



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

Nombres y apellidos:	José Alfredo Zapana García Yhanira Selene Medina Amaro
Código:	73090113 73583596

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

OpenFOAM (por "Open-source Field Operation And Manipulation") es un toolbox escrito en C++ con el fin de lograr soluciones de problemas de mecánica continua, entre los que destaca la dinámica de fluidos computacional (CFD), por medio del desarrollo de solvers numéricos personalizados, y herramientas de pre/post procesamiento. Para poder lograr hacer una simulación en el software tienes que pasar por 3 etapas principales: 1. Preprocesamiento, donde generas la estructura del mallado, geometría del sistema, límites, condiciones iniciales y las propiedades físicas del fluido(s) que vas a analizar, 2. Ejecución de la aplicación por medio del solver (IcoFoam y SimpleFoam para este informe) y 3. Post-procesamiento, punto en donde visualizas tu modelo en ParaFoam y realizas coloración de las superficies para poder observar los recortes de planos, contornos y gráficos vectoriales. Existen ventajas de hacer discretización con volúmenes finitos en modelos de CFD, entre estos se encuentra una mayor eficiencia computacional por medio de optimización de código y disminución de tiempo requerido para resolución del sistema, a partir de esta optimización de código es donde se generan menos requisitos de memoria en la computadora que usa el software y también existe una disminución de la complejidad geométrica intrínseca en el mallado de la aplicación. En este informe se hizo uso de 2 solvers específicos, los cuales son IcoFoam y SimpleFoam, cada uno de estos tienen aplicaciones específicas. IcoFoam resuelve las ecuaciones incompresibles laminares de Navier-Stokes usando el algoritmo PISO. El código es intrínsecamente transitorio, requiere una condición inicial (como la velocidad cero) y condiciones de límite bien establecidos, dentro de sus restricciones, dentro de sus restricciones o limitaciones se encuentra el hecho de no poder resolver sistemas con fluidos turbulentos o compresibles, de sistemas de transferencia de calor, flotabilidad, entre otros; es decir,

tiene aplicaciones muy específicas a fluidos incompresibles transitorios. SimpleFoam es un solver de estado estacionario para flujos incompresibles y turbulentos, usa el algoritmo SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). De igual manera que el solver IcoFoam tiene muchas restricciones para poder resolver sistemas de ecuaciones con otros tipos de fluidos tanto incompresibles como compresibles, tampoco puede hacer resolución de sistema de transferencia de calor, flotabilidad, sistemas multifase, entre otros. Se pudo observar que estos solvers son bien simples en su complejidad computacional o están diseñados para aplicaciones específicas en usuario de nivel introductorio.

## 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  
Es la representación vectorial de la velocidad de un fluido con respecto a su posición y el tiempo, el método usado es el método Euleriano ya que es más preciso para las mediciones de fluidos ya que considera los 3 ejes coordenados y la posición.
- Campos de presión.  
Es la representación vectorial de la presión de un fluido con respecto a su posición y el tiempo, el método usado es el método Euleriano ya que es más preciso para las mediciones de fluidos ya que considera los 3 ejes coordenados y la posición.
- Líneas de corriente  
Es una línea curva que, en todas partes, es tangente al vector de velocidad local instantánea. Las líneas de corriente no se pueden conocer experimentalmente, excepto en condición de flujo estacionario en los cuales coinciden con las líneas de trayectoria y las líneas de traza.
- Condiciones iniciales.  
Son los valores vectoriales de presión y velocidades en el tiempo 0 del análisis. Estas condiciones determinan el comportamiento del fluido en todo el tiempo.
- Condiciones de borde  
Las ecuaciones tienen un rol importante en las aplicaciones físicas. Las ecuaciones que gobiernan las características físicas, como presión y velocidad, están definidas por ecuaciones diferenciales parciales. Para calcular estas ecuaciones es necesario conocer datos iniciales, como el campo de velocidades en el campo de los fluidos. Estos datos son conocidos como condiciones de contorno o borde. Por esta condición la velocidad en el punto de contacto del fluido y la pared es 0.
- Estabilidad numérica

La estabilidad numérica es una propiedad de los algoritmos numéricos que describe cómo los errores de entrada se propagan a través del algoritmo. En un método estable, los errores se atenúan mediante la computación. Por otro lado, inestable el error puede generar anomalías invalidando el procesamiento numérico.

- **Convergencia**

Sucesión de sumas parciales que tiene un límite en el espacio considerado. La convergencia del cálculo (simulaciones) es la suma de series finitas numéricas o vectoriales y tienden a una solución.

- **Discretización numérica**

La discretización numérica es el proceso de transferir funciones continuas, modelos, variables y ecuaciones a una serie de valores discretos. Vectores y matrices. Es importante para la evaluación numérica y la implementación y procesamiento computacional. Mientras más valores discretos se puedan rescatar de las funciones continuas, mejor y más cercano a la señal analógica; sin embargo, demandará más recursos en el procesamiento.

