 <p>UNIVERSIDAD PERUANA CAYETANO HEREDIA</p>	<p>FACULTAD DE CIENCIAS Y FILOSOFÍA DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE INGENIERÍA</p> <p>CARRERA DE INGENIERÍA BIOMÉDICA MECÁNICA Y TRANSPORTE DE FLUIDOS</p>
<p>Nombres y apellidos (Código):</p>	<p>Fiorella Pierina Laura Hoyos (72022424) Jesús Francisco Paucar Escalante (72158060)</p>

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

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es el área de conocimiento sobre la simulación numérica de flujos fluidos, originada a partir de la mecánica de los fluidos y cálculo numérico [1]. Sus elementos principales son la discretización del flujo continuo, es decir, las variables de campo que se aproximan por un número finito de valores en puntos llamados nodos. Además, las ecuaciones de movimiento también se discretizan en función de los valores en los nodos. Finalmente, el sistema de ecuaciones algebraicas se resuelven y se obtienen los valores de las variables en todos los nodos. El método más usado para la discretización de las ecuaciones es el de volúmenes finitos. Su ventaja principal es que la discretización espacial se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema, por lo que no hay problemas con la transformación entre sistemas de coordenadas, como ocurre en el método de diferencias finitas. Es un método más flexible pues se puede implementar tanto en mallas estructuradas como no estructuradas [2]. Además, tienen ventajas con el uso de la memoria y la velocidad de la solución, especialmente para problemas complejos [3].

Un proceso de simulación completo se basa en tres etapas: pre-procesamiento, solución de las ecuaciones y post-procesamiento. En la primera se definen la geometría, ecuaciones de movimiento, condiciones de borde e iniciales, y el volumen se divide en celdas discretas denominadas mallas. En la segunda se inicia la simulación y las ecuaciones se resuelven mediante solvers. Finalmente, en la última etapa se utiliza un post-procesador para el análisis y la visualización de la solución resultante [4]

El IcoFoam es un solver transitorio para flujo laminar incompresible de fluidos newtonianos basado en el algoritmo no-iterativo PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) para solucionar ecuaciones de Navier-Stokes. Utiliza pasos de tiempo grandes y requiere menos esfuerzo computacional. Mientras que el SimpleFoam es un solver de estado estacionario para flujos turbulentos e incompresibles que usa el algoritmo iterativo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) utilizada para solucionar ecuaciones de Navier-Stokes. [5].

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:

a.1. Campos de velocidades: Son campos de variable vectorial en función al espacio y tiempo dentro de un volumen de control según la descripción Euleriana [6].

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

a.2. Campos de presiones: Son campos de variable escalar en función al espacio y tiempo dentro de un volumen de control según la descripción Euleriana [6].

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

a.3. Líneas de corriente: Son curvas que, en todas partes, son tangentes al vector de velocidad local instantáneo. Son útiles como indicadores de la dirección instantánea del movimiento del fluido en todo el campo del flujo [7].

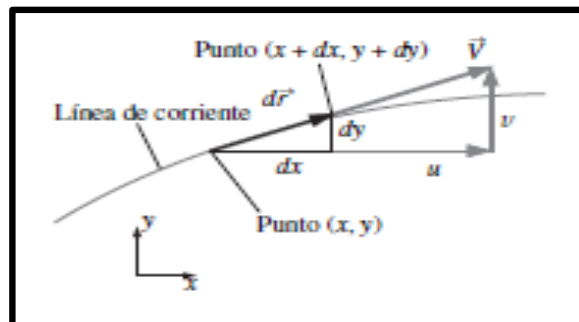


Figura 1. Línea de corriente para un flujo bidimensional [7]

a.4. Condiciones iniciales: Los valores de primera aproximación para las variables de campo de flujo especificadas para cada celda. Son necesarias como un punto de partida, para que el proceso de iteración pueda proceder [6].

a.5. Condiciones de borde: Son cruciales para una solución adecuada. La condición de borde de uso más general es la condición de no-deslizamiento que establece que, para un fluido en contacto con una pared sólida, la velocidad del fluido debe ser igual al de la pared [6].

