

 <p>UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA</p>	<p>FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFÍA DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA MECÁNICA Y TRANSPORTE DE FLUIDOS</p>
---	---

Nombres y apellidos: Joaquina Rubio Grases & Viviana Beatriz Chacon Cardenas

Código: 74600567 & 73953049

PRIMER INFORME DE SESIONES DEMOSTRATIVAS
CFD FOR BEGINNERS; 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

Para obtener una simulación exitosa y bien definida se requiere seguir es favorable establecer un flujo de desarrollo comenzando con la formulación de un problema, pasando por el diseño del modelo conceptual, la obtención de datos, la construcción del modelo, la verificación y validación, el análisis y finalmente la documentación. En primer lugar, para la formulación del problema, se establecen objetivos formales de investigación. En segundo lugar, para el diseño conceptual, se utiliza herramientas visuales que ayuden a definir el flujo de trabajo como diagramas de flujo o redes de Petri. En tercer lugar, para la obtención de datos, se definen los puntos importantes a investigar. En cuarto lugar, para la construcción del modelo, se utiliza lenguaje de programación para poder modelar de manera codificada el comportamiento de la situación en investigación. En quinto lugar, se validan los datos obtenidos con un patrón, este puede ser una investigación previa que haya obtenido datos similares a los buscados en la simulación. En sexto lugar, se analizan todos los datos y las fuentes de comparación, además se busca la participación de terceros como jurados que puedan validar los datos cuantitativos o cualitativos obtenidos. Y finalmente, es importante documentar los resultados para que la investigación pueda ser patrón para simulaciones futuras (Guasch, Piera, Casanova y Pireiras, 2002).

Actualmente se utilizan métodos como el de volúmenes finitos para lograr la discretización de cuerpos sometidos a fluidos bajo condiciones ideales, ya que ayuda a la resolución de flujos reales o fuertemente turbulentos en geometrías complejas. Una de las ventajas de este método

es que considera los principios de conservación (masa, momentum y energía), los cuales son la base de la modelación matemática para la mecánica de fluidos. Otra es que no solo abarca la mecánica de fluidos, sino que también trabaja para formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control. Además, con este método se puede aproximar numéricamente integrales para un análisis de caras con la información de variables nodales.

Es común observar este método para la solución de problemas de CFD, ya que se ha estado superando los paradigmas de soluciones para fluidos turbulentos en los últimos años. Para ello, se utiliza solvers como IcoFoam y SimpleFoam, debido a que con ellos se es más fácil la simulación de situaciones cotidianas donde están presentes fluidos que pueden ser turbulentos como es el ejemplo del caso Elbow o Cavity. Sin embargo, al estar modelados para situaciones ideales, la confiabilidad de la relación entre estas simulaciones y casos de la vida real se ve reducida, como es el ejemplo del flujo sanguíneo, el cual es diferente dependiendo de cada persona y condición.

En el presente informe se detallan ejemplo de simulaciones para flujos definidos, siguiendo los principios anteriormente expuestos.

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 velocidades está constituido por una distribución continua de una magnitud vectorial que define la velocidad del fluido en cada punto de él, y en cada instante de tiempo. Por ello, es una función continua de las coordenadas espacio-temporales. Cada partícula del fluido puede identificarse por la posición que ocupa en el espacio y por el instante de tiempo en el cual se encuentra, de forma que cuando se describe el campo de velocidades de un fluido se describe el valor de la velocidad para cada una de estas partículas, definiendo estas partículas a partir de su posición en x, y, z y el instante dado de tiempo t en el que se encuentran (White, 2008). Así, la función del campo de presiones sería la siguiente:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(x, y, z, t)$$

Que tendrá las componentes rectangulares correspondientes:

$$V_x = V_x(x, y, z, t)$$

$$V_y = V_y(x, y, z, t)$$

$$V_z = V_z(x, y, z, t)$$

- Campos de presiones

El campo de presiones está constituido por una distribución continua de una magnitud vectorial que define la presión en cada punto del fluido y en cada instante de tiempo. Por ello, es una función continua de las coordenadas espacio-temporales. Cada partícula del fluido puede identificarse por la posición que ocupa en el espacio y por el instante de tiempo en el cual se encuentra, de forma que cuando se describe el campo de presiones de un fluido se describe el valor de la presión sobre cada una de estas partículas, definiendo estas partículas a partir de su posición en x , y , z y el instante dado de tiempo t en el que se encuentran (White, 2008). Así, la función del campo de presiones sería la siguiente:

$$P = P(x, y, z, t)$$

Que tendrá las componentes rectangulares correspondientes:

$$P_x = P_x(x, y, z, t)$$

$$P_y = P_y(x, y, z, t)$$

$$P_z = P_z(x, y, z, t)$$

- Líneas de corriente

Las líneas de corriente son líneas que indican la dirección de un fluido en movimiento en los diversos puntos de su flujo. La curva trazada al dibujar una línea de corriente debe ser tangente al vector velocidad local instantáneo, de forma que las curvas obtenidas son las envolventes del campo de velocidades. Las líneas de corriente solo pueden observarse de forma experimental si el flujo es estacionario, pues en este caso coinciden con las líneas de trayectoria y las líneas de traza (Cengel et al, 2006).

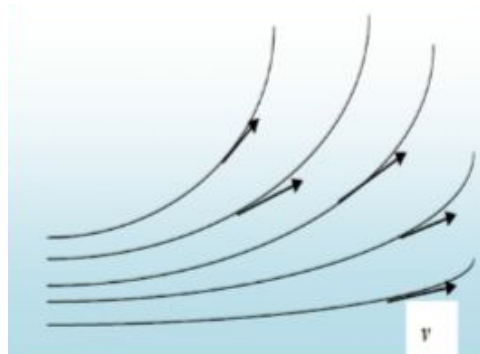


Fig 1. Líneas de corriente, en las cuales cada punto es tangente al vector velocidad local instantáneo

- Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales en la DFC determinan el estado de las variables fluidas en el instante en el que $t=0$, o en el primer paso del esquema de integración. Cuanto más cercanas sean las condiciones iniciales a la solución final del problema, menor será el tiempo necesario para la convergencia (Fernández, 2012).

