iterativo de Colebrook mediante ensayos de prueba y error para alcanzar convergencia, todo esto con el objetivo de calcular los diferenciales de presión totales en el accesorio, adicionalmente la velocidad de entrada del fluido en el accesorio será asumida, y que está basada en el régimen de flujo, especificando además el Diámetro Hidráulico (m) e Intensidad Turbulenta (%). El software detalla la distribución de velocidades en los tres ejes, turbulencia, temperatura, densidad y esfuerzos compresionales del fluido sobre las paredes de la tubería y accesorio, además de su energía cinética. FLUENT [9] resulta una herramienta muy valiosa y cada vez más extendida para el diseño en ingeniería permitiendo simular el comportamiento de fluidos en condiciones muy heterogéneas.

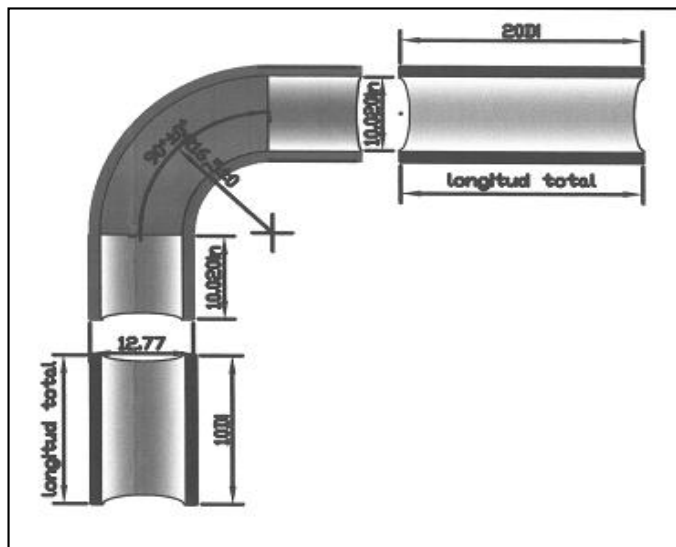


Fig. 1. Esquema en Autocad de codo 90° de alto radio

2. Metodología

El trabajo se sustenta en un modelo mallado previo por el programa de dibujo asistido por computadora, GAMBIT [2], que luego se procesa en el simulador FLUENT [9], y bajo parámetros que se le proporciona al programa, como modelo viscoso, características generales del fluido que entre otras son: densidad, calor específico, conductividad térmica, viscosidad, velocidad del fluido. Producto de la simulación se obtiene las medidas de presiones estáticas de entrada y salida de las extensiones de tubería y que rodean al accesorio, los valores se utilizarán en el cálculo del factor de pérdida, K_L .

Se realizará la descripción del equipo físico utilizado para la simulación; codo de 90° de alto radio, con OD (diámetro externo) e ID (diámetro interno), con peso, espesor y cédula detallados respectivamente, así como los pasos empleados en un trabajo de simulación bajo esta herramienta. A continuación detallamos la conceptualización de las ecuaciones fundamentales que el simulador discretiza para el caso de estudio, tales como: la ecuación de Conservación de Masa, Momento y Energía. Se detalla el Modelo Matemático empleado en el experimento para

flujos incompresibles, estacionarios, adiabáticos y de masas despreciables, que son producto de las derivaciones de las ecuaciones de Navier-Stokes [5], el modelo numérico para el desarrollo de la simulación es k-epsilon estándar [9]. Con los valores de presiones estáticas y que se aproximan a la solución iterativamente, se procederá a realizar el cálculo en una hoja de Excel del valor estimado y cercano del factor de pérdida para posteriormente compararlo con el valor de experimentos anteriores recogidos en bibliografía disponible. Bajo esta modalidad se comprenderá la utilidad y la diversidad en aplicaciones que tiene esta herramienta que van desde casos prácticos y sencillos como los mencionados, hasta simulaciones complejas para la predicción de fallas en diseños y posterior corrección en equipos ya fabricados.

3. Equipo utilizado en la Simulación

Para el modelado del codo de 90° se tomaron medidas a un accesorio comercialmente distribuido, las dimensiones realizadas establecieron un OD = 10.750 pulgadas y un ID = 10.020 pulgadas con un radio de 16.5 pulgadas, espesor de pared $t = 0.365$ pulgadas, $w = 40.48$ lb/pies (estas medidas serán luego transformadas a unidades del Sistema Internacional para realizar los cálculos), Schedule 40 (s), una interfaz con software GAMBIT- FLUENT.

4. Pasos para realizar la Simulación

Los pasos a seguir para cualquier estudio realizado con CFD [6] son los siguientes:

Pre proceso: En esta etapa se define la geometría del caso de estudio. El volumen de estudio se discretiza dividiéndolo en celdas de modo que el conjunto forma una malla (mesh). Se establecen también las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y el modelo matemático a emplear. En esta etapa software empleado es GAMBIT [9].

Simulación: Mediante el programa FLUENT [2] se resuelven por métodos iterativos las ecuaciones que definen el caso de estudio. En esta etapa queda completamente definido el sistema y resuelto.

Post proceso: Etapa de análisis de datos.