a.6. Estabilidad numérica: Se les denomina a los algoritmos de dinámica de fluidos computacional, donde según el modelo matemático las iteraciones convergen, se sabe que en las simulaciones habituales, las iteraciones convergen de una manera mucho más lenta, pudiendo incluso divergir siempre y cuando las condiciones son muy exigentes o si los parámetros físicos empleados no son compatibles. Con el propósito de saber si una condición en la simulación va a converger se realiza un análisis de estabilidad, por ello se dice que un

sistema numérico es estable cuando el proceso iterativo converge, mientras que se denomina inestable si diverge. [8]

a.7. Convergencia: Se explica el concepto de convergencia como aquel que se determina si los valores de las variables en los puntos del dominio tienden hacia unos valores fijos mientras que la solución progresa. Entonces se dice que un proceso iterativo es convergente cuando este se ha completado satisfactoriamente y que además esa convergencia es independiente de la malla, siendo esta última condición un poco más restrictiva debido a que debe de garantizarse el desarrollo del modelo matemático. [8]

a.8. Discretización numérica: Aproximación de una variable continua en un número finito de puntos cuya aproximación es más exacta mientras el número finito tiende a ser un número mayor, es decir mientras aumente el número de discretización, la aproximación es más exacta [6].

a.9. Malla computacional: Conocida también como red de nodos, define las celdas en las que se calculan las variables de flujo (velocidad, presión, entre otras) en todo el dominio computacional [6].

b. Tipos de flujo; definición y caracterización:

b.1. Flujo laminar: Estado estable en el que todos los pares de partículas adyacentes del fluido se mueven a lo largo unas de otras formando láminas. Comúnmente presentado en fluidos altamente viscoso, como los aceites a bajas velocidades. Caracterizado por capas no alteradas, a través del número adimensional de Reynolds (Re) para $Re < 2300$ [7].

b.2. Flujo transitorio: El término de transitorio es común aplicarlo en aquellos flujos en desarrollo como por ejemplo cuando un cohete es disparado, se tienen efectos transitorios en el sentido que la presión se desarrolla en el interior del motor haciendo que el flujo acelera hasta que el motor se estabiliza y opera de forma estacionario, es decir el flujo se desarrolla completamente. Caracterizado por un desarrollo no definido y a través del número adimensional de Reynolds (Re) para $2300 < Re < 4000$ [7].

b.3. Flujo turbulento: Movimiento intensamente desordenado de un fluido, que es común en velocidades altas. Caracterizado por fluctuaciones en la velocidad, a través del número adimensional de Reynolds (Re) para $Re > 4000$.

b.4. Flujo incompresible: Un fluido donde su densidad permanece aproximadamente constante a lo largo de todo el flujo. Por otra parte, los gases son intensamente compresibles. La modelación de estos flujos como incompresibles está caracterizado de dos maneras: Los flujos líquidos son incompresibles hasta un nivel alto de exactitud o por el número de Mach (Ma). Con frecuencia, los flujos de gases se pueden aproximar como incompresibles si los cambios en la densidad se encuentran por debajo del 5%, lo cual suele ser el caso cuando $Ma < 0.3$ [7].

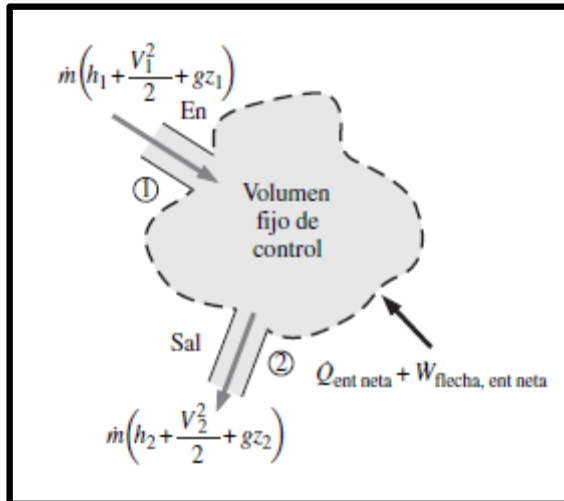
$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{\text{Velocidad del flujo}}{\text{Velocidad del sonido}}$$

b.5. Flujo estacionario: Flujo en el que todas las variables del fluido (velocidad, presión, densidad, temperatura) en todos los puntos fijos del flujo son constantes en el tiempo, pero

que, por lo general varían de un punto a otro. Caracterizado mediante el cálculo de sus derivadas parciales en el tiempo que debe resultar 0 [6].

c. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos

c.1. Ecuación de energía: Para los flujos estacionarios, la razón de cambio respecto al tiempo del contenido de energía del volumen de control es cero, obteniendo la siguiente ecuación:



Modelo de volumen de control con solo una entrada y una salida e interacciones de energía. [7]

Donde la ecuación matemática es:

$$\dot{Q}_{ent\ neta} + \dot{W}_{flecha, ent\ neta} = \sum_{sal} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right) - \sum_{ent} \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

Para flujos incompresibles sin aparatos de trabajo mecánico y con fricción despreciable:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad \text{o} \quad \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} + z = \text{constante}$$

c.2. Ecuación general de transporte:

La ecuación general de transporte nos representa el movimiento dinámico asociado a un fluido en un intervalo de tiempo y que además en este tiempo un punto dentro del fluido se ve afectado en una variación (este término se define como advección), esto tiene que entrar en un equilibrio por difusión y el volumen neto dentro de un volumen de control o sistema.

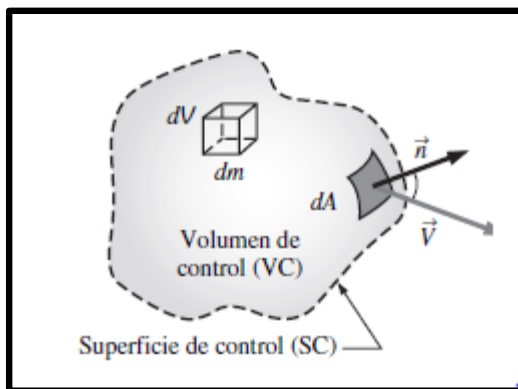
$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{Tiempo}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Advección}} = \underbrace{\oint_A \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{Difusión}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Fuente}}$$

c.3. Ecuación de la conservación de la masa: El principio de la conservación de la masa se puede expresar como “la transferencia neta de masa hacia dentro de un volumen de control, o hacia afuera de este durante un intervalo de tiempo es igual al cambio neto (aumento o disminución) en la masa total que está dentro de este volumen en el transcurso de intervalo de tiempo, podemos representar de manera general como: [7]

$$\left(\text{Masa total que entra} \right) - \left(\text{Masa total que sale} \right) = \left(\text{Cambio neto durante } \Delta t \text{ en la} \right)$$

$$\text{al VC durante } \Delta t \quad \text{del VC durante } \Delta t \quad \text{masa que está dentro del VC}$$

Tomando en cuenta que este equilibrio de masa se puede dar a través de un volumen de control que puede ser sometido a un proceso determinado, se puede definir la ecuación de conservación de la masa como: [7]



Modelo de volumen diferencial de control dV y superficie diferencial de control dA usados para la deducción de la relación de la conservación de la masa. [7]

Donde la ecuación se define como:

$$\text{Conservación general de la masa: } \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho dV + \int_{SC} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = 0$$

Esta ecuación se expresa como la razón de cambio respecto al tiempo de la masa que se encuentra dentro del volumen de control más la razón neta de flujo de masa a través de la superficie de control es igual a cero.

c.4. Ecuación de la cantidad de movimiento: Establece que la cantidad de movimiento de un sistema permanece constante si no hay fuerzas externas que actúen en él.

Utilizando la segunda ley de Newton como base para determinar la ecuación de momentum lineal.

$$F = \frac{d(mv)}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{VC} \rho v dV + \int_{SC} v \rho v dA$$

Se interpreta que la suma vectorial de las fuerzas externas reales aplicadas que actúan sobre un volumen de control, es igual a la tasa temporal de incremento del momentum lineal dentro de un volumen de control más la tasa neta a la cual el momentum está dejando la superficie de control. [6]

d. Teoría de la capa límite:

La teoría de capa límite fue introducida por PRANDTL, que establece que para un fluido en movimiento, todas las pérdidas por fricción tienen lugar en una delgada capa adyacente al contorno del sólido (llamada capa límite), y que el flujo exterior a dicha capa puede considerarse como carente de viscosidad en donde para números altos de Reynolds, los efectos de la viscosidad del fluido y la rotación se confinan en una región relativamente delgada cerca de las superficies sólidas o de las líneas de discontinuidad, tales como las estelas. [9] [10]

La dependencia entre la caracterización de capa límite depende mucho del número de Reynolds donde encontramos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\frac{\delta}{x} &= f_1(R_X) \\ C_F &= \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} = f_2(R_X) \\ \frac{v}{V_\infty} &= f_3(R_X) \\ R_X &= \frac{\rho V_\infty x}{\mu}\end{aligned}$$