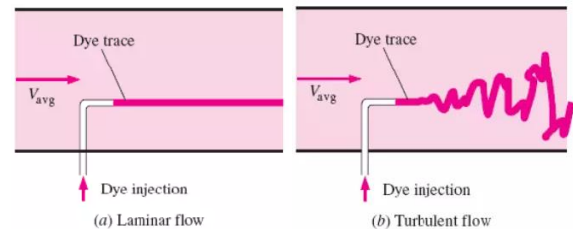
- **Malla computacional:**

Una malla es una representación de un dominio geométrico más grande representado por celdas discretas más pequeñas. Las mallas se utilizan comúnmente para calcular soluciones de ecuaciones diferenciales parciales y representar gráficos por computadora, y para analizar datos geográficos y cartográficos. Una malla divide el espacio en elementos (o celdas o zonas) sobre los que se pueden resolver las ecuaciones, lo que luego se aproxima a la solución sobre el dominio mayor.

## **b. Tipos de flujo: definición y caracterización:**

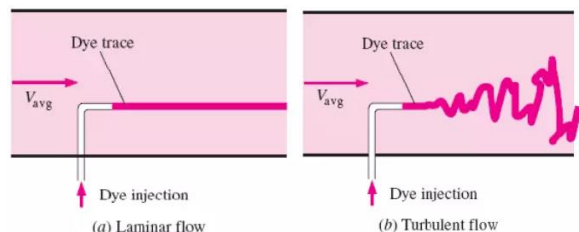
- **Flujo laminar:**

El flujo laminar del fluido puede definirse como el flujo del fluido en el que no hay distorsión y las capas de los fluidos no se cruzan entre sí. En el flujo laminar, la velocidad del fluido permanece constante. El flujo laminar puede ser estimado por el número de Reynolds, que es una cantidad adimensional.



- **Flujo turbulento:**

En la dinámica de fluidos, el flujo turbulento se caracteriza por el movimiento irregular o "caótico" de las partículas del fluido. En contraste con el flujo laminar, el fluido no fluye en capas paralelas, la mezcla lateral es muy alta, y hay una interrupción entre las capas. La turbulencia también se caracteriza por la recirculación, los remolinos y la aleatoriedad aparente. En el flujo turbulento la velocidad del fluido en un punto está continuamente experimentando cambios tanto en magnitud como en dirección.



- **Flujo incompresible**  
Es aquel donde las consideraciones termodinámicas y geométricas no cambian la densidad del fluido. Es decir, la densidad es constante a lo largo del tiempo y el flujo, a pesar de todas las diferencias en el medio. Por lo tanto, el volumen de todas las porciones del fluido permanece inalteradas sobre todo el curso de este.
- **Flujo transitorio**  
Es cuando la velocidad  $v$  en un punto dado no es constante en el tiempo. Las partículas que pasen por ese punto tendrán velocidades diferentes.
- **Flujo estacionario**  
Es cuando la velocidad  $v$  en un punto dado es constante en el tiempo. Todas las partículas que pasen por ese punto lo harán con la misma velocidad y la trayectoria de una partícula del fluido corresponde a una línea de corriente que es tangente en cada punto al vector velocidad.

### c. Ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos:

- **Ecuación de energía:**  
La ecuación de energía representa la razón de acumulación de energía en un volumen control (Vc), expresada en la sumatoria de razón de energía transferida a través del mismo Vc, la razón de trabajo realizado en el Vc y la razón de producción de energía a lo largo del Vc. La energía debe conservarse, para cumplir con las reglas físicas. Esta es expresada en funciones de la temperatura, flujo, trabajo, densidad y velocidad.

$$\rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T + \dot{Q}_p + \dot{W}$$

Donde  $\rho$  es densidad,  $C_p$  es capacidad calorífica a presión constante,  $T$  es temperatura,  $V$  es velocidad,  $k$  es la conductividad térmica,  $W$  es la tasa de otro trabajo en el sistema después de restar el trabajo para el flujo de fluido y  $Q_p$  es la sumación de la tasa de producción de calor y disipación viscosa.

- **Ecuación general de transporte:**  
Esta ecuación describe la evolución de cierta cantidad dada por  $\phi$ ,  $\phi$  puede ser cualquier cantidad de interés en un fluido transportado.

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

Donde  $\frac{\partial\phi}{\partial t}$  es la tasa de crecimiento en el tiempo de  $\phi$ ,  $\vec{u}$  es el vector de velocidad,  $\nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi)$  es el término de difusión que tiene una constante de proporcionalidad  $\Gamma_\phi$  dada por gama y  $S_\phi$  es la fuente de  $\phi$ .