5. Definición del Coeficiente de pérdidas (K_L)

La pérdida de energía debida a la fricción en los tramos rectos y las pérdidas en los diferentes componentes y elementos singulares de un sistema de transporte de fluidos en general se suelen expresar, tradicionalmente, en función de la diferencia de presión estática, presión total o presión de remanso, adimensionalizadas. Las pérdidas energéticas en los elementos singulares pueden ser debidas a diferentes causas:

Esfuerzos de fricción de origen viscoso en el seno del fluido.

- i.- Cambios bruscos de dirección y sección que pueden producir el desprendimiento de la capa límite interna con la posterior readhesión del flujo a la pared del conducto y mezclado turbulento.
- ii.- Transporte, transmisión de cantidad de movimiento, fricción y deformación o estrangulamiento entre flujos que interactúan (unión de flujos).
- iii.- Expansión o remansamiento no isoentrópico del flujo (separación de flujos en bifurcaciones).

En general, el coeficiente de pérdidas adimensional, en componentes y elementos singulares, se suele expresar tradicionalmente en flujo incompresible como la diferencia de presión total entre las ramas aguas arriba y aguas abajo de la unión dividida entre la presión dinámica en la rama común, es decir,

$$K_L = \frac{P_{SE} - P_{SS}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (1)$$

- K_L = Coeficiente de pérdidas
- P_{SE} = Presión estática total aguas arriba (MPa)
- P_{SS} = Presión estática total aguas abajo (MPa)
- ρ = Densidad del fluido incompresible (Kg/m³)
- V = Velocidad (m/s)

Para estimar el valor de K_L se procede en el cálculo como sigue:

- 1.- Se toman las presiones totales a la entrada y salida del accesorio y las extensiones.

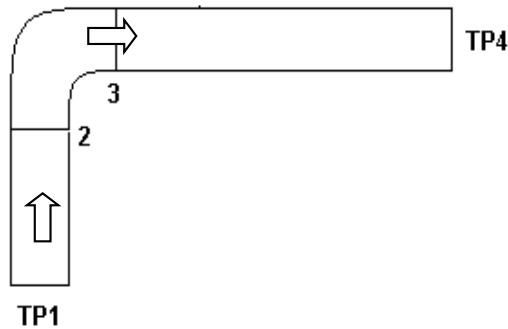


Fig. 2. Presiones totales a la entrada y salida del accesorio
 $TP = SP + VP \quad (2)$

- TP = Presión Total
- SP = Presión Estática
- VP = Presión por Velocidad

2.- Las pérdidas del sistema serán:

$$\Delta P_T = TP_1 - TP_4. \quad (3)$$

ΔP_T se obtiene de CFD^[6] (FLUENT), constituye la parte medular de la obtención de datos producto de la simulación.

$$\Delta P_{\text{codo}} = \Delta P_T - (\Delta P_{f_E} + \Delta P_{f_S}). \quad (4)$$

ΔP_{f_E} y ΔP_{f_S} a la entrada y salida, se obtienen de cálculos convencionales. El coeficiente de pérdida K_L anteriormente descrito, queda ajustado entonces a las modificaciones realizadas [1]:

$$K_L = \frac{\Delta P_{\text{codo}}}{\frac{1}{2} \rho V^2}. \quad (5)$$

3.- Estas pérdidas por fricción se calcula con la ecuación siguiente a la entrada y salida:

$$\Delta P_f = f \left(\frac{L}{D} \right) \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right). \quad (6)$$

4.- El factor de fricción se calcula por la ecuación de Colebrook iterativo, basado en la siguiente igualdad:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.523}{Re\sqrt{f}} \right). \quad (7)$$

En zona de transición y turbulento Re mayores a 2000, calculada por el Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu}. \quad (8)$$

Los valores de ε/D (rugosidad relativa), se obtendrá del Diagrama de Moody a partir de Re (Número de Reynolds). La velocidad de entrada del fluido (agua) se propone a 20 m/s. El valor de K_L debe compararse bajo esta simulación y cálculos, con los presentados en bibliografía para codos de 90° , que posean las mismas características.

Para comenzar con la simulación como se dijo anteriormente se efectúa el modelado en 3D del objeto de estudio. A continuación en la fig. 3 se detalla el esquema realizado en GAMBIT [9].