Ecuaciones aproximadas según la teoría de capa límite donde haremos consideraciones mediante condiciones de Newton en fluidos tales como la expresión de continuidad, viscosidad, entre otros. Podemos conseguir una ecuación general. [8]

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{d^2 u}{dy^2}$$

Ecuación general de Prandtl de la capa límite. [8] [6]

A partir de esta ecuación se pueden tomar en consideración las condiciones de frontera y la condición del número de Reynolds para un fluido en particular de manera que dichas ecuaciones se pueden reducir a expresiones mucho más específicas. La importancia de estudiar la capa límite es debido a que se analizan las fuerzas mecánicas asociadas a la viscosidad que es una propiedad inherente a un fluido. [9] [10]

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

Las ecuaciones de Navier Stokes contempla dentro de su definición un conjunto de ecuaciones de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido en todo instante de tiempo llegando incluso a poder predecir el movimiento de un

fluido en el futuro mediante dichas ecuaciones, las aplicaciones de estas ecuaciones se han dado para flujos atmosféricos, las corrientes oceánicas, flujos alrededor de vehículos, proyectiles, etc. siempre y cuando el flujo involucrado sea Newtoniano. Las ecuaciones son aplicaciones de conceptos como hidrodinámica y termodinámica a un flujo con volumen controlado. Estas operaciones matemáticas se explican mediante integrales en las ecuaciones, considerando además tales como el esfuerzo tangencial contiene una relación lineal con la gradiente de la velocidad, propuesta por Newton en su teoría de viscosidad. Si bien esta ecuación al ser no lineal muchas veces no posee soluciones exactas para condiciones especiales se puede llegar a una convergencia y por las complicaciones de las ecuaciones se hace uso de modelos matemáticos (matemática computacional) para llegar a aproximaciones de acuerdo a las condiciones ligadas al número de Reynolds y modelo de diferencias finitas (mallado) que usamos. Como por ejemplo de manera real los automóviles, cohetes, entre otros poseen un número de Reynolds alto de manera que los casos son más específicos y se pueden tomar muchas más aproximaciones.

$$(\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P' + \nu \nabla^2 \vec{V}$$

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
- Instrumentos o herramientas: OpenFOAM con solvers IcoFoam y SimpleFoam

V. DESARROLLO

Escriba las instrucciones en la terminal que utilizará para correr los modelos Elbow y Airfoil 2d. Tome como referencia el ejemplo presentado para Cavity.

a. Modelo Cavity

```
$ cd cavity
```

```
$ cd cavity
```

```
$ blockMesh
```

```
$ icoFoam
```

```
$ icoFoam > info
```

```
$ paraFoam
```

b. Modelo Elbow

```
$ cd elbow
```

```
$ fluentMeshToFoam elbow.msh
```

```
$ icoFoam
```

```
$ icoFoam > info
```

```
$ paraFoam
```

c. Modelo Airfoil2D

```
$ cd Airfold2D
```

```
$ simpleFoam
```

```
$paraFoam
```

VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

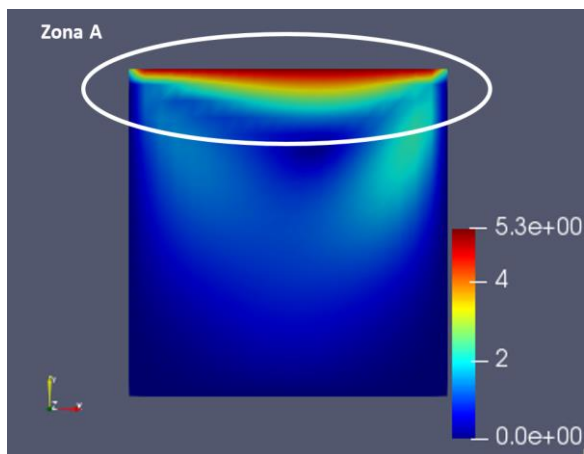


Fig 1. Perfil de velocidad del modelo cavity

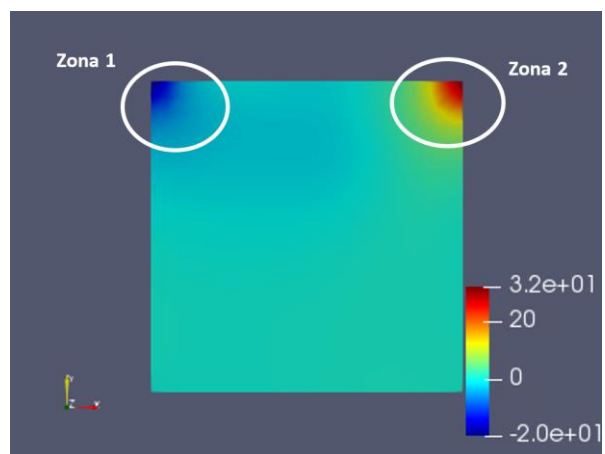


Fig 2. Perfil de presión del modelo cavity

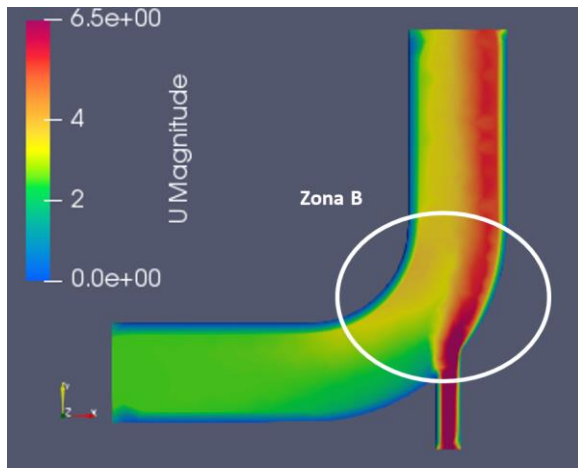


Fig 3. Perfil de velocidad del modelo elbow

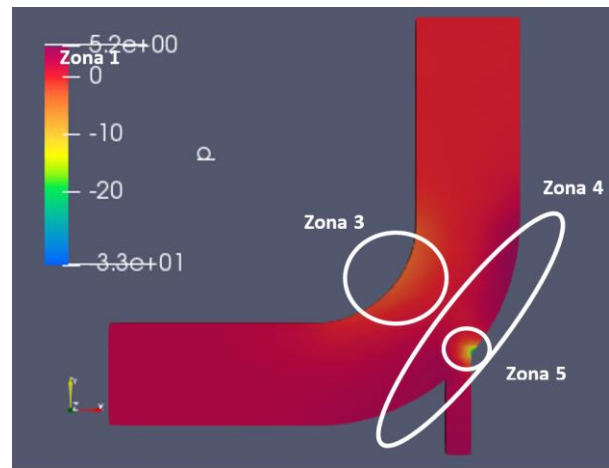


Fig. 4 Perfil de presión del modelo elbow

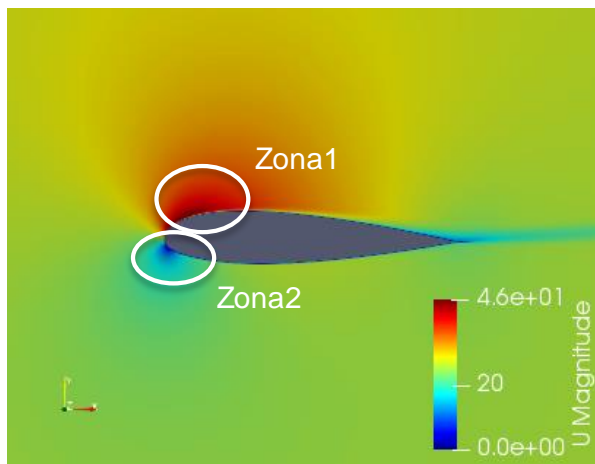


Fig 5. Perfil de velocidad del modelo airfoil2D

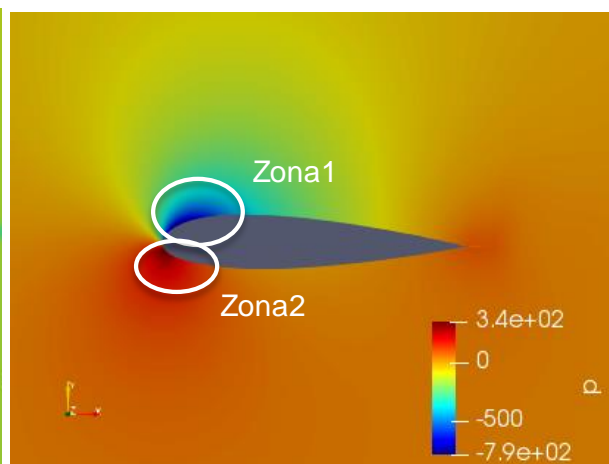


Fig. 6 Perfil de presión del modelo airfoil2D

Modelo	Apreciaciones de campo de velocidad en las zonas críticas	Apreciaciones de campo de presiones en las zonas críticas
Cavity	Se puede apreciar que la mayor velocidad se encuentra en la parte superior de la pared (zona A) con valores entre 4 y 5.3 m/s. Además tiene una sección con movimiento de remolino con velocidad entre 1 y 2 m/s.	El modelo presenta dos zonas críticas en las esquinas de la parte superior de la pared. Se ejerce una presión máxima negativa de -20 Pa en la esquina izquierda (zona 1). Mientras que la esquina derecha (zona 2), una presión máxima positiva de 32 Pa. En la zona restante no se ejerce casi nada de presión comparado con las zonas críticas.

Elbow	<p>Se puede apreciar que se cumple la condición de no deslizamiento en los bordes de la tubería, pues el fluido presenta una velocidad de 0 m/s.</p> <p>Además, observamos la entrada de fluidos mediante dos secciones. A través de la sección de entrada que tiene mayor diámetro, fluyen velocidades alrededor de 2 m/s. Mientras que por la sección de menor diámetro fluyen velocidades alrededor de 6.5 m/s, siendo esta la velocidad máxima del flujo. También se puede apreciar que hay una disminución y cambio de dirección de la velocidad debido a la forma de “codo”(zona B) en cierta zona de la tubería. Finalmente, en la zona donde se intersectan los fluidos, se sigue denotando la diferencia de velocidades y se presenta un flujo turbulento.</p>	<p>Las zonas críticas se presentan alrededor del codo de la tubería. En la parte interior del codo (zona 3), se ejercen presiones negativas de aproximadamente 8 Pa. Mientras que en la zona exterior del codo (zona 4), se ejercen presiones de 5.2 Pa, siendo la máxima positiva. Además, particularmente en la zona 5, se presentan presiones negativas entre 0 y 33 Pa, siendo este último valor la presión máxima negativo.</p>