- **Ecuación de la conservación de la masa:**  
Representa la conservación de masa a lo largo de todo un volumen control. Es decir, expresa la razón de masa acumulada en el VC, denotado como la diferencia el flujo de masa que ingresa al VC, y del que sale. Donde ambos deben ser de igual magnitud, para que la conservación se cumpla. Entonces, la ecuación denota la variación de la densidad a lo largo del tiempo, así como la variación de la velocidad en este.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1.32)$$

where  $\rho$  is density,  $t$  is time and  $\mathbf{V}$  is fluid velocity. The term  $(\rho \mathbf{V})$  is the mass flux through the control volume. Eq. (1.32) is called the continuity equation.

- Ecuación de la cantidad de movimiento:  
Se obtiene por las leyes fundamentales de la física clásica. El principio denota que el momento total de un sistema cerrado no cambiará a menos que una fuerza externa actúe sobre él.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \rho \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{g} \quad (1.34)$$

Donde  $\rho$  es densidad,  $t$  es tiempo,  $\mathbf{V}$  es velocidad del fluido,  $P$  es la presión normal en las superficies del fluido y  $\mathbf{g}$  es gravedad.

#### d. Teoría de la capa límite

Una capa límite es una región delgada adyacente a la superficie sólida de una pared en contacto con una corriente en movimiento en la que la velocidad del flujo varía de cero en la pared hasta  $U_e$  en el límite que corresponde a la velocidad de la corriente libre. El grosor del desplazamiento  $\delta$  depende del número de Reynolds, que es la proporción de fuerzas inerciales (resistentes al cambio o al movimiento) a viscosas (pesado y pegajoso) fuerzas y viene dado por la ecuación: el número de Reynolds ( $Re$ ) es igual a la velocidad ( $V$ ) multiplicado por la densidad ( $\rho$ ) multiplicado por una longitud característica ( $l$ ) dividida por el coeficiente de viscosidad ( $\mu$ ).

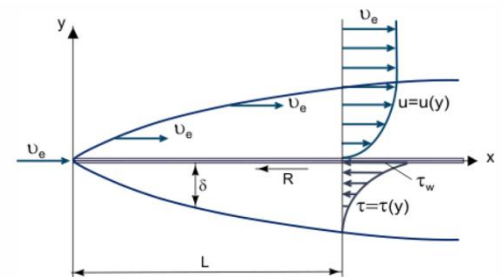


Figure 1. Growth of a boundary layer on a flat plate.

$$Re = V * \rho * l / \mu$$

Para los números de Reynolds más bajos, la capa límite es laminar y la velocidad de la corriente cambia uniformemente a medida que uno se aleja de la pared. Para números de Reynolds más altos, la capa límite es turbulenta y la velocidad de la corriente se caracteriza por flujos de remolino inestables dentro de la capa límite.

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

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento tridimensional de fluidos viscosos. Consisten en una ecuación de continuidad dependiente del tiempo para la conservación de la masa, tres ecuaciones de conservación del momento dependientes del tiempo y una ecuación de conservación de la energía dependiente del tiempo. Hay cuatro variables independientes en el problema, las coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$  y  $z$  de algún dominio, y el tiempo  $t$ .

Continuity Equation

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Momentum Equations

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

$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right]$   
 Total derivative =  $\frac{D}{Dt}$   
 Change of velocity with time (for  $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}$ ) and Convective term (for  $(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$ )

Pressure gradient: Fluid flows in the direction of largest change in pressure.  
 Body force term: External forces, that act on the fluid (gravitational force or electromagnetic).  
 Diffusion term: For a Newtonian fluid, viscosity operates as a diffusion of momentum.

#### 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 utilizaría para correr los modelos Elbow y Airfol2d. Tome como referencia el ejemplo presentado para Cavity.