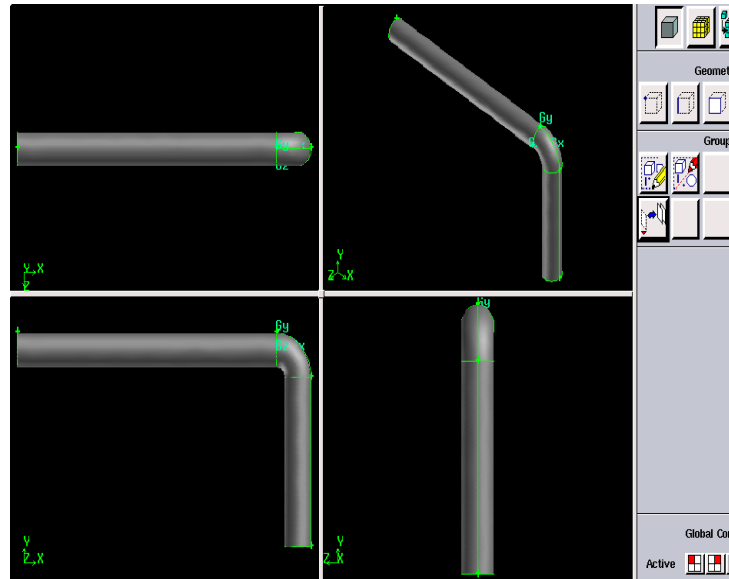


Fig. 3. Dibujo en 3D del accesorio y extensiones de tubería

5.1 Mallado

El mallado es una de las parte más importantes para el propósito de simulación, de su calidad también dependerán los resultados. Una vez que se finaliza el dibujo en 3D del codo con sus extensiones, se procede a mallar (mallar quiere decir dividir el volumen que ocupa el fluido en pequeñas celdas, cada celda será un punto de cálculo), para este procedimiento se utilizan las herramientas que el mismo código GAMBIT dispone. Cuantas más pequeñas sean las celdas, de más valores por unidad dispondremos, con ello el resultado de la simulación se ajusta más a la realidad. Se procede limitando con mallas en las caras del accesorio, luego se especifica el mallado de todo el volumen tomando en cuenta que la mayor densidad del mallado se encontrará en el codo, las incertidumbres de los resultados se eliminan afinando el mallado (realizando más divisiones de celdas). Un buen mallado físico no indica necesariamente que será un buen mallado para la simulación. Se verifica el proceso en la siguiente gráfica adjunta. La calidad del mallado se comprueba en código estadístico de barras (encerrado en círculo fig.4, las barras hacia la izquierda indican mejor calidad del mallado) que posee GAMBIT. A continuación se lista los parámetros de malla utilizados en el codo.

Tabla N°1. Parámetros que se utilizaron en el mallado del codo

PARAMETROS DE MALLADO DEL CODO 90°	
SUPERFICIES	
Tipos de elementos de superficie	tri, pave
Espaciado, tamaño de intervalo de las paredes (m)	10^{-3}
VOLUMENES	
Tipos de elementos de volumen	tet/hybri, Tgrid
Espaciado, tamaño de intervalo (m)	10^{-3}

La fig. 4 muestra el esquema del mallado realizado en GAMBIT.

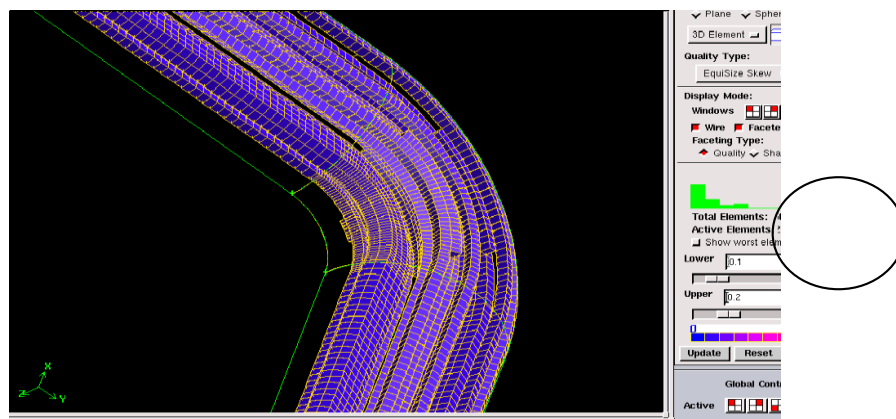


Fig. 4. Mallado del codo

5.2 Condiciones de Borde

Finalizado el mallado se debe especificar las condiciones de borde, estas deben ser definidas para todas las entradas y salidas del accesorio, cuando esto se realiza indicaremos el lugar en donde van a actuar todas las corrientes de flujo, además nos permite realizar en la simulación el monitoreo de todas estas corrientes. A continuación se describen las condiciones de borde:

- i.- Entrada de la extensión de tubería del codo de 10 ID: señalada como *pressure inlet*.
- ii.- Salida de la extensión de tubería del codo de 20 ID: señalada con *pressure outlet*.
- iii.- La pared externa de la estructura del codo señalada con *Wall* que es la parte sólida por donde no circula fluido.
- iv.- La pared interna o plano de simetría de la estructura del codo señalada con *Symmetry* que es la parte en donde ocurren los fenómenos de la corriente del fluido.

La fig.5 esquematiza las condiciones de borde programadas para el problema del codo; también realizados en GAMBIT [2].

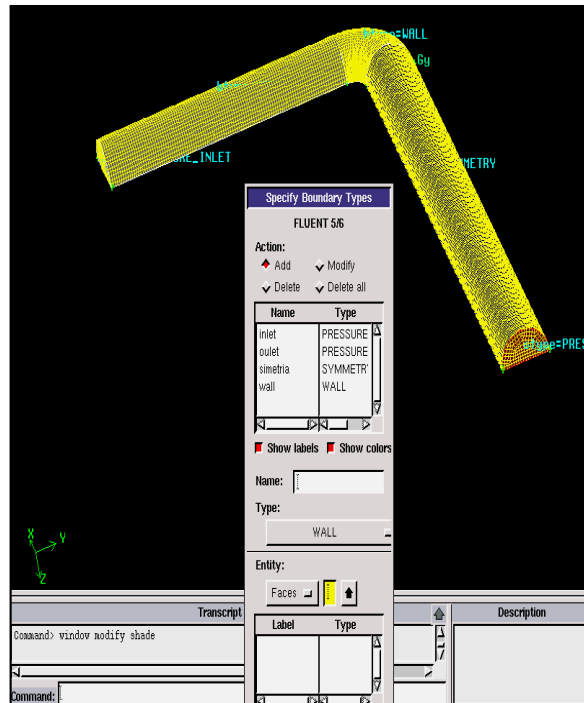


Fig.5. Condiciones de Borde

6. Análisis de Ecuaciones utilizadas en la Simulación en Fluent

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) [3] se basa en las ecuaciones fundamentales de continuidad, de momento y energía. Las tres ecuaciones se basan en los tres principios de todo fluido dinámico:

Conservación de masa
 Segunda Ley de Newton
 Conservación de la Energía

Al aplicar la Segunda Ley de Newton a un fluido, debemos considerar la masa por unidad de tiempo ($Q = m/t$), es decir el gasto másico, y debe ser aplicada a un volumen de control. La aceleración de la Segunda Ley, para el caso de estudio, está más bien asociada a flujos de momentum, lo cual se traduce luego en esfuerzos viscosos.

Para los fluidos ideales, las únicas fuerzas que considerábamos son la fuerza gravitatoria y las fuerzas debidas a la presión de los alrededores. En el caso de un fluido viscoso es necesario hacer un tratamiento más general, de modo que las fuerzas de contacto incluyan todos los posibles esfuerzos que actúan sobre cada partícula de fluido, tales como la presión, los

esfuerzos de cizalla. En términos de fuerzas por unidad de volumen, la segunda ley de Newton nos quedaría:

$$f_{\text{gravitatoria}} + f_{\text{presión}} + f_{\text{viscosas}} = \rho * a . \quad (9)$$

Si tenemos fuerzas viscosas hay que ampliar la ecuación con el término viscoso. En el caso de un fluido newtoniano incompresible este término vale, $\mu * \Delta v$ con lo que obtenemos la siguiente ecuación diferencial, reemplazando los términos de las fuerzas:

$$g\rho - \nabla p + \mu \Delta v = \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho(v \nabla)v . \quad (10)$$

A esta última ecuación se la conoce como de Navier-Stokes [5] y es aplicada a flujos incompresibles y newtonianos como el caso analizado. En la resolución mediante CFD se emplean las ecuaciones de Navier-Stokes y balances de energía sobre volúmenes de control; es decir, sobre pequeños volúmenes definidos dentro de la geometría del sistema, además de los modelos de turbulencia cuando son requeridos. Las ecuaciones sirven para solucionar las iteraciones que realiza CFD del flujo de fluidos y los balances de energía y están basadas en las ecuaciones descritas. Los balances son generalizados, el usuario puede decidir el número de balances a solucionar según cuantos elementos se hayan definido en el sistema (en nuestro caso 37459 celdas). Los paquetes comerciales de CFD de FLUENT resuelven para todos los flujos ecuaciones de Navier-Stokes para la conservación de masa y del momento cuando hay flujo laminar sin transferencia de calor. Para flujos en los que está presente compresibilidad o transferencia de calor, se resuelve una ecuación adicional de conservación de la energía. Para flujos que implican mezcla de especies o reacciones, se resuelven ecuaciones de conservación de especies; si se emplea el modelo de combustión de no-pre mezcla, se resuelven ecuaciones de conservación para fracciones mixtas. Cuando el flujo es turbulento se resuelven ecuaciones adicionales de transporte.

a. Ecuación de Conservación de Masa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0 . \quad (11)$$

b.- Ecuación de Conservación de Momento

$$\frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i u_j) = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + g_j (\rho - \rho_0) . \quad (12)$$

c.- Ecuación de Conservación de Energía

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial P}{\partial t} . \quad (13)$$

Los esfuerzos viscosos se relacionan con la velocidad de deformación. El modelo más simple posible de esta relación es una proporcionalidad lineal. Un fluido que sigue la proporcionalidad lineal se conoce como fluido newtoniano. A partir de un desarrollo de la relación esfuerzo-velocidad de deformación para un fluido newtoniano de las ecuaciones (11), (12), (13), y desarrollando los términos para un fluido incompresible y de viscosidad constante, se obtienen las ecuaciones de Navier–Stokes en 3D en la forma conservativa, que describen el movimiento de un fluido viscoso e incompresible (nuestro caso de estudio).

7. Modelo Matemático de Flujo en Codo 90° de Alto Radio

El sistema de ecuaciones para flujo turbulento incompresible 3D en codo 90° de alto radio es el sistema de ecuaciones de Navier-Stokes formado por las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía. Este sistema de ecuaciones puede ser promediado y formulado para las componentes medias de las magnitudes fluidicas involucradas, dando lugar al sistema de ecuaciones de Reynolds del movimiento medio, que puede ser expresado en coordenadas cartesianas y notación tensorial de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 . \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u'_i \rho u'_j}) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} \\ + \rho f_{mi} . \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho h_0) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i h_0) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho C_p u'_i T'_0}) \\ = \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ u_i \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \left(\mu_v - \frac{2}{3} \mu \right) \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] \right\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \dot{Q}r \\ + \dot{Q}q + \rho f_{mi} u_i . \end{aligned} \quad (16)$$

Donde la ecuación de la energía Eq. 14 ha sido formulada en función de la entalpía de remanso. En el caso de estudio se pueden considerar las siguientes hipótesis:

Flujo Estacionario: El sistema de ecuaciones también sería de aplicación en flujo cuasi-estacionario, es decir, cuando el número adimensional de Strouhal [7] sea $St \ll 1$ y por lo tanto, el tiempo de residencia sea mucho menor que el tiempo característico de variación de flujo en caso de ser este no-estacionario.

