



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFÍA
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE INGENIERÍA CARRERA
DE INGENIERÍA BIOMÉDICA
MECÁNICA Y TRANSPORTE DE FLUIDOS

Nombres y apellidos: Andrea López, Andrea Ramírez

Código: 70261509, 76372889

PRIMER INFORME DE SESIONES DEMOSTRATIVAS

CFD FOR BEGGINERS; USO DE LOS SOLVERS: ICOFOAM Y SIMPLEFOAM

COMPETENCIA: Desarrollar competencias básicas en el manejo de simulaciones de fluidos en computadora mediante OpenFoam (librería de código escrito en C++).

El presente formato deberá ser desarrollado según lo indicado; recuerde citar la bibliografía consultada.

I. INTRODUCCIÓN

Construya este primer ítem respondiendo las preguntas planteadas, tenga en cuenta la precisión y coherencia de los párrafos. Puede considerar otros aspectos relevantes.

- ¿Cuáles son las etapas del proceso de una simulación? A.R

Preprocesamiento: Implica los pasos de seleccionar el editor y copiar la data para el mallado, los campos, las propiedades, los parámetros de control, etc. Asimismo, abarca los siguientes pasos:

- Generación de la malla
- Condiciones de contorno y condiciones iniciales
- Propiedades físicas
- Control
- Discretización y ajustes del solver linear

Ver el mallado: Implica comprobar que no hayan errores antes de correr el caso.

Ejecución de la aplicación: Se realiza mediante el uso de los solvers

Post-procesamiento: Se realiza para visualizar mejor los resultados. Abarca:

- Colorear la superficie

Cortar el plano (slice)
Contornos
Plot de vectores [1]

- ¿Cuáles son las ventajas de la discretización con volúmenes finitos? Mencionar tres.
 1. Permite una estimación del error a posteriori
 2. La discretización espacial se lleva a cabo en el espacio físico del problema
 3. No presenta problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de diferencias finitas
 4. Es flexible (puede implementarse en malla estructuradas y no estructuradas)
 5. Permite obtener soluciones 'débiles' de las ecuaciones [2].
- ¿Cuáles son los alcances y restricciones de los solvers IcoFoam y SimpleFoam?

	IcoFoam [3] [4]	SimpleFoam [5]
Alcances	Para fluidos transitorios Usan algoritmo PISO Establece la viscosidad cinemática constante de un diccionario	Para fluidos en estado estables Uso de algoritmo PISO Se elige el modelo de turbulencia (RAS o LES), los cuales varían la precisión del modelado. Usa la viscosidad efectiva no constante del modelo no newtoniano y el modelo de turbulencia elegido.
Restricciones	Resuelve ecuaciones Navier-Stokes para fluidos incompresibles y newtonianos de flujo laminar. Requiere condiciones iniciales y límites. Puede generar una malla no ortogonal.	Resuelve ecuaciones Navier-Stokes para fluidos incompresibles con modelado de turbulencia. Requiere mucho tiempo para la simulación de modelo de turbulencia RAS.

II. OBJETIVO

- Ejecutar simulaciones de OpenFoam en diferentes modelos evidenciando los campos de velocidades y campos de presiones.

III. TEORÍA Y CONCEPTOS BÁSICOS

Desarrolle los conceptos y teorías que se presentan a continuación

a. Preliminares:

- Campos de velocidades: El campo de velocidad es una función que permite describir la velocidad, como vector, en cada punto de una región establecida para el análisis.

-

Figura 1. Campo de velocidades

- Campos de presiones: El campo de presiones describe el comportamiento de la presión en todo el espacio definido para el estudio.
- Líneas de corriente: Consiste en una línea continua trazada a través de un fluido siguiendo la dirección del vector velocidad en cada punto. De esta manera, el vector velocidad es tangente a la línea de corriente en todos los puntos del flujo, como se observa en la Figura 2.

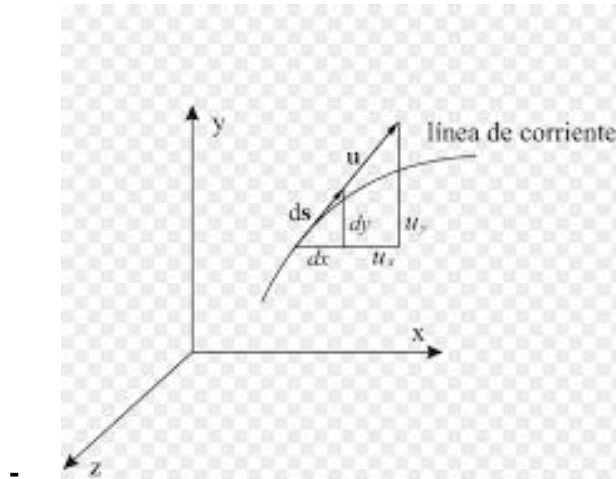


Figura 2. Línea de corriente

- Condiciones iniciales: Son los valores de posición y velocidad que se definen cuándo se lleva a cabo un análisis dinámico en un instante de tiempo definido como inicial, mayormente $t=0s$.
- Condiciones de borde: Son los valores que toman las variables en el borde de la región que se está analizando.
- Estabilidad numérica: Es una propiedad de los algoritmos numéricos que describe cómo los errores en los datos de entrada se propagan a través del algoritmo. En un método estable, los errores debidos a las aproximaciones se atenúan a medida que la computación procede. En un método inestable, cualquier error en el procesamiento se magnifica conforme el cálculo procede [6].
- Convergencia: Describe un comportamiento limitante, particularmente de una secuencia o serie infinita hacia algún límite.
- Discretización numérica [7]: Proceso de subdividir un dominio de funciones continuas, modelos, variables y ecuaciones a contrapartes discretas, esto se hace con el fin de implementar estas computadoras digitales. En el modelamiento de fluidos, este es un dominio de flujo, modelado como un medio continuo a través del cual un conjunto de ecuaciones no lineales relaciona varias cantidades dinámicas de fluidos. Dando como resultado ecuaciones finitas y lineales. Algunos esquemas son el de Euler y el lineal de Gauss.
- Malla computacional [8]: Encierra al volumen del fluido en una cuadrícula para que se pueda realizar la simulación (análogo a los mallados que se usan para análisis de elementos finitos).

b. Tipos de flujo; definición y caracterización:

- Flujo laminar: característica de fluidos viscosos, se da cuando el fluido se desplaza en capas paralelas que no se mezclan entre sí (líneas de corriente paralelas) [9]. Se

caracteriza por partículas de fluido que siguen caminos suaves en capas, con cada capa moviéndose suavemente más allá de las capas adyacentes con poca o ninguna mezcla [10]. Se puede identificar con un número de Reynolds menor a 2100.