- Condiciones de borde

Las condiciones de borde se necesitan para obtener una solución de DFC exacta ya que estas determinan el tipo de flujo que se va a modelar. En general, las condiciones de borde pueden clasificarse en condiciones de borde de pared, que modelan el comportamiento del flujo en las proximidades de la superficie (como fijando en cero la componente de la velocidad tangencial a una superficie sólida en reposo debido a la condición de no deslizamiento), o en condiciones de borde de flujo libre, que pueden ser de entrada, salida, o entrada/salida y se especifican mediante las condiciones en el infinito (Cengel et al, 2006).

- Estabilidad Numérica

La estabilidad numérica es una propiedad de los algoritmos numéricos. 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 de forma que el algoritmo es inmune al efecto acumulativo de los errores de las aproximaciones. En otras palabras, si los errores debido a las aproximaciones son todos pequeños, el error que se acumulara al operar con el algoritmo también será pequeño. En un método inestable, cualquier error en el procesamiento se magnifica conforme el cálculo procede. Métodos inestables generan rápidamente anomalías y son inútiles para el procesamiento numérico (Fernández, 2012).

- Convergencia

La convergencia es la unión en un solo punto de varias líneas o trayectorias. En la DFC, una vez que se ha generado la malla se pasa a la configuración de la física del modelo, de las condiciones de borde y del solver. Luego se resuelve el sistema de ecuaciones a través de un proceso iterativo, hasta la convergencia, es decir, cuando la variación de

los resultados entre dos iteraciones consecutivas queda dentro de los límites en un criterio establecido por el usuario (Fernandez, 2012).

- Discretización numérica

La discretización es la aproximación de una variable continua en una cantidad finita de puntos. Los métodos de discretización más difundidos en la Dinámica de Fluidos Computacional son el método de las diferencias finitas, el método de los elementos finitos y el método de los volúmenes finitos, siendo este último el más utilizado. Con esos métodos, se discretiza el flujo continuo, o en otras palabras, se discretizan las variables de campo, aproximándolas en una cantidad finita de puntos llamados nodos. También se discretizan las ecuaciones de movimiento pues se aproximan en función de los valores de los nodos (Fernández, 2012).

- Malla computacional

Cuando se quiere generar una solución de dinámica de fluidos computacional, el primer paso es generar una malla que defina las celdas en las que se van a calcular las variables de flujo como velocidad o presión.

Existen mallas estructuradas y mallas no estructuradas. Las mallas estructuradas constan de celdas que pueden ser en 2D, planas con cuatro lados, o en 3D, volumétricas y con seis caras. Cada celda se identifica de acuerdo con los índices i, j, k (que no necesariamente corresponden a las coordenadas x, y y z). Al construir la malla, se especifican nodos en cada dirección i, j, k de la malla, de forma que el espacio entre cada nodo es un intervalo que es numerado por la computadora, de forma que las celdas pueden ser identificadas dependiendo del intervalo en el que se encuentren a lo largo de los diferentes ejes. Una malla no estructurada, por otro lado, consta de celdas de varias formas, que a diferencia de la malla estructurada, no pueden identificarse de manera única mediante los índices i y j . Por ende, las celdas se enumeran internamente de alguna otra manera por el paquete de la DFC (Cengel et al, 2006).

b. Tipos de flujo; definición y caracterización:

- Flujo laminar

Un flujo se caracteriza como laminar cuando su movimiento es intensamente ordenado, manteniendo una forma geométrica fija durante todo su recorrido. Se llama "laminar" porque el movimiento de este tipo de flujo se da en capas, o láminas, que se mueven de forma uniforme una junto a otra. Los fluidos que presentan viscosidad elevada suelen tener un flujo laminar pues tienen una alta adherencia interna, de forma que es más fácil

que sus partículas se muevan de forma uniforme. Se puede caracterizar un flujo como laminar si su número de Reynolds, hallado con la fórmula presentada en la figura 2, está por debajo de 2000 (White, 2008).

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Fig 2. Formula para hallar el número de Reynolds, siendo Re el número de Reynolds, que es adimensional, ρ la densidad del fluido en kg/m^3 , V la velocidad del flujo en m/s , L el diámetro hidráulico en m, y μ la viscosidad en $\text{Pa}\cdot\text{s}$

- Flujo turbulento

Un flujo turbulento es aquel que presenta un movimiento intensamente desordenado y caótico, que suele darse a altas velocidades y en el cual es común la fluctuación de velocidades. Los fluidos que presentan una baja viscosidad suelen tener un flujo turbulento pues tienen una baja adherencia interna, de forma que es más difícil que sus partículas se muevan de forma uniforme. Se puede caracterizar un flujo como laminar si su número de Reynolds, hallado con la fórmula presentada en la figura 2, está por encima de 4000 (White, 2008).

- Flujo incompresible

Un flujo se caracteriza como incompresible si su densidad se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo su recorrido. Esto significa que el volumen de un fluido que tiene un flujo incompresible también será constante.

Los líquidos son típicamente caracterizados como incompresibles pues sus densidades muestran variaciones despreciables cuando son sometidos a grandes incrementos de presión. Por ejemplo, la densidad del agua líquida varía solamente en 1% cuando es sometida a un incremento de presión de 210 Atm a 1 Atm. Por el contrario, los gases suelen ser altamente compresibles, mostrando grandes variaciones en su densidad al ser sometidos a pequeños incrementos de presión. Por ejemplo, la densidad del aire atmosférico varía en 1% cuando es sometida a un incremento de presión de tan solo 0.01 Atm. Sin embargo, los gases pueden modelarse como flujos incompresibles haciendo ciertas aproximaciones que dependen de su número de Mach, que se halla dividiendo la velocidad de su flujo entre la velocidad del sonido. Usualmente, estas aproximaciones son factibles si la variación en la densidad del gas es menor del 5%, lo cual suele suceder cuando el número de Mach del fluido está por debajo de 0.3 - es decir, cuando la velocidad del flujo está por debajo de alrededor de 100 m/s (Cengel et al, 2006).

- Flujo transitorio

Un flujo se caracteriza como transitorio cuando sus propiedades están todavía en desarrollo y aún no se han estabilizado. Por ejemplo, cuando se dispara un cohete, este puede acabar estabilizándose para operar de forma estacionaria pero inicialmente sus propiedades serán transitorias; el flujo puede acelerar, la presión empezará a variar, etc (White, 2008).