Flujo Adiabático: No existe transferencia de calor entre el fluido y el exterior, bien porque el conducto está aislado térmicamente o porque es de corta longitud, en cuyo caso se podría

considerar cuasi-adiabático. Tampoco se considera transmisión de calor por radiación o reacción química.

8. Modelo Numérico

8.1. Modelo k-epsilon estándar

Es un modelo simple en el cual la solución de dos ecuaciones de transporte separadas lleva a determinar independientemente la velocidad turbulenta y las longitudes de escala. El modelo Estándar k-epsilon es robusto, económico y de razonable aproximación para un rango amplio de flujos turbulentos; por esa razón tiene gran popularidad en flujos industriales y simulaciones de transferencia de calor. Las ecuaciones del modelo son derivadas de consideraciones fenomenológicas y empíricas; así, desde que se conoció este modelo, se han ido introduciendo mejoras. En FLUENT se puede optar a dos variantes de este modelo:

- El modelo realizable k-epsilon.
- Modelo RNG k-epsilon

8.1.1 El modelo realizable k-epsilon

Es un modelo desarrollado recientemente en comparación con el modelo Estándar k-epsilon [9], es una formulación alternativa para viscosidad turbulenta y tiene nueva ecuación del transporte para la razón de disipación.

El beneficio inmediato del modelo realizable es que tiene una resolución superior para flujos que incluyen rotación, capas límites bajo gradientes de presión fuertes y adversos, separación y recirculación. Tanto el modelo RNG k-epsilon como el realizable presentan avances notables sobre el modelo Estándar donde las características del flujo incluyen fuertes curvaturas, vórtices y rotaciones. Como el modelo es relativamente nuevo, no está claro, cuando el modelo realizable k-epsilon supera al modelo RNG, aunque en estudios iniciales se haya demostrado que para flujos separados y flujos secundarios complejos tiene un mejor comportamiento y da mejores resultados frente a otras versiones de modelos k-epsilon.

8.1.2 El modelo k-e de renormalización de grupo (RNG)

El modelo RNG k-e fue derivado aplicando a la ecuación instantánea de Navier-Stokes la técnica estadística de renormalización de la teoría de grupo, es similar en forma a las ecuaciones del modelo estándar de k-epsilon pero incluye un término adicional que mejora el análisis de flujos rápidamente forzados, el efecto de vórtices en la turbulencia (con lo que se aumenta la precisión para flujos muy removidos) y una fórmula diferencial derivada analíticamente por la viscosidad efectiva válida también para números de Reynolds bajos.

Las características hacen que el modelo RNG sea utilizable para una mayor gama de flujos, que en el caso del modelo Estándar k-epsilon, la efectividad de esta característica depende de un adecuado tratamiento en las zonas cercanas a las paredes.

Las ecuaciones para el modelo RNG k-e, son similares en forma al modelo estándar de k-e:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \\ + S_k. \end{aligned} \quad (16)$$

y;

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon \\ + S_\varepsilon. \end{aligned} \quad (17)$$

G_k , se evalúa de manera consistente con la hipótesis de Boussinesq^[6],

$$G_k = \mu_t S^2. \quad (18)$$

Donde S es el módulo del tensor principal de la relación de esfuerzos, se define como:

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}. \quad (19)$$

La generación de la turbulencia debido a la flotabilidad es representada por:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial t}{\partial x_i}. \quad (20)$$

Donde Pr_t es el número de Prandtl turbulento para energía y g_i es el componente del vector gravitacional en la dirección i . Para los modelos estándar y realizable de k - ε , el valor default para el número de Prandtl es 0.85. En el caso del modelo RNG el valor es de $Pr_t = 1/\alpha$, donde α es el número efectivo inverso de Prandtl derivado por la teoría RNG. El coeficiente térmico de expansión (β), se define como:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} \right). \quad (21)$$

En las ecuaciones (8.1) y (8.2), G_k representa la generación de energía cinética de turbulencia en ambas a la media de los gradientes de velocidad, G_b es la generación de energía cinética de turbulencia en ambas a la flotabilidad, Y_M representa la contribución de la dilatación fluctuante en turbulencia compresible a la razón de disipación global.