- Flujo turbulento: característica de fluidos viscosos, tiende a ocurrir a velocidades más altas, baja viscosidad y a mayores dimensiones lineales características. Si el número de Reynolds es mayor que $Re > 4200$, el flujo es turbulento. El flujo se caracteriza por el movimiento irregular de partículas del fluido, tiene comportamiento caótico y el esfuerzo cortante entre capas aumenta.
- Flujo incompresible: fluido cuya densidad permanece constante ante cualquier cambio termodinámico o geométrico. Además, de la ecuación de continuidad se obtiene que la gradiente de su velocidad es cero.
- Flujo transitorio: los parámetros de flujo (como, velocidad y presión) dependen no solo de la posición en el sistema de coordenadas utilizado para describir el campo de flujo, sino también del tiempo
- Flujo estacionario: no hay cambios en sus parámetros de flujo con respecto al tiempo.

c. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

- Ecuación de energía: Es similar a la ecuación de Bernoulli pues también comprende los términos relacionados a la energía de presión, energía potencial y energía cinética. Además, también es para flujos incompresibles. Sin embargo, la ecuación de energía, si considera fluidos viscosos y también considera la entrada y salida de energía a la línea de corriente. Finalmente, cada término se divide por la gravedad dando como resultado la ecuación siguiente, donde h_p denota la diferencia entre la energía que entra a la línea de corriente y la que sale.

$$H_1 = H_2$$

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_p = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

Figura 3. Ecuación de energía

- Ecuación general de transporte: Describe la evolución de una cantidad definida como ϕ , que puede ser cualquier cantidad de interés que está siendo transportada, puede ser temperatura, velocidad, concentración de una sustancia específica, etc. El primer término, de derecha a izquierda, es el ratio de aumento de ϕ en el elemento. El segundo término es la convección de la variable, es decir, el ratio de flujo de ϕ fuera del elemento. El tercero

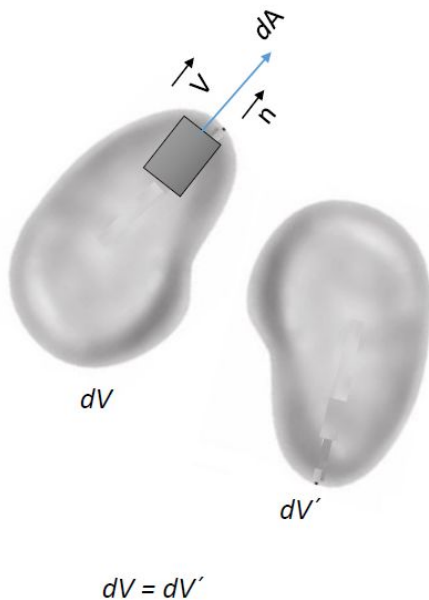
es el término de difusión que tiene una constante de proporcionalidad gamma y describe el ratio de aumento debido a la difusión. El cuarto es el término de fuente, que hace referencia al ratio de aumento debido a la fuente. Cabe destacar que cuando se reemplaza phi por la velocidad, se obtiene la ecuación de Navier-Stokes.

$$\left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla(\rho\phi) \right) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi$$

Figura 4. Ecuación general de transporte

- Ecuación de la conservación de la masa

La relación de conservación de la masa para un sistema cerrado que pasa por un cambio se expresa como masa del sistema constante o derivada de la masa del sistema con respecto al tiempo igual a cero. En la mecánica de fluidos, la relación de conservación de la masa escrita para un volumen diferencial de control suele llamarse ecuación de continuidad



$$\int \frac{d}{dt}(\rho dV) + \int \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0$$

Teorema de la divergencia

$$\begin{aligned} \int \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dA &= \int \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV \\ \int \frac{d}{dt} \rho dV + \int \nabla \cdot (\rho \vec{V}) dV &= 0 \\ \int \left(\frac{d}{dt} \rho + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) \right) dV &= 0 \\ \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) &= 0 \end{aligned}$$

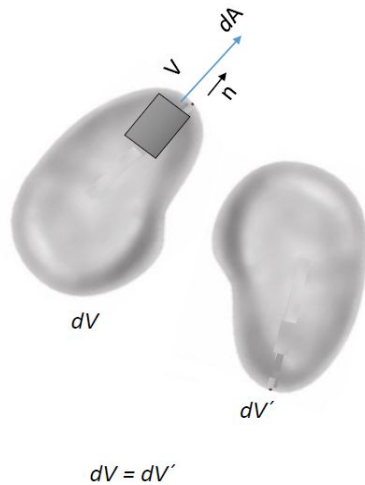
Figura 5. Ecuación de la conservación de masa

- Ecuación de la cantidad de movimiento

La cantidad de movimiento de un sistema permanece constante cuando la fuerza neta que actúa sobre él es cero, y donde se conserva la cantidad de movimiento de esos sistemas. Esto se conoce como el principio de conservación de la cantidad de

movimiento. En la mecánica de fluidos es común referirse a la segunda ley de Newton como la ecuación del momento lineal [12].

Con énfasis de la transferencia de movimiento:



$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$$

$$E = \int_V e \rho dV = \int_V \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho dV$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V e \rho dV + \int_{\text{area}} e \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE}{dt} &= \dot{Q} - \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t} \int_V e \rho dV + \int_{\text{area}} e \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \\ &= \frac{\partial}{\partial t} \int_V \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho dV + \int_{\text{area}} \left(u + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} \end{aligned}$$

Figura 6. Ecuación de la cantidad de movimiento

d. Teoría de la capa límite

La capa límite o capa fronteriza de un fluido es la zona donde el movimiento de este es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada [13].

e. Teoría y explicación por término de la ecuación de Navier-Stokes

Son un conjunto de ecuaciones diferenciales que describen el movimiento de fluidos viscosos. Se tienen la ecuación de continuidad y la ecuación de momento. En la ecuación de momento, el primer término, de derecha a izquierda, describe el cambio de la velocidad con respecto al tiempo. El segundo, es un término convectivo. El tercero, es el gradiente de la presión, el cual describe que el fluido viaja en la dirección del mayor cambio de presión. El cuarto, es un término de la fuerza del cuerpo, que describe las fuerzas externas que actúan sobre el fluido (fuerza gravitatoria o electromagnética). El último es el término de difusión, para un fluido Newtoniano, la viscosidad opera como una difusión del momento.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \rho \mathbf{g}$$

Figura 7. Ecuación de Navier Stokes

IV. RECURSOS

Detalle las características de cada recurso empleado en el desarrollo de la práctica.

- Materiales: Geometría y malla del tutorial de OpenFOAM

Cavity: El dominio de Cavity consiste en un cuadrado de longitud lateral $d = 0,1$ m en el plano x-y. Se usó inicialmente una malla uniforme de 20 por 20 celdas como se ve en la Figura 9.. La estructura del bloque se muestra en Figura 8. El generador de mallas suministrado con OpenFOAM, blockMesh, genera mallas a partir de una descripción especificada en un diccionario de entrada.