- Flujo estacionario

Un flujo estacionario es aquel en el que en todos los puntos del flujo, no hay cambio con el tiempo. De esta forma, en un punto fijo del fluido, se mantendrá siempre la misma velocidad, presión, etc. Esto es distinto de un flujo uniforme, en el cual la velocidad de todas las partículas es la misma. En un flujo estacionario las propiedades del fluido pueden cambiar de punto a punto, pero en cualquier punto fijo permanecen inalteradas. Para analizar un fluido es importante determinar si se pueden despreciar sus características no-estacionarias (como las vibraciones inducidas por el fluido o las fluctuaciones en la presión) y considerar solo las propiedades del campo total de flujo. Las condiciones de flujo estacionario pueden lograr aproximarse en equipos cuyo propósito es la operación continua, como las turbinas, las bombas, las calderas, los condensadores y los intercambiadores de calor de las plantas generadoras de energía o de los sistemas de refrigeración (White, 2008).

c. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

- Ecuación de energía

La primera ley de la termodinámica declara que la energía no puede ser creada ni destruida; solo puede ser transformada. Por ejemplo, la energía química almacenada en una manzana se convierte en energía cinética cuando los seres humanos la digerimos y la utilizamos para movernos. En un sistema cerrado, el contenido de energía se puede cambiar por medio de dos mecanismos; la transferencia de calor Q y la transferencia de trabajo W . Por ende, la conservación de la energía para una cantidad fija de masa puede expresarse en la forma de razón como:

$$\dot{Q}_{\text{ent neta}} + \dot{W}_{\text{ent neta}} = \frac{dE_{\text{sist}}}{dt}$$

Donde dE_{sist}/dt es la razón de cambio del contenido total de energía del sistema. El punto colocado arriba representa la razón de cambio respecto al tiempo. La energía total E de los sistemas compresibles simples consiste solo en su energía interna u , su

energía potencial ep y su energía cinética ec , y se expresa en términos de la unidad de la masa como

$$E = u + ep + ec$$

(Cengel et al, 2006)

- Ecuación general de transporte

La ecuación general del transporte de Reynolds se define de la siguiente manera:

$$\frac{dB_{sist}}{dt} = \int_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\rho b) dV + \int_{SC} \rho b \vec{V} \cdot \vec{n} dA$$

Siendo B una propiedad cualquiera como masa, energía, momento, etc. Por ende, el primer término, a la izquierda de la igualdad, es la razón de cambio de la propiedad B en un sistema respecto del tiempo t . Esto es igual a la suma de los otros dos términos. Al costado derecho de la igualdad tenemos el primer término, que determina la razón de cambio de la propiedad B dentro del volumen de control VC por medio de integración, donde ρ es la densidad del fluido, b es la propiedad B pero por unidad de masa y dV es el volumen diferencial. En el segundo término tenemos al flujo neto de la propiedad B hacia fuera de la superficie de control del fluido, donde ρ es la densidad del fluido, b es la propiedad B pero por unidad de masa, V es la velocidad, dA es un área superficial diferencial y n es su vector normal unitario (Cengel et al, 2006).

- Ecuación de la conservación de la masa

La ecuación de la conservación de la masa define la razón de cambio de la masa en un volumen de control como la cantidad de masa que entra al volumen de control menos la cantidad de masa que sale de él, como vemos en la siguiente ecuación.

$$\frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \sum_{sal} \int_A \rho V_n dA - \sum_{ent} \int_A \rho V_n dA = 0$$

El primera término define la razón de cambio respecto del tiempo de la masa en un volumen de control, ya que ρ es la densidad del fluido y dV es el volumen diferencial, de forma que si integramos este producto a través de todo el volumen de control tendríamos la masa total dentro de ese volumen. En los siguientes términos V es el volumen y dA es un área diferencial, de forma que en los términos restantes se está sumando la masa contenida en una cierta cantidad de área transversal del volumen de control cuando esta entra o sale de este (Cengel et al, 2006).

- Ecuación de la cantidad de movimiento

El momento lineal o la cantidad de movimiento es una magnitud que se utiliza en dinámica para caracterizar los cuerpos, relacionando su masa y su velocidad. Se define como el producto de la masa y de la velocidad del cuerpo, o $m\vec{v}$. Por ende, si consideramos que para un cuerpo rígido de masa m , la segunda Ley de Newton se expresa como:

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{d(m\vec{V})}{dt}$$

donde F es la fuerza neta que actúa sobre el cuerpo y a es la aceleración de ese cuerpo bajo la influencia de F , podemos darnos cuenta de que la fuerza neta que actúa sobre un cuerpo es también la razón de cambio de su momento lineal, o cantidad de movimiento. Por lo tanto, en la mecánica de fluidos suele hacerse referencia a la segunda Ley de Newton como la ecuación del momento lineal. De esta forma, vemos que la cantidad de movimiento de un cuerpo se mantiene constante, o se conserva, cuando la fuerza neta que actúa sobre él es 0.

Sin embargo, el teorema del transporte de Reynolds visto anteriormente proporciona las herramientas necesarias para pasar de la formulación de sistema a la de volumen de control. Si se hace $b = V$ y por ende $B = mV$, el teorema del transporte de Reynolds puede expresarse para la cantidad de movimiento como:

$$\sum \vec{F} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho \vec{V} dV + \int_{SC} \rho \vec{V} (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

Que puede ser interpretado de la siguiente manera: la suma de todas las fuerzas que actúan sobre el volumen de control es igual a la razón de cambio de la cantidad de movimiento en el volumen de control respecto del tiempo más el flujo neto de la cantidad de movimiento hacia fuera de la superficie de control (Cengel et al, 2006).

d. Teoría de la capa límite

La capa límite de un fluido es la capa del fluido en movimiento cuya velocidad es perturbada por estar en contacto con un sólido. Así, la capa límite es aquella en la que la velocidad del fluido varía de 0 a 99% de la velocidad de la corriente no perturbada. En otras palabras, el perfil de velocidad en la capa límite satisface la condición de no deslizamiento en la pared, y emerge suavemente hasta la velocidad de corriente libre en el borde de la capa. El espesor de la capa límite en la zona del borde de ataque o de llegada es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. La teoría de la capa límite establece que para un fluido en movimiento, todas las

pérdidas por fricción tienen lugar en la capa límite que ya definimos, y que el flujo exterior a dicha capa puede considerarse como carente de viscosidad (White, 2008).