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son constantes en 2D y 3D, para tres dimensiones $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $C_{3\varepsilon} = 1.76$ α_k y α_ε son los inversos de números turbulentos de Prandtl para k y ε para el RNG $\alpha_k = \alpha_\varepsilon$ con el valor de 1.393, respectivamente. S_k y S_ε son términos definidos por el usuario. ^{[6] [7]}

9. Resolución

Una vez dividido el dominio en volúmenes de control, para hallar las soluciones, FLUENT opera de la siguiente manera: Integración de las ecuaciones que gobiernan volúmenes de control para crear ecuaciones algebraicas con incógnitas como la presión o la velocidad. El modelo de resolución que empleamos en este proyecto es el segregado, que es el modelo más adecuado para la simulación en 3D, del uso de otros modelos resultarían simulaciones menos reales y se requeriría un tiempo mayor de simulación. Este modelo trabaja resolviendo las ecuaciones que gobiernan el sistema de forma secuencial. Dado que las ecuaciones no son lineales, el modelo es iterativo y repite el proceso hasta que se alcanza el criterio de convergencia. Con cada iteración se sigue los siguientes pasos:

1. Actualización de propiedades.
2. Resolución de ecuaciones de momento.
3. Resolución de ecuaciones de corrección de la presión (continuidad). Actualización de la presión, flujo de masa.
4. Resolución de la ecuación de la energía, las especies, turbulencia y otras ecuaciones escalares.
5. Comparación del resultado con el criterio de convergencia. Si éste no se ha alcanzado iniciamos el proceso de iteración desde el punto uno hasta hallar una solución que lo cumpla [8]. La tabla 2 muestra los pasos:

Tabla N°2. Pasos seguidos en la resolución del problema

PASO	ACCION	DESCRIPCION
1	Abrir Fluent	
2	File/Read/Case	Importamos la malla del codo. Es un archivo .mesh
3	Grid/Check	Comprobamos que el estado de la malla sea el correcto
4	Grid/Scale	Definimos aquí las unidades con las que vamos a trabajar
5	Define/Models/Solver	Escogemos: modelo segregado y estado estacionario
6	Define/Models/Viscous	Escogemos el modelo de turbulencia k-épsilon
7	Define/Materials	Escogemos las sustancias que intervienen en el sistema. En este caso agua
8	Define/Boundary Conditions	Definimos la velocidad de entrada del agua: 20 m/s de componente solo vertical. Definimos intensidad turbulenta y diámetro hidráulico
9	Solve/Monitors/Residuals	Realiza un gráfico con los residuales de modo que durante la simulación podamos ver si las iteraciones convergen. Criterio de convergencia 10^{-5} . Graficamos la velocidad en x, y, z
10	Solve/Initialize/Initialize	Inicializamos la simulación desde la entrada por la extensión de tubería 10 ID, con la corriente de 20 m/s
11	File/Write/Case	Guardamos las modificaciones hechas en Fluent
12	Solve/Iterate	Realizamos 150 iteraciones

10. Resultados

Los resultados descritos son el producto de la resolución de las ecuaciones anteriores discretizadas por FLUENT, en cada volumen de control (celda) del accesorio. Se detallan en la tabla 3, previo trabajo en hoja de cálculo.

Tabla N°3. Datos, resultados obtenidos producto de la simulación y valor estimado de K_L

DATOS	
Fluido	Agua
Constante gravitacional	9.8 m/s
Presión de referencia	0 Pa
Temperatura	300°K
Densidad	1000 Kg/m ³
Viscosidad	8x10 ⁻⁴ Pa-s
Diámetro de entrada	0.254508 m
Diámetro de salida	0.254508 m
Longitud de entrada	2.54508 m
Longitud de salida	5.09016 m
Velocidad de entrada	20 m/s
CALCULOS	
Rugosidad (ϵ/D)	1.18x10 ⁻⁷
Velocidad de entrada	20 m/s
Velocidad de salida	0 m/s
Reynolds	6362700
Intensidad de turbulencia de entrada (%)	3.21x10 ²
Intensidad de turbulencia de salida (%)	2.36x10 ⁻¹
Factor de fricción (Colebrook-Iterativo)	7.56x10 ⁻³
Presión de entrada (Pa)	1.57x10 ⁶
Presión de salida (Pa)	1.26x10 ⁶
Pérdidas por fricción entrada (Pa) (ΔP_{fe})	9.00x10 ¹
Pérdidas por fricción a la salida (Pa) (ΔP_{fs})	1.80x10 ²
Pérdidas totales por fricción (Pa)	2.70x10 ²
RESULTADOS DEL FLUENT (SIMULADOR)	
Presión estática total de salida TP1 (Pa)	1.57x10 ⁶
Presión estática total de salida TP2 (Pa)	1.26x10 ⁶
Diferencia presión total (Pa)	2.90x10 ⁵
Pérdidas totales por fricción (Pa)	2.70x10 ²
Pérdidas debidas al codo (Pa)	3.10x10 ⁵
K_L	<u>1.54865</u>

El método iterativo para encontrar el factor de fricción se lo realiza por prueba y error, se llegó a la convergencia con 25 ensayos. En la fig.5 se describe las iteraciones que se realizaron para la convergencia de resultados.