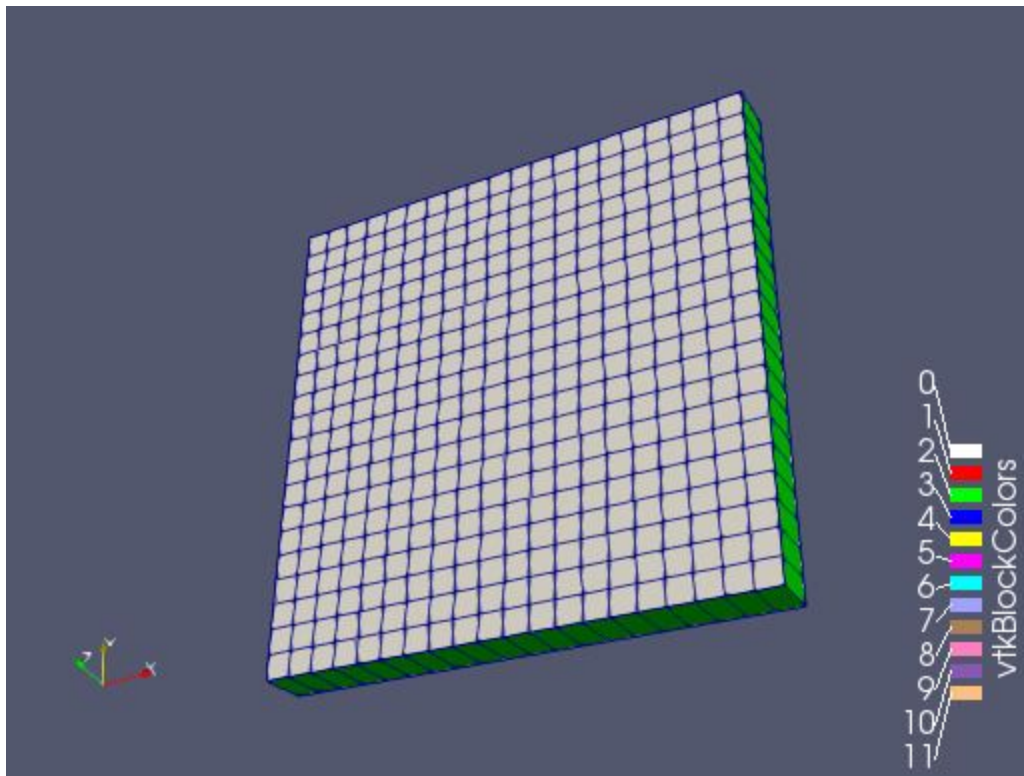


Figura 8. Estructura de la malla para Cavity


```

17 convertToMeters 0.1;
18
19 vertices
20 (
21     (0 0 0)
22     (1 0 0)
23     (1 1 0)
24     (0 1 0)
25     (0 0 0.1)
26     (1 0 0.1)
27     (1 1 0.1)
28     (0 1 0.1)
29 );
30
31 blocks
32 (
33     hex (0 1 2 3 4 5 6 7) (20 20 1) simpleGrading (1 1 1)
34 );
35
36 edges
37 (
38 );
39

```

Figura 9. Características descritas en BlockMesh

Geometría:elbow. Posee una malla tridimensional de celdas triangulares.

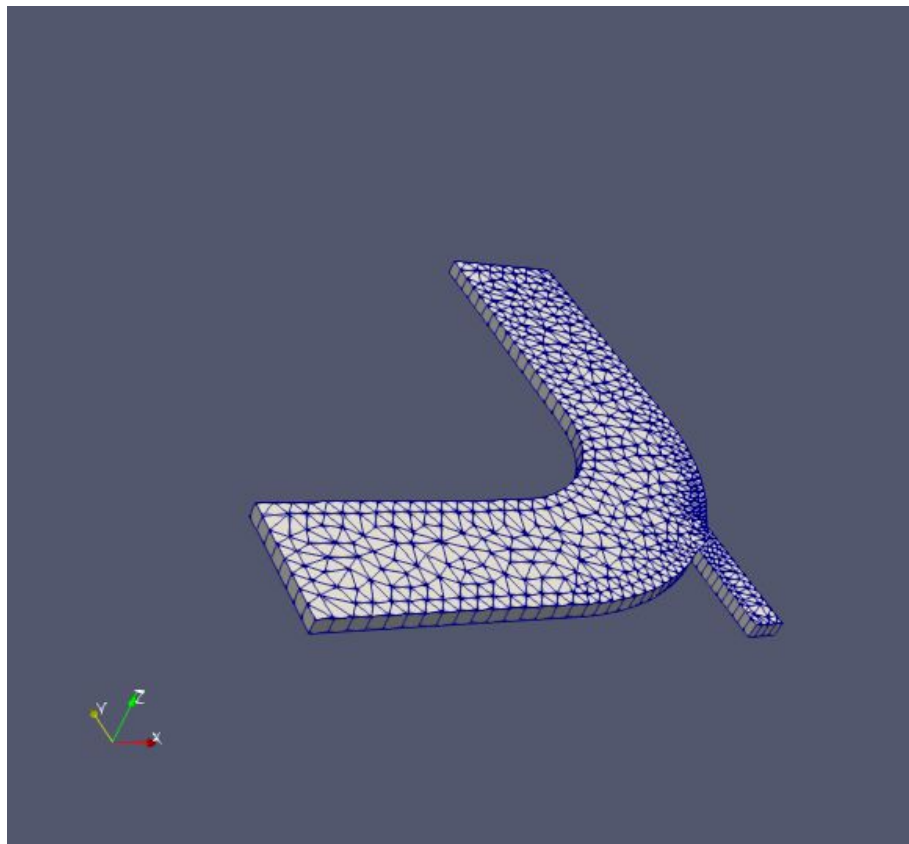


Figura 10. Estructura de la malla para Elbow

Airfoil2d: Posee una geometría 2D. Tiene una malla de tipo cuadrangular de dos dimensiones.