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

La ecuación de Navier-Stokes consiste en un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido newtoniano. La formulación integral de esta ecuación se obtiene aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido. Luego, se manipula el resultado aplicando la ley de la viscosidad de Newton, que declara que el esfuerzo cortante es igual al producto de la viscosidad del fluido y el gradiente de la velocidad, para obtener la formulación diferencial de la ecuación. Esta forma final de la ecuación es la siguiente:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V}$$

Donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad, t es el tiempo, P es la presión normal, μ es la viscosidad y g es la aceleración de la gravedad. Generalmente la ecuación en esta formulación es más útil para la resolución de problemas en la mecánica de fluidos. Esta es útil en problemas en los que se desea hallar las cuatro incógnitas de la ecuación de Navier-Stokes, siendo estas las tres componentes de velocidad (pues la velocidad en la ecuación está representada como vector) y la presión. Esto se puede representar en 3 ecuaciones:

Componente x de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + w\frac{\partial u}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)$$

Componente y de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)$$

Componente z de la ecuación de Navier-Stokes de flujo incompresible:

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial x} + v\frac{\partial w}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)$$

Siendo u , v y w las componentes en x , y y z respectivamente de la velocidad. Sin embargo, como sólo hay 3 ecuaciones, y tenemos cuatro incógnitas, para la resolución de problemas se

hace uso de una cuarta ecuación: la ecuación de continuidad para un flujo incompresible, que vemos a continuación (Cengel et al, 2006).

Ecuación de continuidad de flujo incompresible:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

IV. RECURSOS

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

- Materiales: Geometría y malla del tutorial de OpenFOAM
- Equipos: Computadora de escritorio o laptop
 - Se utilizó una laptop HP intel 7th Gen
- Instrumentos o herramientas: OpenFOAM con solvers IcoFoam y SimpleFoam