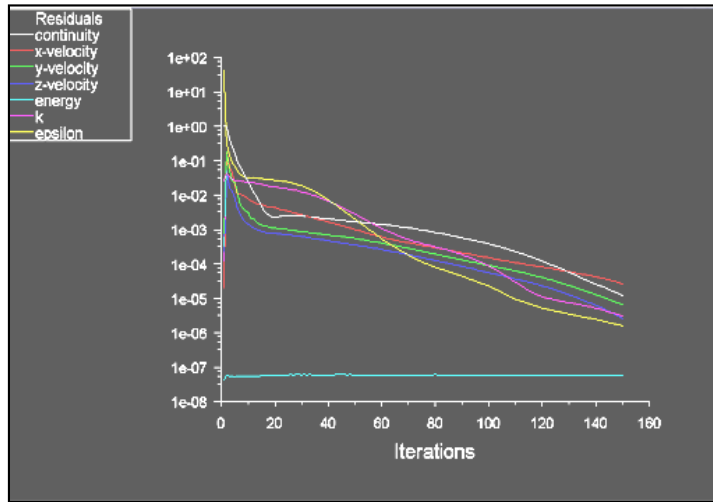


Fig. 5 Número de iteraciones para convergencia

Las gráficas de turbulencia, velocidad, presión estática y temperatura, son detalladas a continuación y cada una representa el comportamiento que registró el flujo del fluido sobre cada uno de los volúmenes de control mallasados en GAMBIT. Para entender, las presiones estáticas a la entrada y salida son tomadas de la iteración 150.

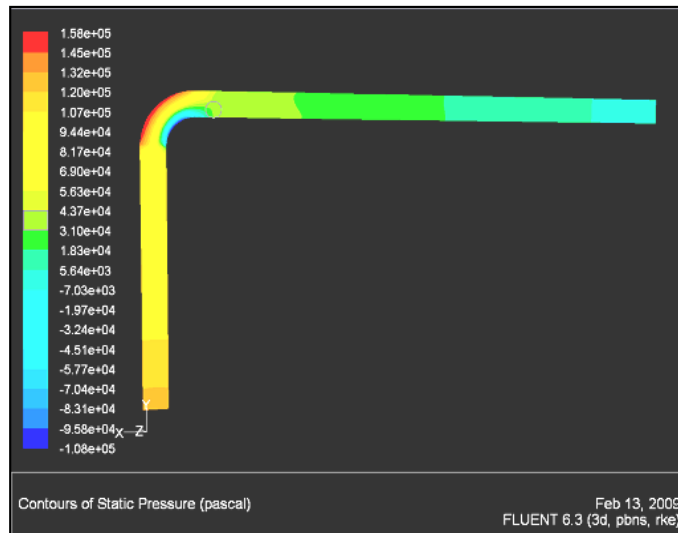


Fig.6 Contorno de Presión Estática

Según la fig.6 se aprecia presión estática máxima en la sección del codo, en la extensión de tubería por donde ingresa el fluido es relativamente alta esto indica claramente que la presión está ligada a la velocidad del fluido, a la salida en la extensión más larga la presión es moderada, lo que indica disminución de la energía cinética en las partículas de fluido.

La turbulencia presentada en fig.7 es máxima a la entrada del fluido (parte inferior de la gráfica), el codo muestra una distribución de turbulencia intermedia, al final de la tubería, en la salida los efectos turbulentos descienden. Pueden realizarse la simulación para varios valores de velocidad, estableciendo relaciones entre estas, para conocer el comportamiento del valor de K_t ante la variación de dichas velocidades.

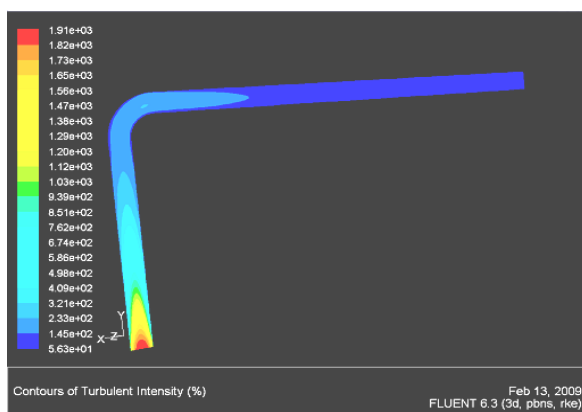


Fig. 7. Contorno de turbulencia

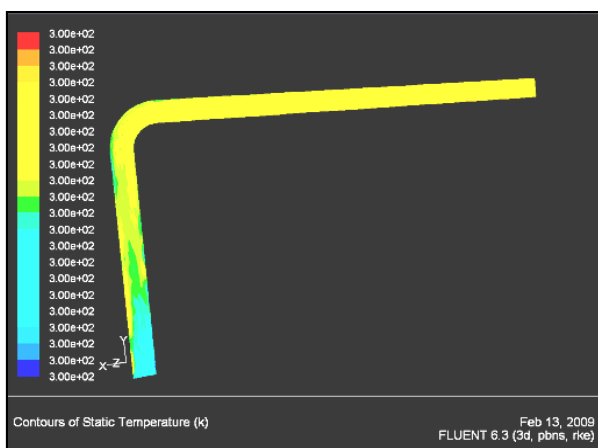


Fig. 8 Contorno de temperatura

La temperatura tiene un perfil más uniforme (fig.8), siendo moderada en la entrada de la tubería, es razonable interpretar esto por la fricción y turbulencia que se presenta en este punto.