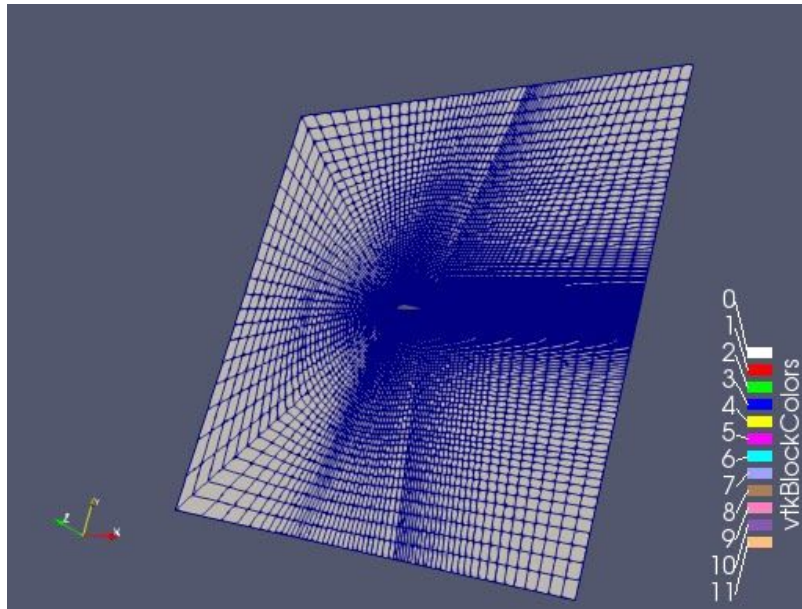


Figura 11. Estructura de la malla para Airfoil2D

- Equipos: Computadora de escritorio o laptop
Lenovo Ideapad 520 15.6-inch Laptop (8th Gen Core i7-7500U/8GB/1TB/Windows 10/4GB NVidia GeForce MX150 Graphics).
Además, se hizo uso de la máquina virtual Oracle VM Virtual Box, con las especificaciones que se muestran en la Figura 12, para la instalación de Ubuntu.





	General
Nombre:	Ubuntu
Sistema operativo:	Ubuntu (64-bit)
	Sistema
Memoria base:	4096 MB
Orden de arranque:	Óptica, Disco duro
Aceleración:	VT-x/AMD-V, Paginación anidada, Paravirtualización KVM
	Pantalla
Memoria de vídeo:	32 MB
Controlador gráfico:	VMSVGA
Aceleración:	3D
Servidor de escritorio remoto:	Inhabilitado
Grabación:	Inhabilitado
	Almacenamiento
Controlador:	IDE
IDE secundario maestro:	[Unidad óptica] VBoxGuestAdditions.iso (56.99 MB)
Controlador:	SATA
Puerto SATA 0:	Ubuntu.vdi (Normal, 20.00 GB)

Figura 12. Especificaciones de Ubuntu en Oracle VM

- Instrumentos o herramientas: OpenFOAM con solvers IcoFoam y SimpleFoam

Icofoam: icoFoam resuelve las ecuaciones laminares incompresibles de Navier-Stokes utilizando el algoritmo PISO. El código es inherentemente transitorio y requiere una condición inicial (como velocidad cero) y condiciones límite. El código icoFOAM puede tener en cuenta la no ortogonalidad de malla con sucesivas iteraciones de no ortogonalidad. El número de correcciones PISO y correcciones de no ortogonalidad se controla a través de la entrada del usuario [4].

SimpleFoam: SimpleFoam es un solucionador de estado estacionario para flujo turbulento incompresible, utilizando el algoritmo SIMPLE (Método semi-implícito para ecuaciones vinculadas a presión). En las versiones más recientes también incluye una opción para usar el algoritmo SIMPLEC (Método semi-implícito para ecuaciones vinculadas a presión consistentes) [5].

V. DESARROLLO

Escriba las instrucciones en la terminal que utilizaría para correr los modelos Elbow y Airfol2d. Tome como referencia el ejemplo presentado para Cavity.

a. Modelo Cavity

b. Modelo Elbow

c. Modelo Airfol2d

```
$ cd cavity  
$ blockMesh  
$ icoFoam  
$ icoFoam > info  
$ paraFoam
```

```
$ fluentMeshToFoam  
elbow.msh  
$ icoFoam  
$ paraFoam
```

```
$ simpleFoam  
$ simpleFoam > info  
$ paraFoam
```

Nota: Se consideró las instrucciones a partir de que se abrió la carpeta del modelo en el terminal

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

- Exporte los resultados gráficos en formato “.png” obtenidos en ParaView correspondientes a la última etapa de la simulación.

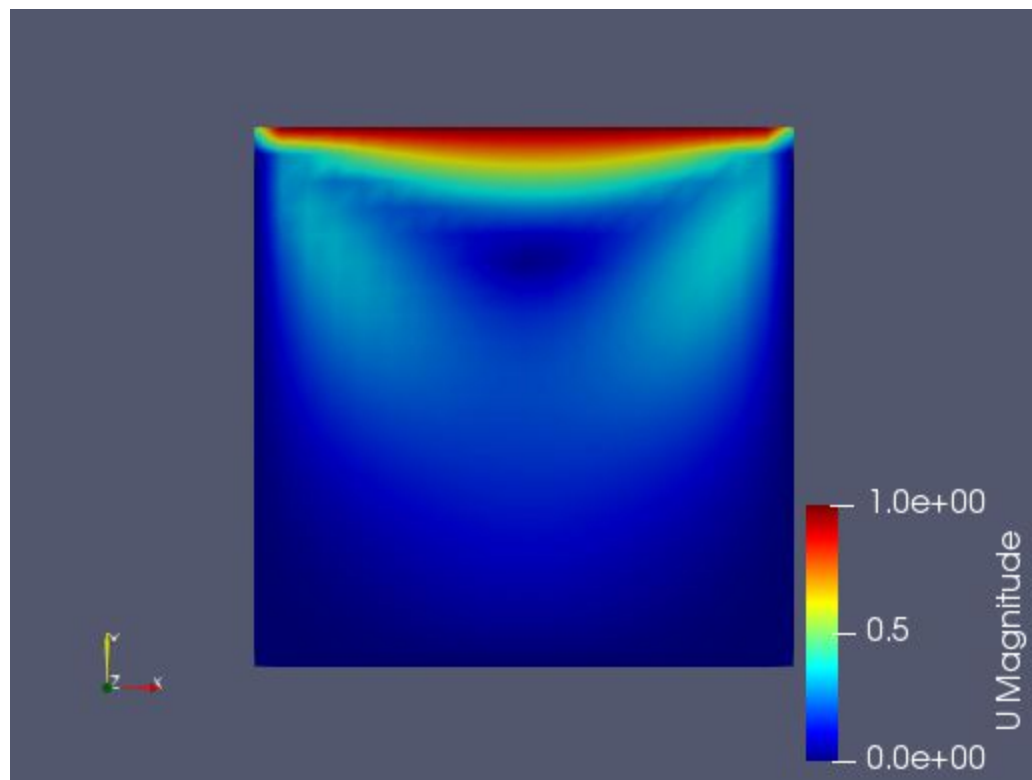


Figura 13. Modelo Cavity (velocidades)