##### a. Modelo Cavity

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

##### b. Modelo Elbow

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

##### c. Modelo Airfol2d

```
$ cd airfoil2d
$ simpleFoam
$ paraFoam
```

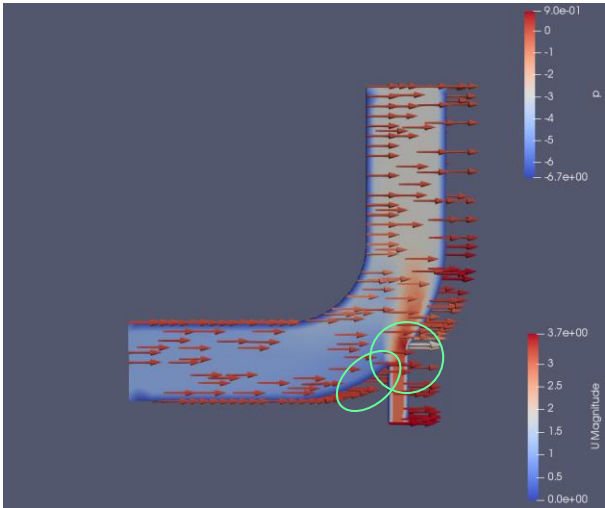
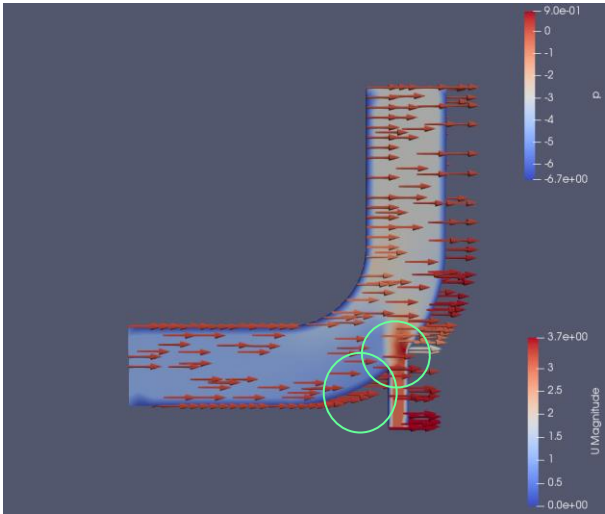
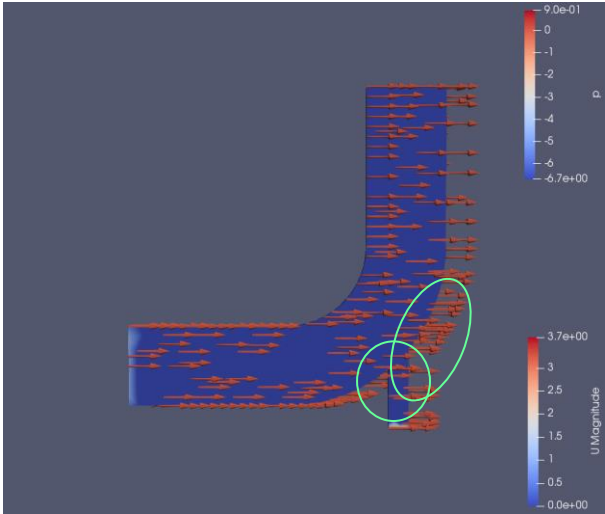
#### VI. RESULTADOS Y DISCUSIONES

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

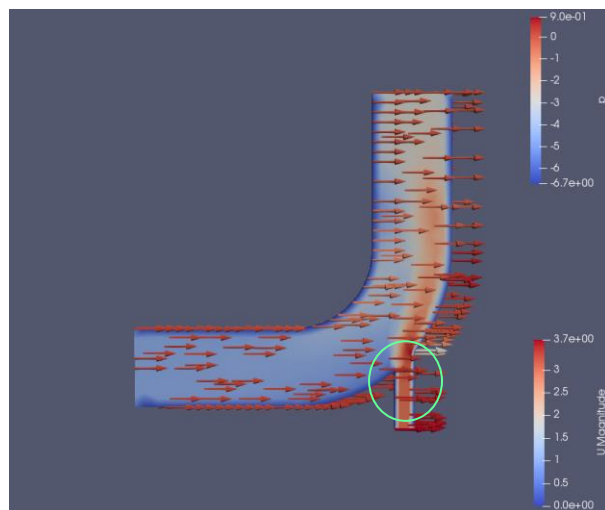
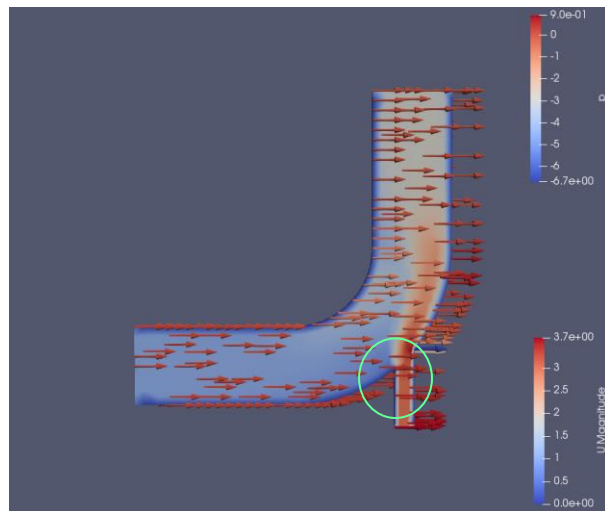
##### Elbow