Airfoil2D	<p>El modelo como tal pertenece a una simulación de vehículo aéreo se observa en que el campo de velocidades mantiene un valor máximo de alrededor de 46 m/s en parte de la superficie superior de la geometría (zona 1), mientras que sobre el resto de la geometría la velocidad varía entre 20 m/s a más y en la superficie inferior de la geometría encontramos una zona de superficie con 0 m/s rodeadas de partículas con 20 m/s aproximadamente en la zona 2. Dentro del volumen de control se nota el desarrollo del fluido con una velocidad superior a 20 m/s que nos indica la naturaleza del desarrollo de flujo en un modelo aerodinámico como es el Airfoil2D.</p>	<p>Para el modelo las zonas críticas son los límites en las superficies encerradas en los círculos, donde podemos observar una presión negativa (alrededor de -790 Pa) en la parte superior de la geometría (zona 1) y una presión positiva por debajo (alrededor de 340 Pa) en la zona 2, esto es consistente al comportamiento que se requiere para generar una fuerza de sustentación que empuja hacia arriba debido a la diferencia de presiones entre las superficies mencionadas en un área definida y que hace posible estabilización de dinámica del fluido sobre la geometría considerada.</p>

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

Presentamos dificultades para la simulación del modelo Airfoil2D, debido a que, inicialmente, no nos habíamos percatado que en la carpeta “constant” del Airfoil2D ya había una carpeta polymesh correspondiente al mallado. Por ello, ya no era necesario colocar el comando \$blockMesh en la terminal, pues si lo colocábamos se eliminaba la carpeta polymesh y nos generaba error. Además, al principio nos simulaba solo hasta el segundo 313, ya que hasta ese tiempo convergía con las condiciones establecidas por defecto. Sin embargo, lo solucionamos modificando el tamaño de intervalos a 10, con un intervalo de tiempo de 0 a 500 segundos, delta T de 2 y de tal manera pudimos apreciar toda la simulación.