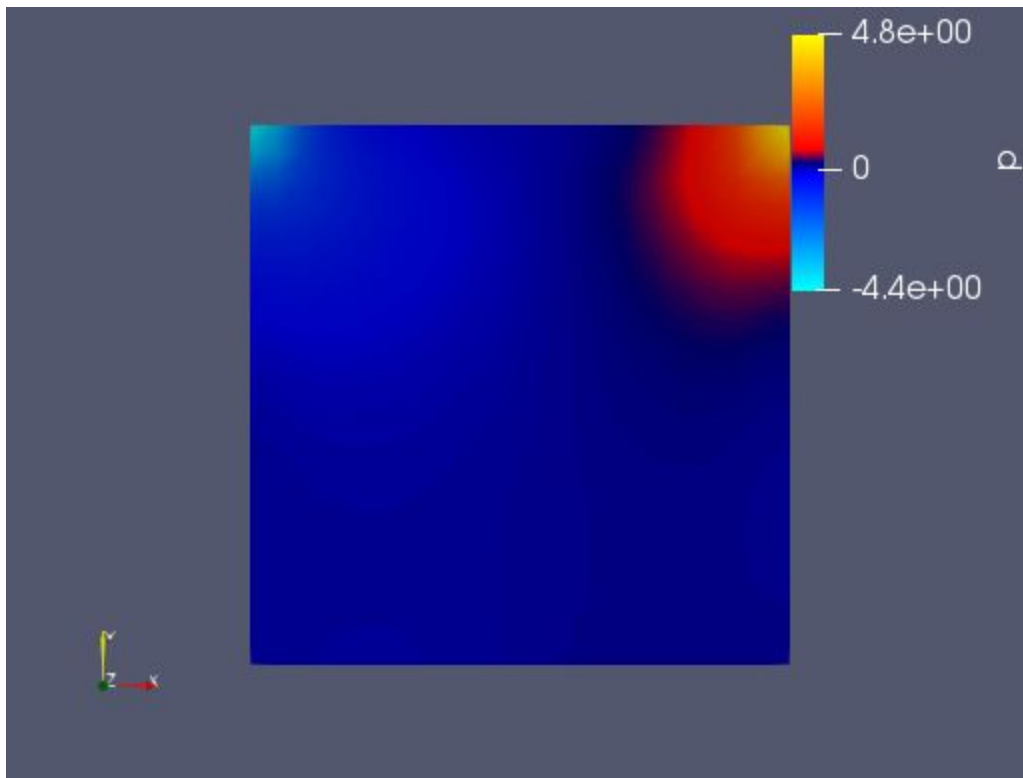


Figura 14. Modelo Cavity (presiones)

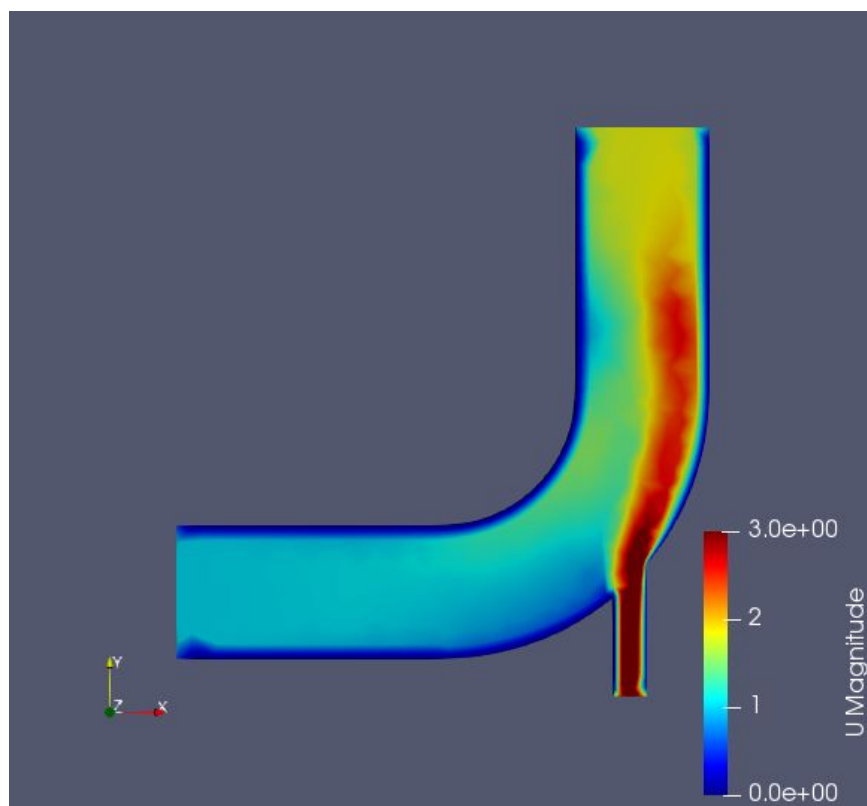


Figura 15. Modelo elbow (velocidades)

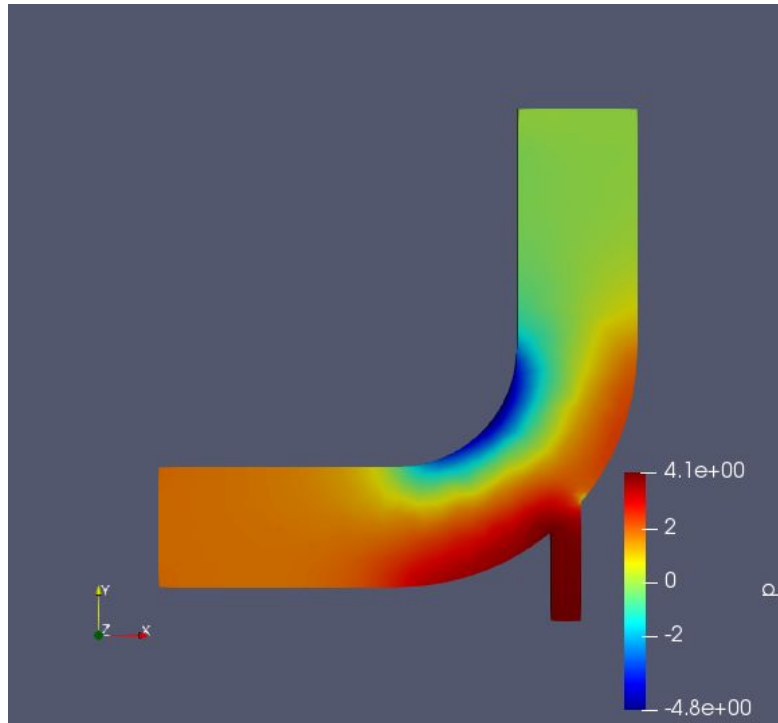


Figura 16. Modelo elbow(presiones)