##### **Elbow No Modificado**

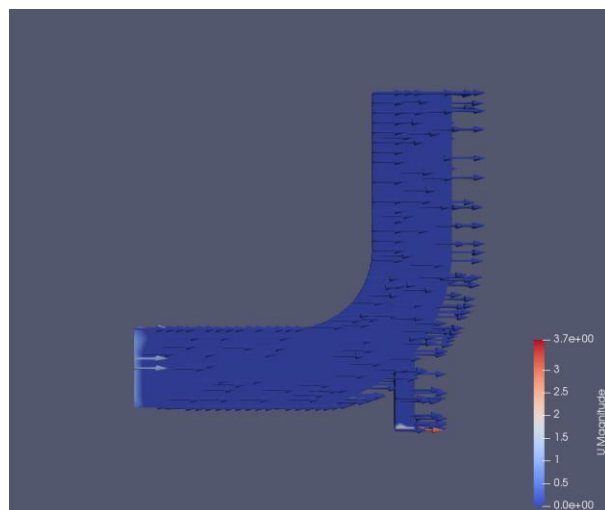
Campos Vectoriales de Presión



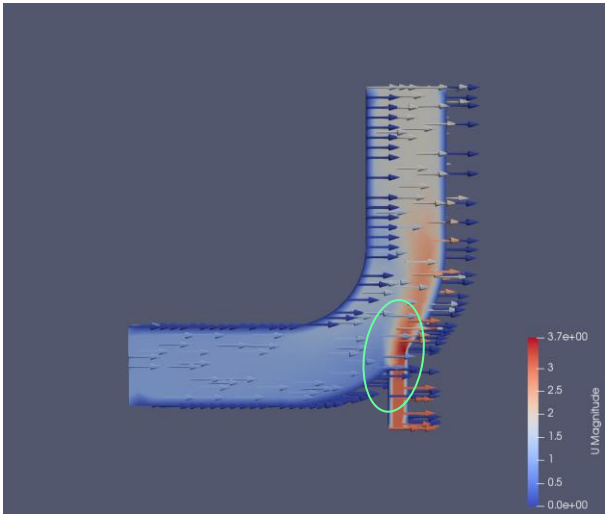
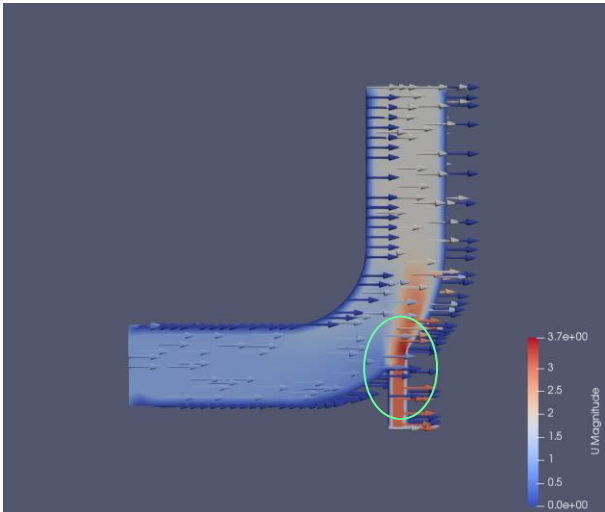
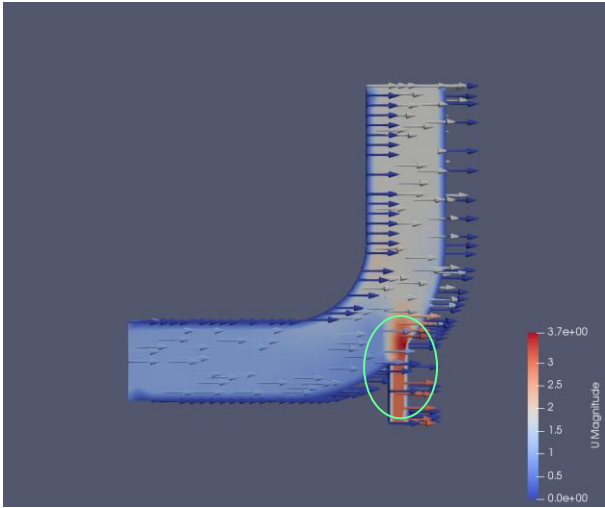


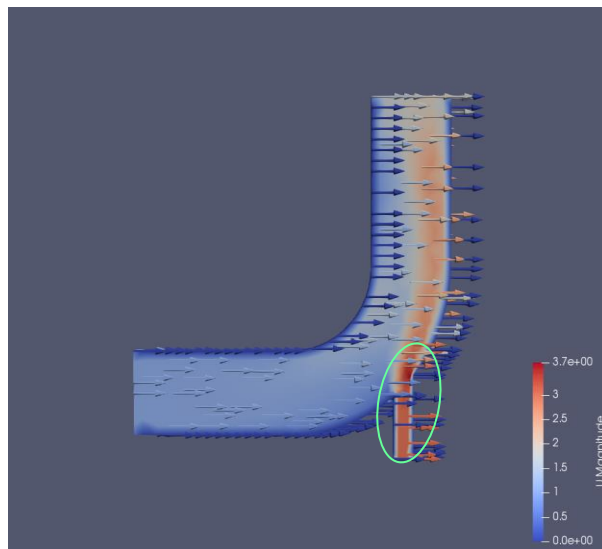
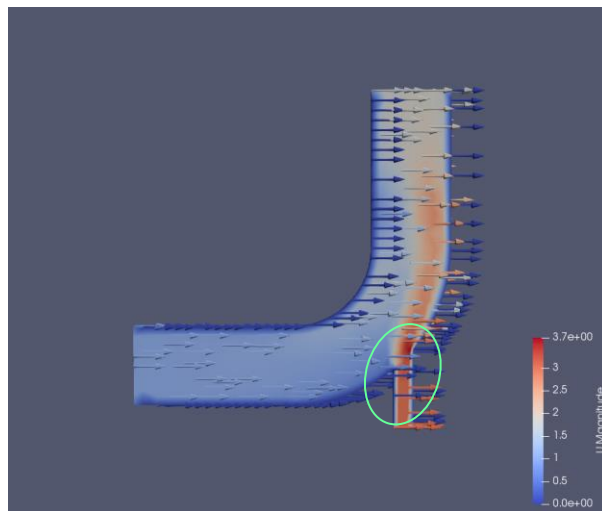