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
```

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

- 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.

a) AirFoil2D

- Se utilizó un tiempo de simulación de 300 segundos.
- Los puntos críticos a estudiar son el instante en que el fluido entra en contacto con el cuerpo, y los segundos más próximos a este suceso; ya que, en estos puntos se evidencian el mayor valor de presión y el mayor valor de velocidad.

- Presión: Como se muestra en la imagen, existe un incremento de presión en la zona inferior del cuerpo al cual se ha sometido el flujo de aire. Por el contrario, se evidencia una cantidad reducida de presión en la parte superior del cuerpo. Estos dos fenómenos, suceden en parte por la dirección del fluido, se puede apreciar que no tiene una trayectoria horizontal.

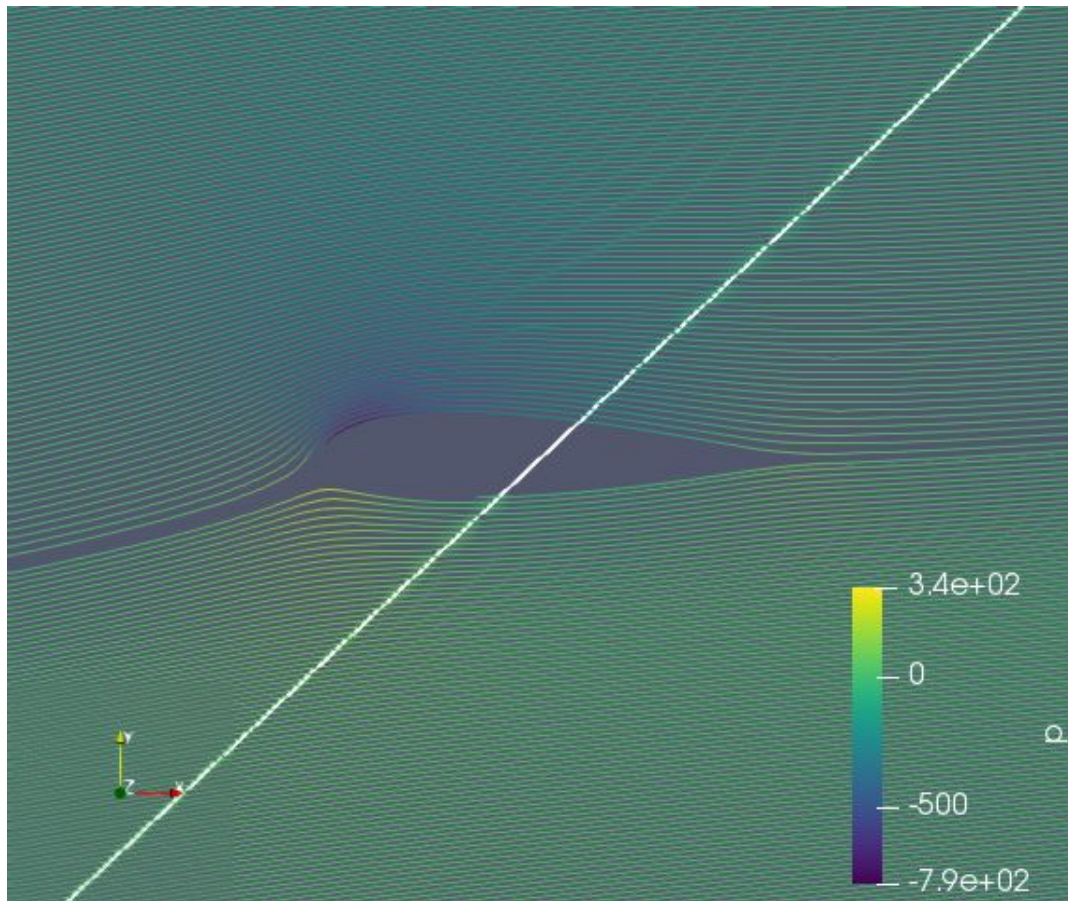


Figura 1. Simulación de presión del caso AirFoil2D.

- Velocidad: Se aprecia el mayor valor de velocidad en la parte superior del cuerpo al cual se ha sometido en el fluido, este instante de tiempo está incluido entre los primeros segundos de la simulación. La velocidad máxima alcanzada en este punto es 46 m/s.

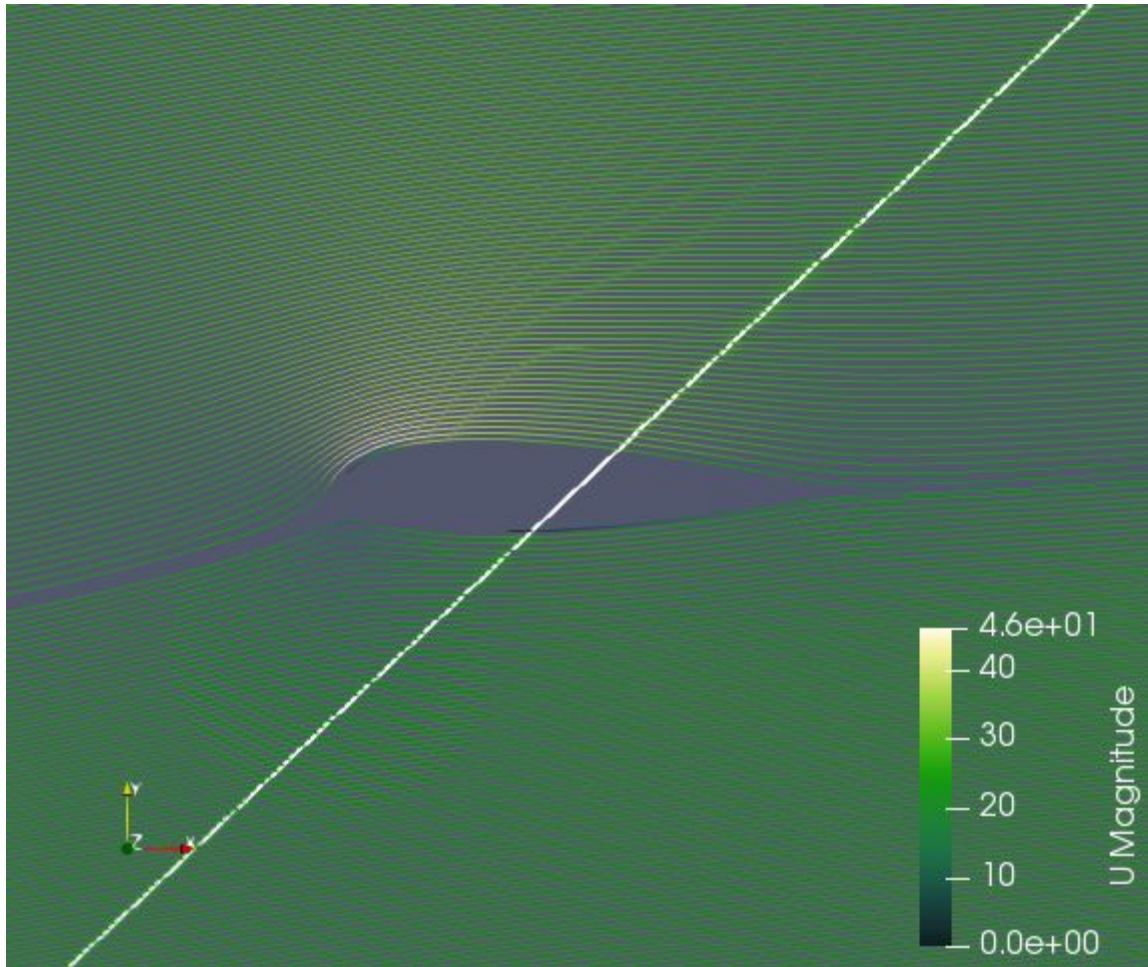


Figura 2. Simulación de velocidad del caso AirFoil2D.

b) ELBOW

- Se hicieron dos simulaciones, la primera simulación se realizó con un rango de tiempo de 10 segundos y la segunda con un rango de 75 segundos para poder observar el desplazamiento del flujo a lo largo del espacio diseñado para este caso.
- El punto crítico a estudiar en esta simulación es la intersección entre el canal principal y el apéndice, donde el flujo se convierte en turbulento (por el cambio de estructura y por la existencia de un segundo fluido).
- Presión: Se puede observar que el punto una caída de presión en la salida del flujo del canal secundario (con un radio menor y en posición vertical) al canal principal.

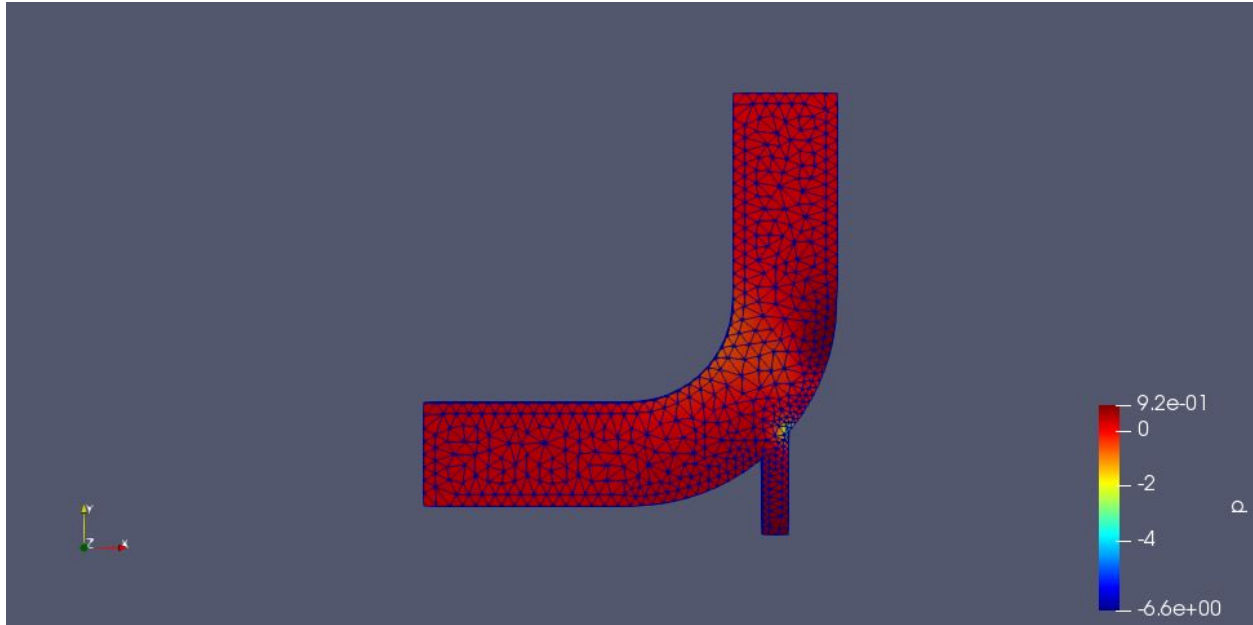


Figura 3. Simulación de presión del caso Elbow.

-Velocidad: Se observa en la imagen una reducción de velocidad a la salida del flujo del canal secundario. En este punto, el flujo pasa de laminar a turbulento por el cambio de estructura del contenedor.

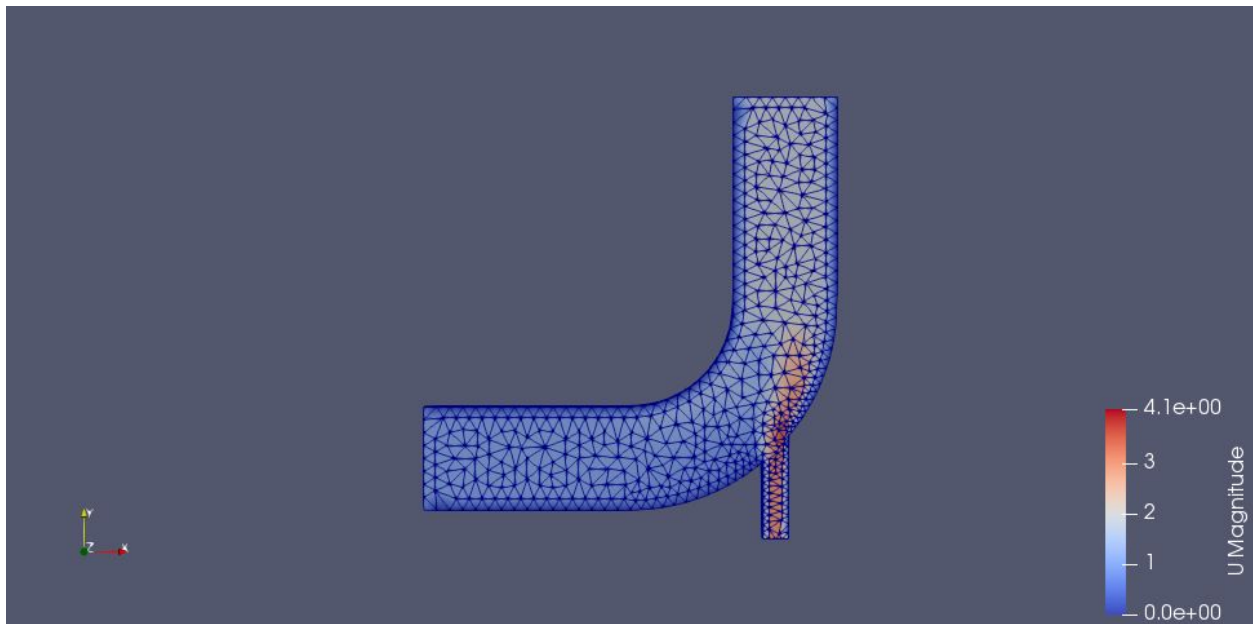