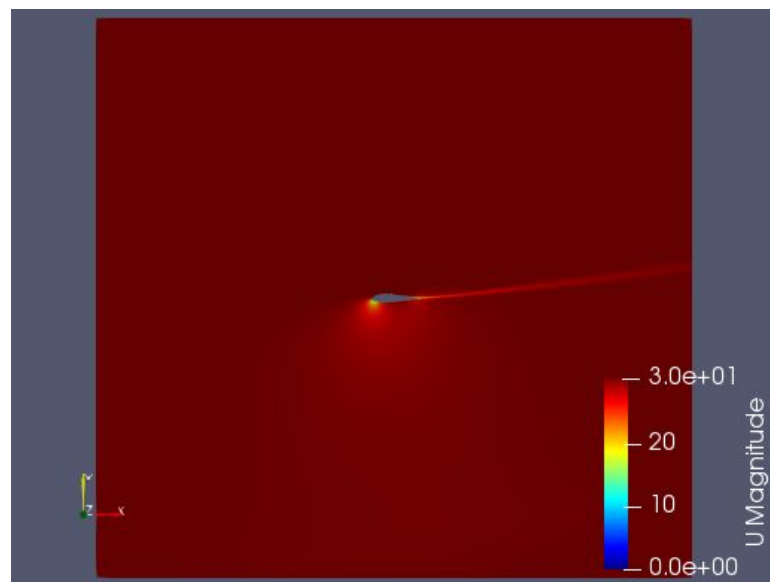


Figura 17. Modelo AirFoil2D (velocidades)

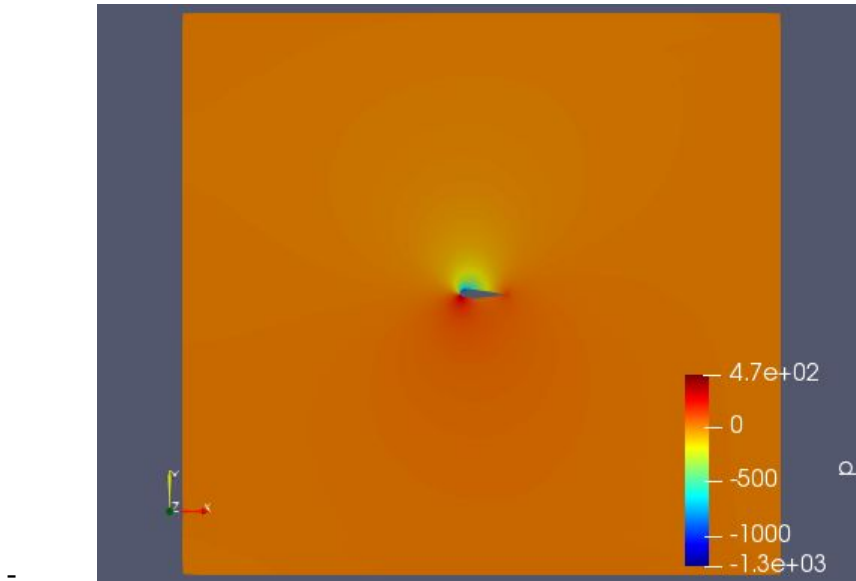


Figura 18. Modelo AirFoil2D (presiones)

- Comente sus apreciaciones sobre los campos de velocidades y campos de presiones en las zonas críticas que tenga la geometría de estudio. Señale estas zonas en su gráfica.

Modelo Cavity: En este modelo, se observa que la velocidad disminuye a lo largo del eje y, a medida que este se acerca al eje de coordenadas, llegando tener una velocidad igual a 0 en la cara posterior, por lo que se puede decir, que es un fluido irrotacional. En la Figura 19, se observa la dirección de la velocidad (en dirección +x), lo cual nos da una idea del movimiento del fluido. Por lo tanto, al realizar la simulación por las presiones, se observa que el lado derecha presenta una mayor presión, esto debido a la dirección de velocidad del fluido +x.

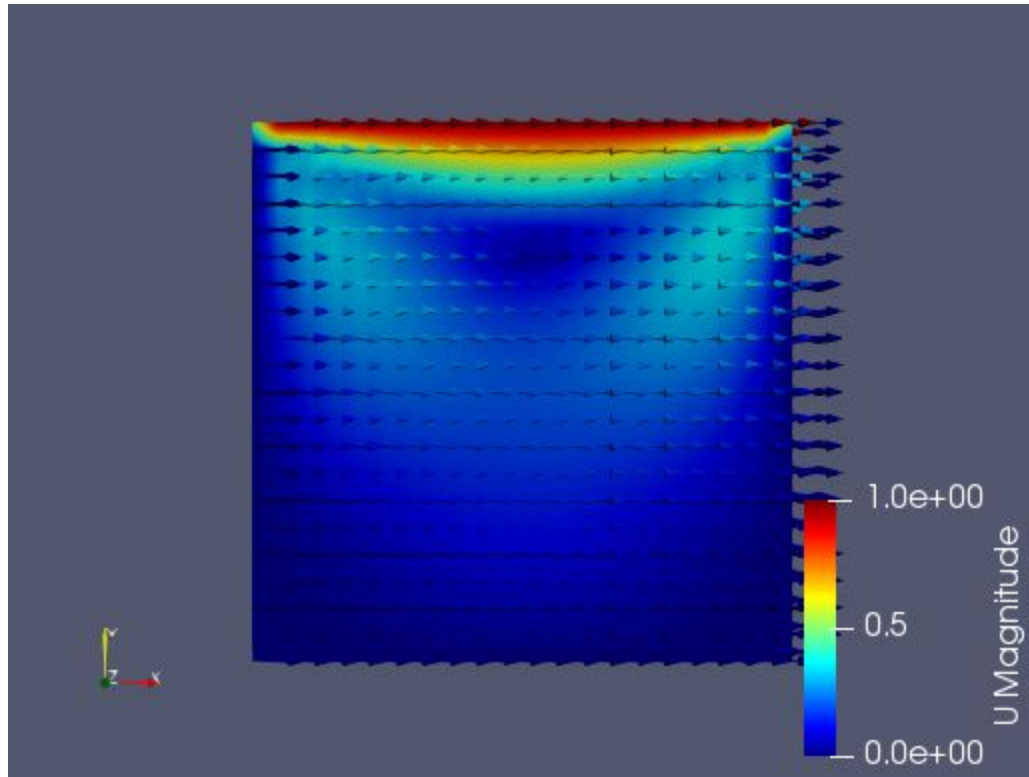


Figura 19. Modelo Cavity (vectores velocidad)

Modelo Elbow: En este modelo, se simuló para un velocidad de 3 m/s como inlet en el área de mayor longitud (2 en la Figura 20) y 1m/s como velocidad inlet para el de menor longitud (1 en la Figura 20). En la figura...se observa que la parte de menor radio de curvatura (r) presenta un color rojo oscuro, mientras que en la parte de curvatura de mayor radio se observa un color amarillo, lo que indica que la velocidad ha disminuido en la curva. Esto ocurre debido a la velocidad de inlet del tubo de radio pequeño, que ocasiona una perturbación en las líneas de corriente, y estas para compensarla aumentan la velocidad en la zona de menor radio de curvatura. Además, se sabe que a mayor velocidad, habrá menor presión, entonces la menor presión se dará en la parte de menor radio de curvatura.