## Campos Vectoriales de Velocidad





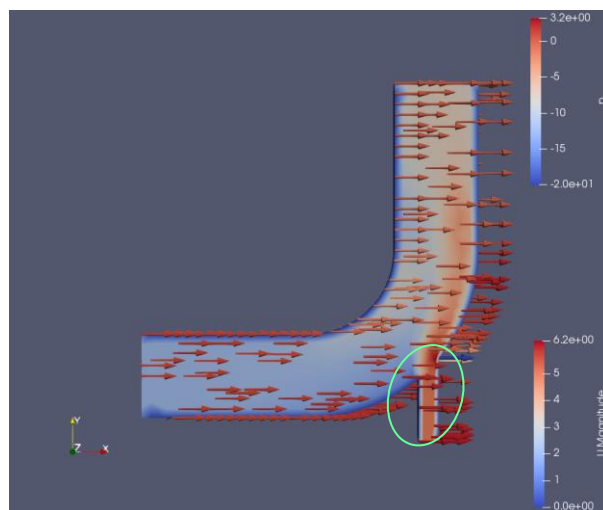
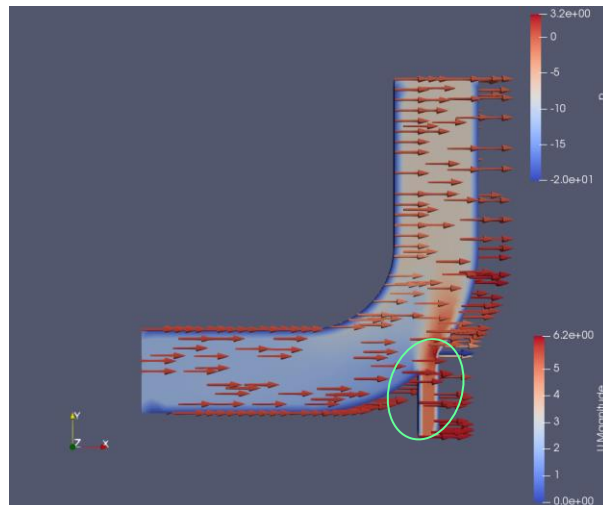
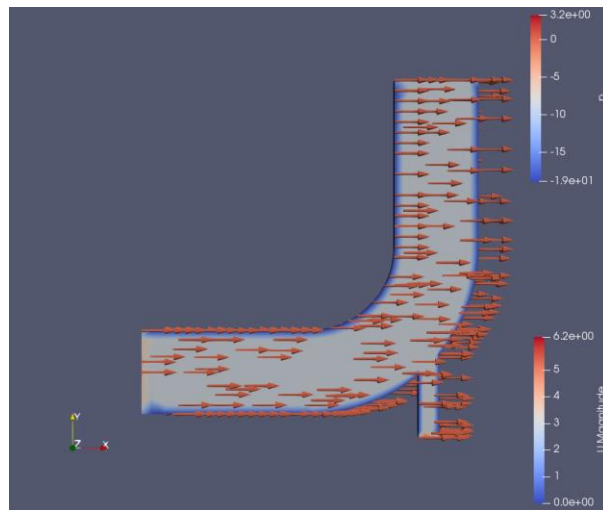