Figura 4. Simulación de velocidad del caso Elbow.

c) CAVITY:

- Se realizaron dos simulaciones. La primera con un rango de tiempo de 0.5 segundos, y la segunda con un rango de 20 segundos.

- Se observa un mallado más amigable que las anteriores simulaciones, por ser de geometría rectangular.
- Presión: Si bien en las dos simulaciones se utilizaron diferentes rango de tiempo para la simulación, se puede observar que la mayor presión se encuentra en la esquina superior derecha, mientras que la menor presión se encuentra en la esquina superior izquierda.

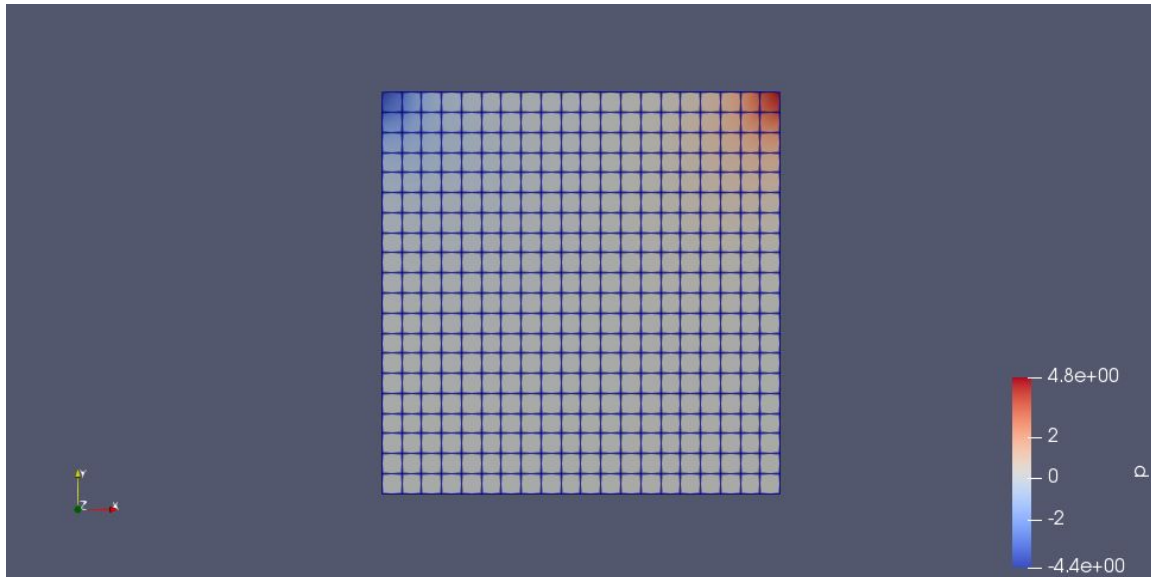


Figura 5. Simulación de presión del caso Cavity para rango de 0-0.5 segundos.

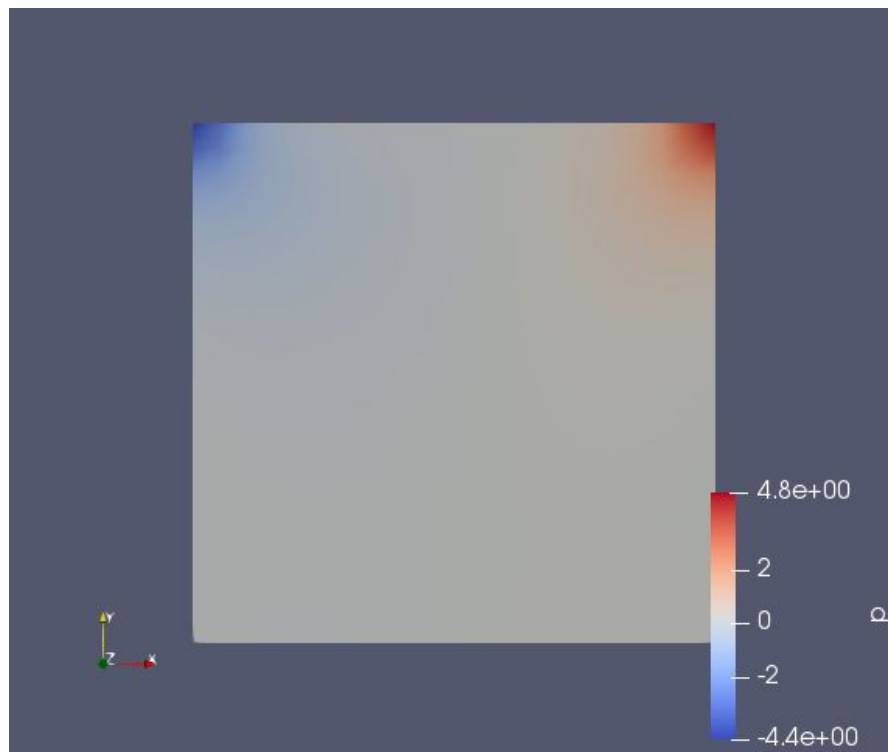


Figura 5. Simulación de presión del caso Cavity para rango de 0-20 segundos.

- Velocidad: Se puede apreciar una caída de velocidades a medida que se incrementa el tiempo de simulación, es decir el mientras que el la parte superior del cuerpo posee el fluido con una velocidad de 1m/s, la base del cuerpo no posee flujo con aparente velocidad.

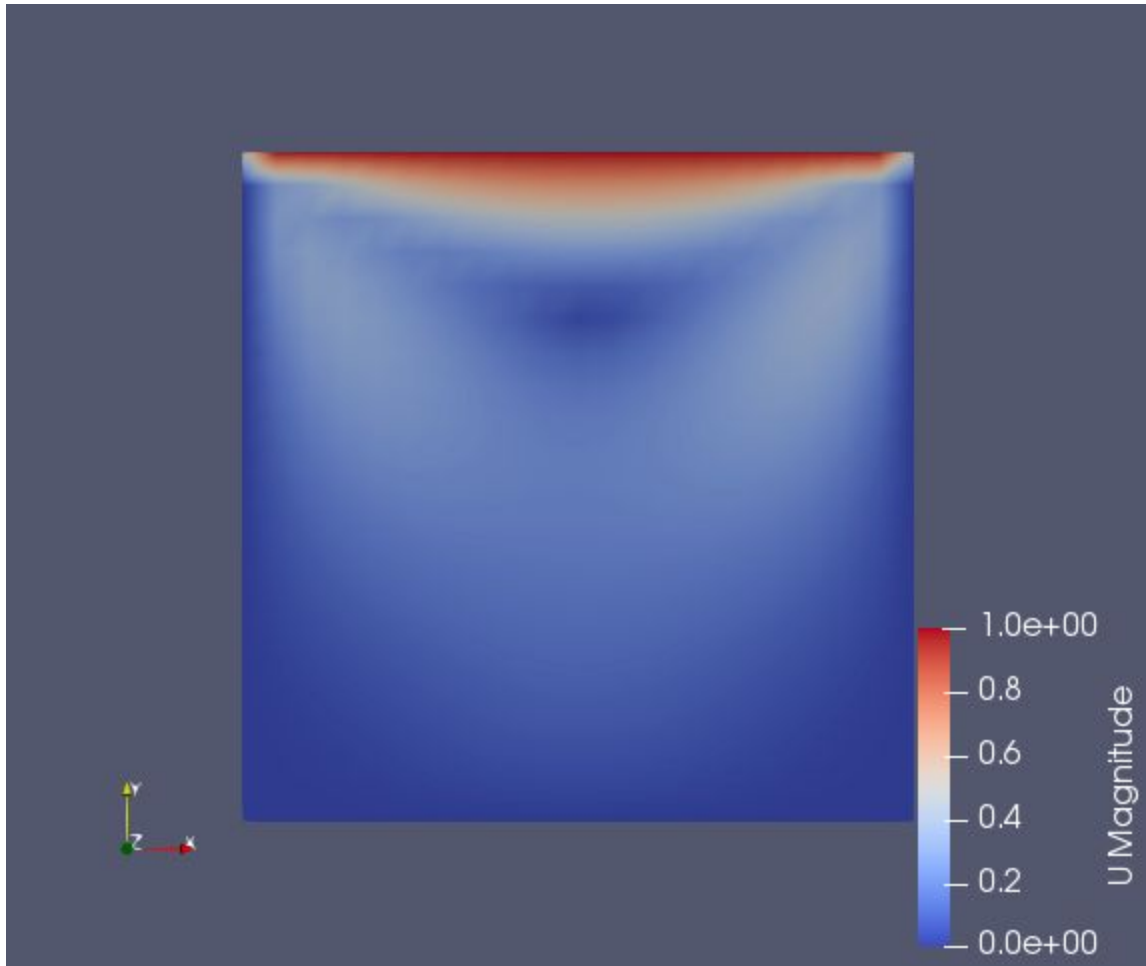


Figura 6. Simulación de velocidad del caso Cavity para rango de 0-0.5 segundos.

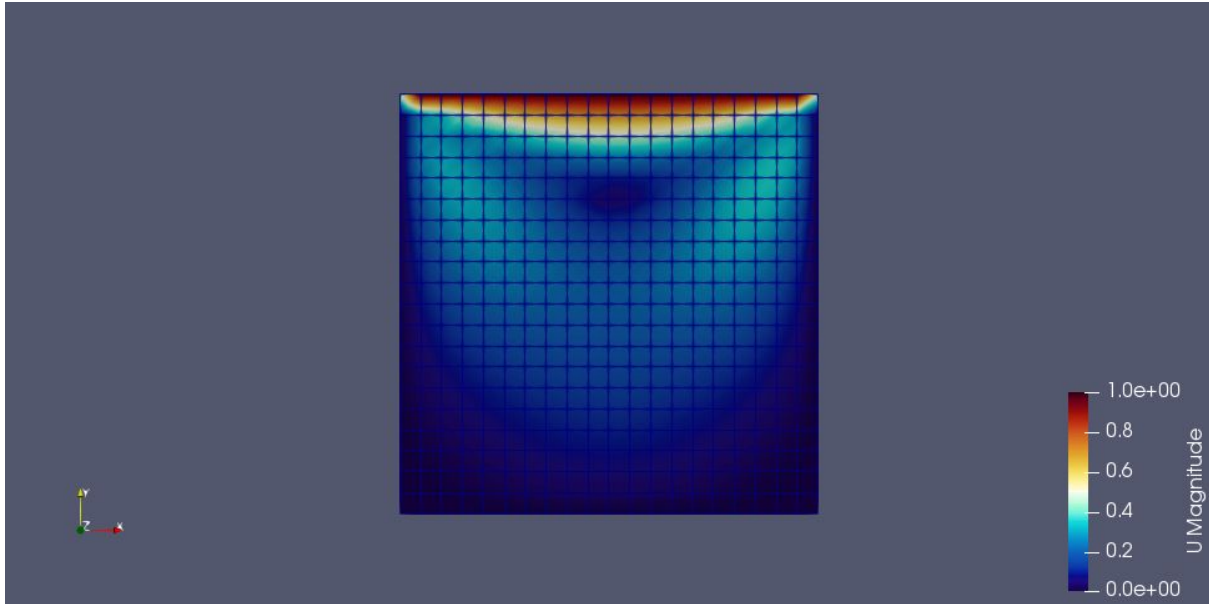


Figura 7. Simulación de velocidad del caso Cavity para rango de 0-20 segundos.

Como se considera un flujo laminar, isotérmico, incompresible con un movimiento de tapa (es decir, que tres de las paredes están estáticas), se comprende que solo exista cambios de presión y velocidad en esta zona, por lo que los puntos a estudiar serán los que se encuentren en esta superficie.

- Comente las dificultades que se le presentaron en el desarrollo de la práctica.

- Surgieron dificultades en la parte operativa de la simulación debido al código para paraFoam en los tres casos, ya que el código proporcionado solo es capaz de mostrar una gráfica adecuada para el caso de Cavity. Para los otros dos casos se utilizó:

a) Elbow:

- \$ fluentMeshToFoam elbow.msh

b) AirFoil2D

- \$ simpleFoam

- En el caso de Cavity y Elbow, se cambiaron los valores iniciales de velocidad a 4 m/s, sin embargo, como sólo se mostraron las gráficas de los instantes finales, no se pudo evidenciar el avance de fluido de manera visual.

VII. CONCLUSIONES

- Modelo Cavity:

- La cantidad de velocidad o presión no sufrirá un cambio evidente al aumentar el rango de tiempo de simulación, lo que significa que llega al límite inferior de velocidad (0 m/s) en aproximadamente 0.5 segundos conforme el fluido se acerca a la base del contenedor.
- En el flujo laminar, isotérmico, incompresible graficado en este caso, la presión inicial se encontrará en la parte superior izquierda que es el comienzo del movimiento del flujo.

- Modelo Elbow:

- El flujo laminar se convierte en turbulento a la salida del canal secundario por el cambio de geometría del contenedor, ya que el flujo sale a un espacio más amplio.
- El cambio de velocidades se da en el punto de salida del flujo del canal secundario al canal principal debido al cambio del radio del mismo.
- La existencia de un segundo fluido en el canal principal influye en la reducción de velocidad del primer flujo.

- Modelo Airfoi2d

- El aumento y disminución de presión se encuentran en los puntos donde el fluido hace contacto con el cuerpo en los primeros instantes de simulación.
- La velocidad máxima se encuentra en la parte superior del cuerpo contrario al valor de presión máxima que se encuentra en la parte inferior del cuerpo.

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.

- El ejemplo más cercano a la simulación de Elbow son los bypass de venas y arterias coronarias, las cuales tienen un flujo sanguíneo establecido que debe ser constante para poder llegar con la fuerza necesaria para producir la sístole y diástole. Por ello, aplicando la simulación se podría saber con qué velocidad llegaría el nuevo flujo introducido en la vena. Además, se puede saber las presiones internas de las venas para poder prevenir arterioesclerosis coronarias.

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

- Debido a que definimos el caudal como el producto de la velocidad por el área transversal de la sección. Ambos, la velocidad y el diámetro de la sección son inversamente proporcionales, es decir que, por principio de conservación de masa a medida que el área se incrementa (y por tanto el diámetro de la sección), la velocidad es menor para mantener el valor de caudal.

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