En cuanto a la zonas críticas, se podría estudiar el fenómeno de cavitación si es que fuera un sistema de paredes no rígidas, ya que en la zona de menor radio de curvatura, la velocidad podría aumentar tanto, de manera que se genera una presión negativa, y esto generaría una deformación en esta zona (ZC : Zona crítica).

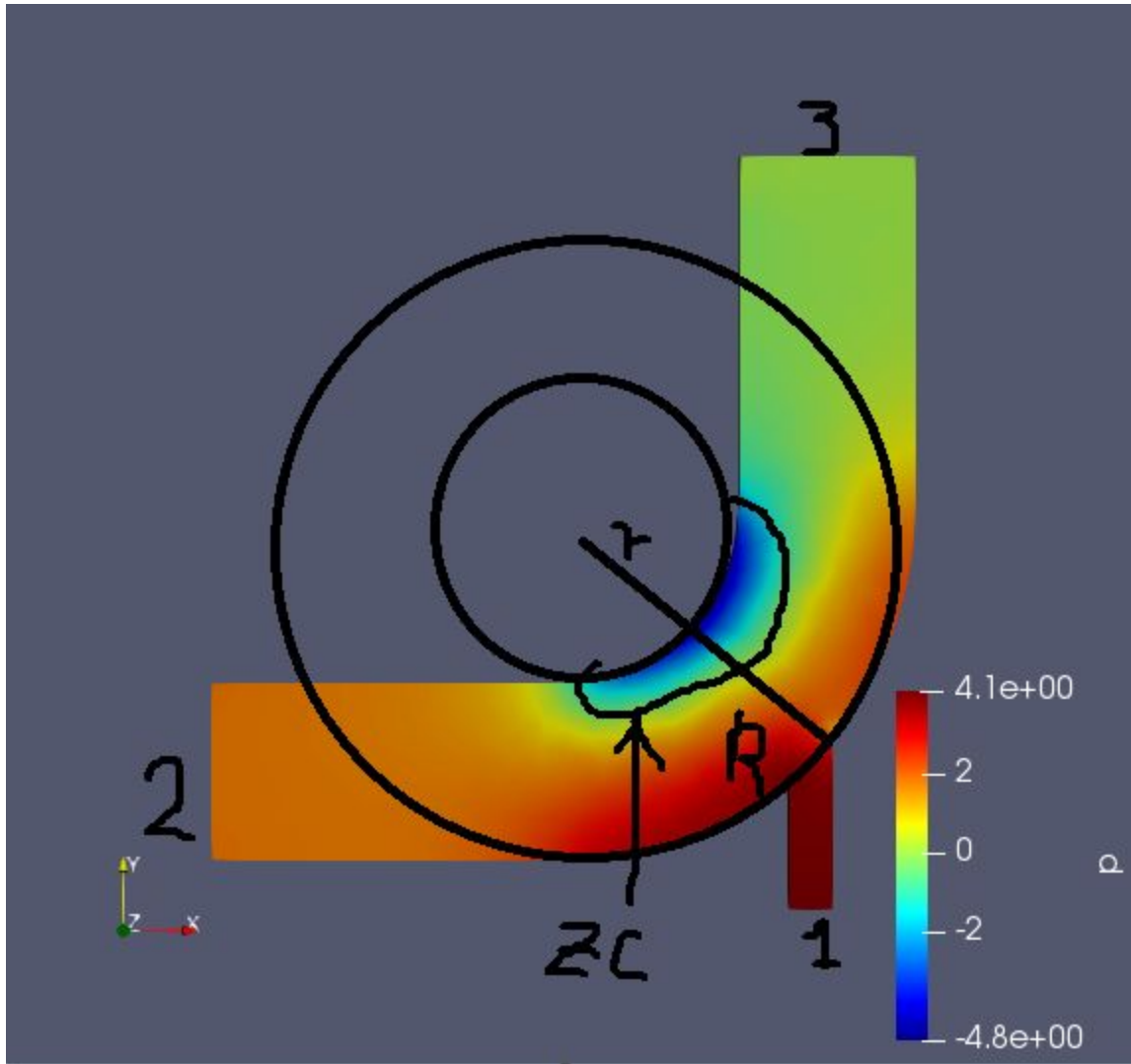


Figura 20. Modelo Elbow

Modelo Airfoil 2d: El modelo muestra un perfil naca, el cual tiene un borde de ataque, donde incide la molécula inicial, y un borde de fuga. Asimismo, tiene un intradós y un extradós, como se observa en la Figura 21. Dos moléculas que viajan juntas por una línea de corriente llegan al borde de ataque, donde se detienen un instante y se separan. Se sabe que se detienen antes de separarse debido a que como se observa en la Figura 21, en el borde de ataque hay una velocidad igual a cero (color azul). Ahí una molécula va por arriba y la otra por abajo. Debido al vacío, ambas moléculas buscarán juntarse en el borde de fuga. Dado que el extradós es mayor al intradós, la velocidad de la molécula que viaja por el extradós es mayor (color rojo intenso) que la de la molécula que viaja por el intradós.

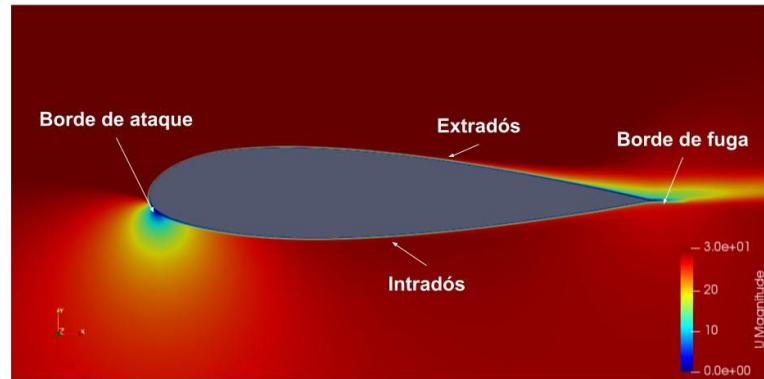


Figura 21. Modelo AirFoil2D (velocidades) - acercamiento

Como se observa en la Figura 22, la presión en la parte superior es menor (color azul/verde), mientras que en la parte inferior se observa que la presión es mayor (color rojo intenso). Es decir, ocurre lo opuesto a lo que ocurría en el caso de las velocidades.