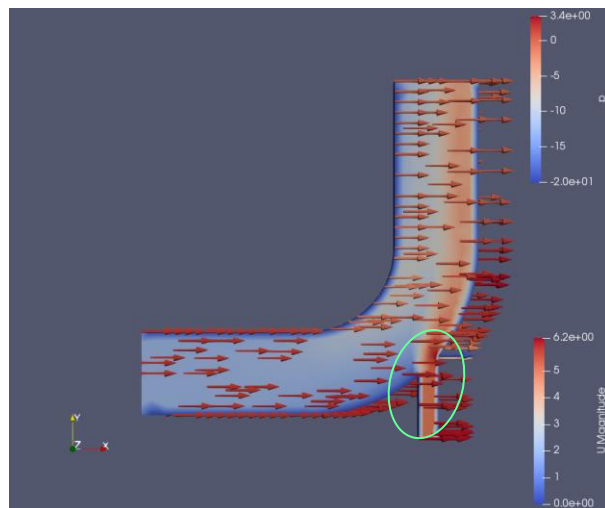
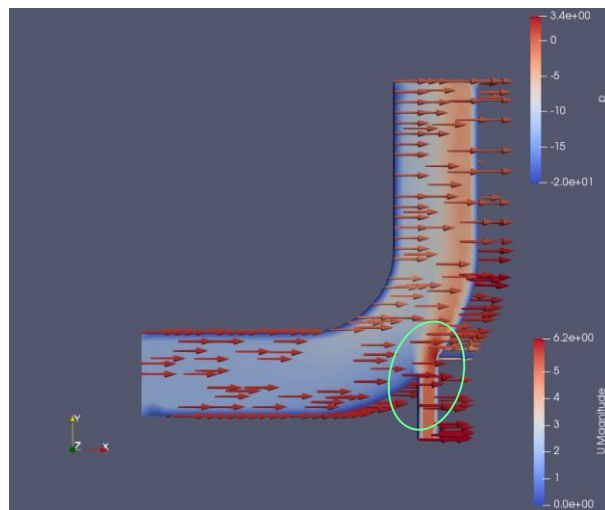
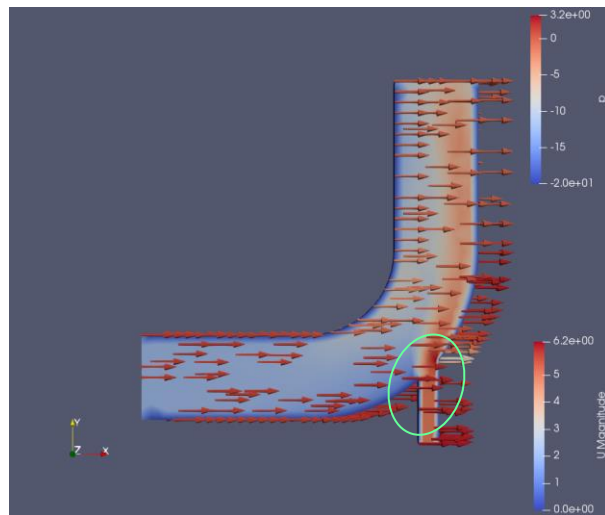


En el caso de Elbow con las condiciones predeterminadas de OpenFoam se puede observar que la zonas críticas del sistema se encuentran en el vértice de origen del fluido, en la intersección entre ambas tuberías y en la esquina donde cambia la orientación de la tubería (inclinada a horizontal). Esto se comprueba por como los campos vectoriales con sus magnitudes correspondientes son mayor en estos sitios. La presión es idéntica a lo largo de la tubería una vez que el fluido ya entró a la parte principal del sistema. A partir de los campos vectoriales de velocidad se pudo determinar la ubicación del punto crítico con mayor magnitud, este se encuentra en la intersección de la tubería pequeña y la tubería principal. Esto se debe al cambio de diámetro que se haya entre estas dos tuberías. Como el flujo es laminar se pudo observar que los campos vectoriales de velocidad sí son 0 en los bordes de la tubería, reafirmando lo leído en teoría.