- Los puntos a estudiar son aquellos en los que se encuentran el mayor y menor valor de velocidad y presión para todas las simulaciones mostradas, ya que es en estos puntos donde se encuentra la información más importante para tomar decisiones. Para el caso de Elbow, el punto crítico se encuentra en la intersección de los canales principal y secundario, debido a que es en este punto donde los fluidos se encuentran y mezclan convirtiendo el flujo laminar en turbulento. En caso, de cavity los puntos son los extremos superiores, ya que la tapa origina el movimiento del fluido en esta superficie. Y en el caso de Airfoil2D, los puntos críticos serán aquellos donde el fluido entra en contacto con el cuerpo.

d. ¿Qué es la cavitación y cuando ocurre?

- Se define cavitación como la explosión de burbujas de vapor, este proceso sucede dentro de un recipiente en puntos específicos de formación donde la presión es menor a la presión del flujo del medio o la presión atmosférica, esto crea un vacío y el líquido se transforma en vapor.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). Mecanica de Fluidos. McGraw-Hill Interamericana, Mexico, D.F.
- Fernandez, J. M. (2012). Tecnicas Numericas en Ingenieria de Fluidos. Reverté, Barcelona.
- Guasch, Piera, Casanova y Pireiras (2002). Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- iAgua (2020). ¿Qué es la cavitación? ¿Cómo evitarla?. Disponible en: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/que-es-cavitacion-como-evitarla>
- Blog ESSS. El método de volúmenes finitos. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>

- OpenFoam User Guide – Version 7. Disponible en:
<http://foam.sourceforge.net/docs/Guides-a4/OpenFOAMUserGuide-A4.pdf>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). An introduction to computational fluid dynamics. Finite Volume Method, Essex, Longman Scientific & Technical.
- White, F. M. (2008). Mecanica de Fluidos. McGraw-Hill, Nueva York: Resources Publications.
- Xiaofeng Liu. Computational Methods for Environmental Flows (Ph.D., P.E. Assistant Professor Department of Civil and Environmental Engineering Pennsylvania State University
xliu@engr.psu.edu → Curso de la Pen State University
<https://github.com/psu-efd/PSU-OpenFOAM-Course-Notes> OpenFOAM lecture notes at Penn State University by Xiaofeng Liu, Ph.D., P.E.