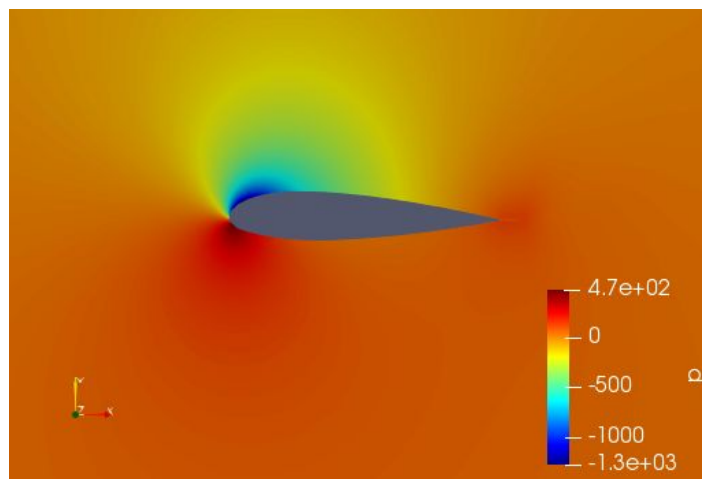


Figura 22. Modelo AirFoil2D (presiones) - acercamiento

- Comente las dificultades que se le presentaron en el desarrollo de la práctica.
La poca familiaridad con el entorno de Ubuntu complicó un poco el proceso. La versión que poseo de Ubuntu parece ser diferente a la que usa el docente por lo que me tomó tiempo encontrar la carpeta 'opt' y tuve que recurrir a tutoriales en internet para ubicar la carpeta.

VII. CONCLUSIONES

- Modelo Cavity: Se observa que la velocidad del fluido tiene una dirección de +x y que además esta disminuye en el eje y, a medida que se acerca al eje de coordenadas,

hasta llegar a estar en reposo. Además, con esto también se explica el por qué de la zona de mayor presión en la simulación de presiones.

- Modelo Elbow

Con este modelo se puede observar como varían las velocidades y presiones en un fluido cuando hay dos áreas por donde el fluido entra, se observa que se cumple el teorema de continuidad, ya que el caudal del outlet(3 en la figura..) es igual a la suma de caudal de los inlets(1 y 2 en la figura..), y también se observa que dependiendo de las velocidades que presenten los inlets, variará el comportamiento que se tiene en flujo, por ejemplo, como se vio en el modelo presentado, la velocidad de inlet de la entrada de menor área es menor a la velocidad de inlet del de mayor área, y esto generó que en la zona de menor radio de curvatura se genera un aumento de velocidad.

- Modelo Airfoil2d

Como ya se explicó, hay una diferencia de presiones, donde la presión en la parte inferior es mayor a la de la parte superior. Por lo tanto, esta diferencia de presiones causará que el vehículo se desplace hacia arriba.

Cabe destacar que la molécula que viaja por el extradós (mayor recorrido) tiene mayor velocidad y menor presión que a molécula que viaja por el extradós. con lo cual se concluye que, efectivamente, la presión y la velocidad son inversamente proporcionales, como se vio en la teoría de clases.

VIII. CUESTIONARIO

Responda las siguientes preguntas:

- a. Desde la óptica biomédica ¿En qué casos prácticos ejecutaría usted la simulación de fluidos con IcoFoam? Desarrolle un ejemplo.

Lo usaríamos para la simulación de arterias y venas, para saber ciertos cambios o deformaciones que tendría y cómo se afectaría su velocidad y presión con el tiempo, de acuerdo a la forma de esta(como bifurcaciones), también para saber los puntos críticos de estas y así poder estudiar sus posibles complicaciones. Por ejemplo, para saber la forma, el material, el grosor que debería tener determinado stent para que mejor el flujo en zonas que lo necesiten.

- b. ¿Cuál es la relación entre la pérdida de velocidad y el diámetro de la sección?

La relación entre la velocidad y el diámetro de la sección está dada por la ecuación de la continuidad, de donde se obtiene que estas tienen una relación inversa. Entonces, si existe

pérdida de velocidad, esta puede ser causada por un aumento en el diámetro de la sección de flujo.

- c. ¿Cuáles son los puntos críticos donde conviene estudiar estas geometrías? ¿Por qué estudiar las zonas críticas?

Los puntos críticos son donde la presión o la velocidad son muy altas. Conviene estudiar esos puntos porque representan el lugar de un posible quiebre, de esta manera, se pueden establecer límites para evitar llegar a los valores críticos o establecer soluciones.

- d. ¿Qué es la cavitación y cuando ocurre?

La cavitación es un fenómeno en el que los cambios rápidos de presión en un líquido conducen a la formación de pequeñas cavidades llenas de vapor en lugares donde la presión es relativamente baja.

Cuando se someten a una presión más alta, estas cavidades, llamadas "burbujas" o "vacíos", colapsan y pueden generar una onda de choque que es fuerte muy cerca de la burbuja, pero que se debilita rápidamente a medida que se propaga lejos de la burbuja [14].

IX. BIBLIOGRAFÍA

[1] OpenFoam User Guide – Version 7. Disponible en:

<http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>

[2] Dinámica de Fluidos computacional. Cap 3. Disponible en:

<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>

[3] Hakan Nillsson, C. (2013). A look inside icoFoam (and PisoFoam). Disponible en :

http://www.tfd.chalmers.se/~hani/kurser/OS_CFD_2013/aLookInsideIcoFoam.pdf

[4] IcoFoam. OpenFoamWiki. Disponible en:

<https://openfoamwiki.net/index.php/IcoFoam>

[5] SimpleFoam. OpenFoamWiki. Disponible en:

<https://openfoamwiki.net/index.php/SimpleFoam>

[6] Estabilidad Numérica -- Wikipedia, la enciclopedia libre. Disponible en:

https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_stability

[7] OpenFoam Discretization. Openff

https://openfoamwiki.net/index.php/OpenFOAM_guide/Discretization

[8] Flow Simulation Basic Concepts.engineers rule.Disponible en:

<https://www.engineersrule.com/flow-simulation-basic-concepts/>

[9] Welker, R. W. (2012). Basics and sampling of particles for size analysis and identification. In Developments in Surface Contamination and Cleaning (pp. 1-80). William Andrew Publishing. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/laminar-flows>

[10] What is laminar flow?.Simscale.Disponible en:

<https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-laminar-flow/>

[11]Characteristics of turbulent flow.Nuclear power.Disponible en:

<https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/fluid-dynamics/turbulent-flow/characteristics-of-turbulent-flow/>

[12] Çengel Yunus, A., & Cimbala John, M. (2006). Mecánica de fluidos. McgrawHill.

[13] Capa límite. Área de Mecánica de Fluidos de la E. P. S. de Ingeniería de Gijón. Universidad de Oviedo.

[14] Cavitation. Wikipedia, the free encyclopedia. Disponible en:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Cavitation>