VII. CONCLUSIONES

A. Modelo Cavity: Tiene la característica de presentar la velocidad máxima en el borde superior de la pared. Además, el campo de velocidades en forma de remolino en la parte central permite que el flujo siga circulando a través de la pared.

B. Modelo Elbow: Es un modelo que describe la entrada del fluido a través de dos secciones con diferentes tamaños de diámetro. Podemos concluir que se cumple la condición de continuidad, pues en la sección de menor diámetro, ocurre mayor velocidad, y viceversa. Además, el cambio de dirección de las velocidades del flujo y la intersección de ambos fluidos debido a la forma de “codo” genera una disminución de velocidad. Además, se puede observar una pérdida

C. Modelo Airfoil2d: El modelo de Airfoil2d describe un modelo aerodinámico con una geometría específica y un mallado irregular a lo largo de toda su superficie en el volumen de control, el desarrollo del campo de velocidades se ve modelado por la misma forma de mallado como se pudo observar a lo largo de la simulación, esto es casi caótico aunque cabe señalar que del perfil de presiones podemos observar el comportamiento en dos puntos importantes donde se notan los valores positivos en la parte superior mientras que valores negativos en la parte inferior, esto conlleva a un diferencial de presión que hace posible una fuerza de sustentación sobre la geometría consistente con el modelo aerodinámico.

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.

En primer lugar, es importante resaltar que el solver icoFoam es utilizado para flujos laminares incompresibles de fluidos newtonianos. Ejecutaríamos, por ejemplo, una simulación del flujo de la sangre en la arteria carótida con estenosis en el seno de la carótida interna en con icoFoam. Para ello, desarrollaríamos una geometría que consiste en la carótida común con una bifurcación en carótida interna y externa. Luego, procedemos a generar el mallado usando blockMesh y definiendo condiciones iniciales como velocidades y presiones de entrada y salida. Luego ejecutaríamos el solver icoFoam y el post-procesamiento de paraFoam. El área de estenosis sería considerada una zona crítica de análisis, puesto que existe una disminución del diámetro, por lo que la velocidad aumentaría. Además, si la presión aumenta de manera crítica podría causar daños y enfermedades. Una solución a este es el uso de stent, el cual también podríamos incluir en la geometría y verificar que la presión ejercida de este sea la adecuada para las arterias.

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

La velocidad varía inversamente con el cuadrado del diámetro, por lo que una pérdida de velocidad será originada por el aumento del diámetro. Esto se puede deducir a partir de la ecuación de continuidad de un fluido.

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

Los puntos críticos donde conviene estudiar las geometrías son aquellos donde tanto la presión como velocidad llegan a sus valores máximos. Es importante estudiar esas zonas críticas debido a que si este supera un valor crítico, son más susceptibles a sufrir daños estructurales, o pueden producir reflujos indeseados.

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

Es la formación de burbujas de vapor dentro de un líquido que ocurre cuando la dinámica del flujo hace que la presión estática local caiga por debajo de la presión de vapor. Puede causar ruido y vibraciones, desgaste estructural y daños.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Equipo ESSS (2016, Junio 24). Dinámica de Fluidos Computacional: ¿qué es? [Online]. Disponible: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
2. J. Sanchez. Dinámica de Fluidos computacional (CFD) [Online]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>
3. Patankar, Suhas V. (1980). *Transferencia numérica de calor y flujo de fluido*. Hemisphere Publishing Corporation. ISBN 978-0891165224.
4. H K Versteeg and W Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, 2nd. ed. 2007
5. OpenFoam. A.1 Solucionadores estándar [Online]. Disponible: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/standard-solvers.php>
6. Y. Cengel y J. Cimbala. *Fundamentos y Aplicaciones de Mecánica de Fluidos*. Editorial McGraw-Hill, 2006.
7. J. Fernandez. *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos*. Editorial Reverté, 2012.
8. X. Mora. *Las ecuaciones de Navier Stokes*. Universidad de Valencia, 2017 [Online] Disponible: <https://metode.cat/wp-content/uploads/2017/06/93ES-MONO-3-Navier-Stokes.pdf>
9. GILES, Ralnd V. *Mecánica de los Fluidos e Hidraulica*. Libros McGraw-Hill Series de Compendios SHAUM. Bogota. 1969.
10. GERHART, P; GROSS, R Y HOCHSTEIN, J. *Fundamentos de Mecanica de Fluidos*. Addison-Wesley. Segunda Edicion. Mexico. 1995