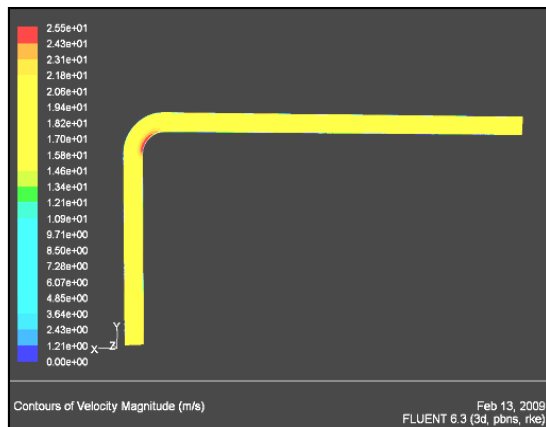


Fig. 9. Contorno de Velocidad

La velocidad se acentúa en el accesorio (codo), en este sector la energía cinética es máxima, la fricción aumenta. La fig.10 presenta una distribución de la velocidad de los vectores en la estructura interna del codo, se hace una aproximación, donde se nota la dirección en el flujo, y qué vectores muestran más desviación en el accesorio. Parte externa velocidad máxima.

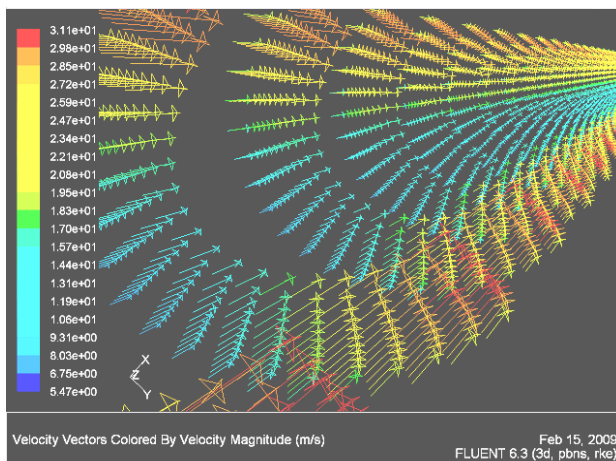


Figura 10. Vectores de velocidad

11. Conclusiones y Recomendaciones

El perfil de presión estática es importante, este muestra la distribución del flujo que tiene lugar en el accesorio, los esfuerzos son aplicados en sus máximos valores en esta región, demostrando fiabilidad en la simulación.

El valor de K_L tiene un valor de 1.54865 obtenido con la simulación, se compara con los referidos en bibliografía de 1.5, con un error de 3.14%, razonable para la simulación.

Para que la aproximación a este valor estandarizado en los textos sea más exacta, se sugiere realizar más iteraciones al modelo utilizado.

Se pueden realizar comparaciones con varias simulaciones, agrupando los datos mediante continuos experimentos, para establecer una desviación estándar de los datos, bajo diferentes modelos.

La incertidumbre que se presenta en los resultados tiene que analizarse en la realización del mallado de la estructura con GAMBIT, el buen resultado de las simulaciones se encuentra también en la calidad de este trabajo previo.

Para el cálculo del factor de fricción se pueden utilizar otros autores como: Hagen-Poiseville, Zingrang & Sylvester, Haaland S.E, Nikuradse, Jain [10], entre otros., pudiéndose estimar cuál de estos produce menor incertidumbre y si tiene mayor aproximación al valor calculado de K_L .

Se puede utilizar otros materiales para el simulado, el fluido puede variarse a compresible, con modelo de viscosidad k-omega^[9], por ejemplo, para comparar los valores que se obtienen, con el trabajo realizado.

Se puede realizar el modelado y simulación para diferentes accesorios, pudiendo establecer relaciones entre ellos para comparar y correlacionar con trabajos previos.

Con el objeto de verificar el comportamiento del accesorio y las pérdidas que pueda tener, el mismo se puede analizar bajo flujos bifásicos y trifásicos, comparando los resultados con el trabajo realizado.

Los resultados obtenidos, son importantes en el diseño de sistemas de flujo en los que intervienen diferentes tipos de accesorios y dispositivos como bombas, estranguladores, válvulas, etc., pudiendo utilizar el programa HYDROFILO 2.0, para evaluar las caídas de presión y pérdidas por fricción en todos los elementos.

12. Referencias

1. Curtil, R.; Magnet, J.: Exhaust pipe system for high pressure charging, Proc IMechE. Conference on Turbocharging and Turbochargers Paper N° C65/78, (1978), pp. 147-158.
2. Fluent Inc., Gambit 2.2 Tutorial Guide. March 2004
3. Anderson, Jonh D., Jr. Computational Fluid Dynamics. (1999), pp. 169.
4. Endo, M., Iwamoto, J., Numerical analysis of pulsatile flow in pipe system with three way junction, paper SAE 952068, (1995).
5. Cuvelier, C., Segal, A., Van Steenhoven, A. A., Finite Elements Method and Navier-Stokes Equations. Reidel MIA.
6. Wilcox, D.: Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, Inc., Griffin printing, California, (2000)
7. Miller, D.S., Internal Flow Systems., BHRA Crankfield, Bedford, UK., 2nd ed., 1996.
8. Oberkampf, W.L., DeLand, S.M., Rutherford, B.M., Diegert, K.V., Alvin, K.F., A new methodology for estimation of total uncertainty in computational simulation., 40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Material Conference and Exhibit., St. Louis, MO, US., April 12-15., 3061-3083, AIAA Paper 99-1612.
9. Fluent Inc., Fluent 6.2. Tutorial Guide. January 2005
10. Vera F. Norka., Facilidades de Superficie., Universidad de Zulia, Venezuela., 1999., pp.110.