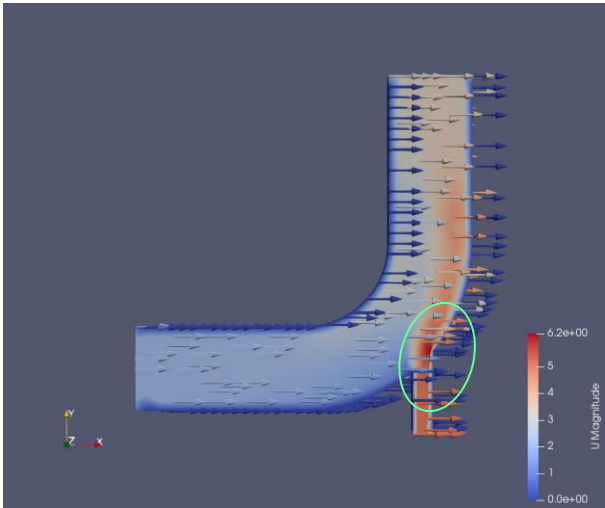
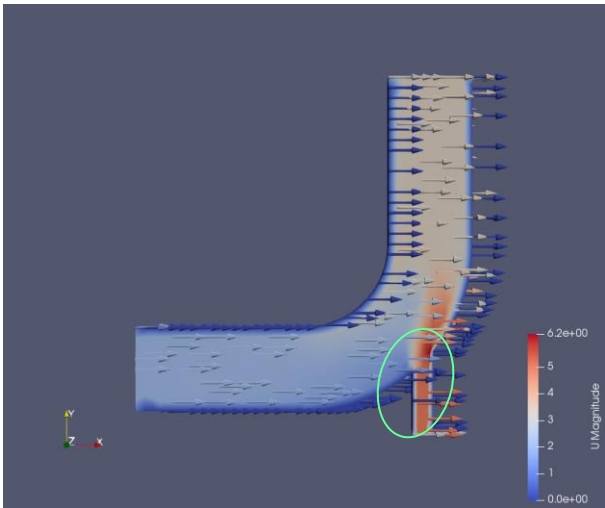
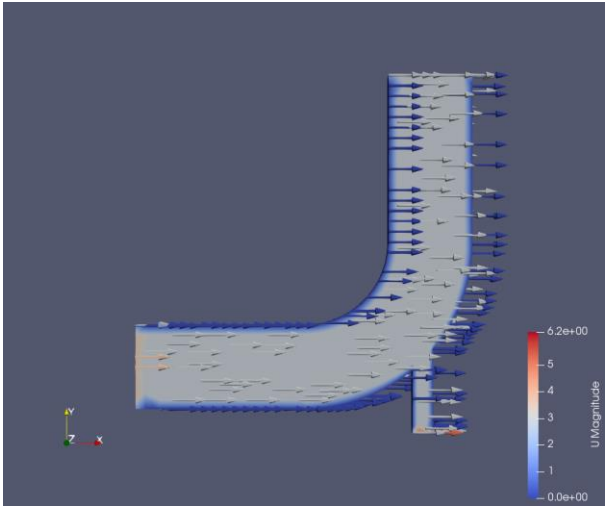
## Elbow Modificado

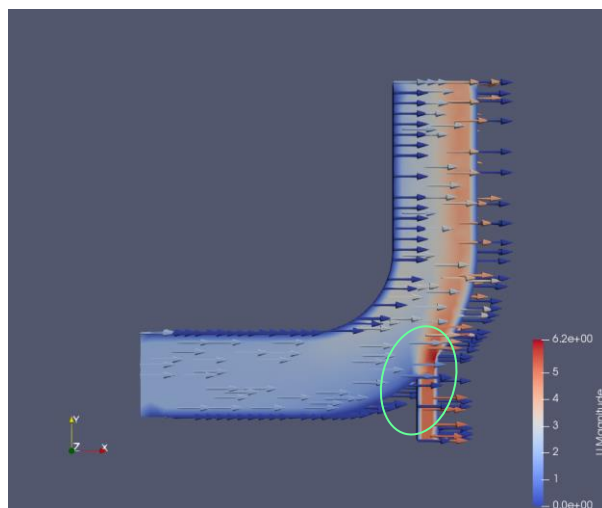
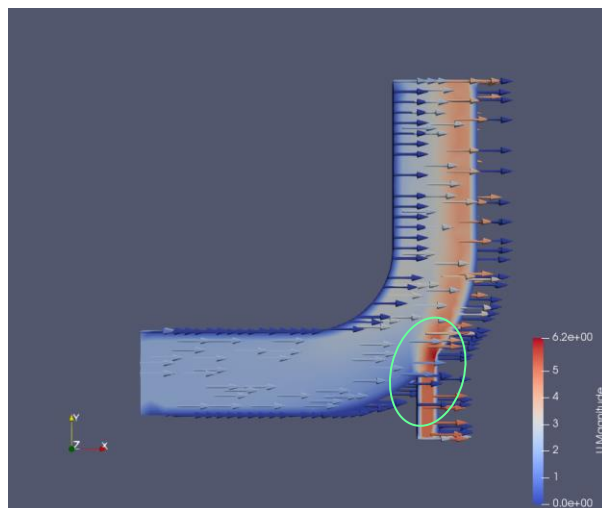
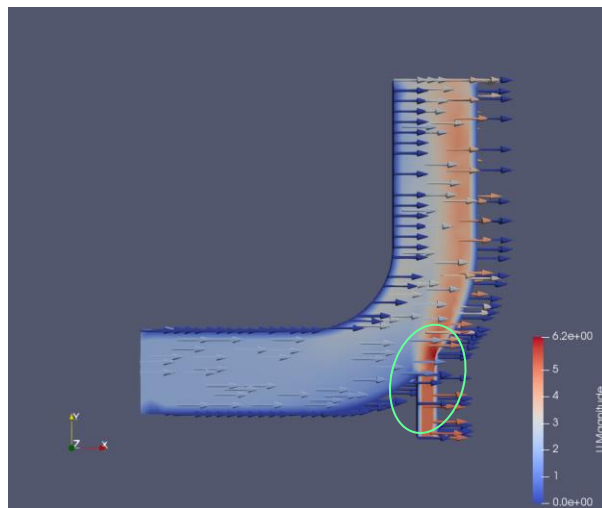
### Campos Vectoriales de Presión





Campos Vectoriales de Velocidad





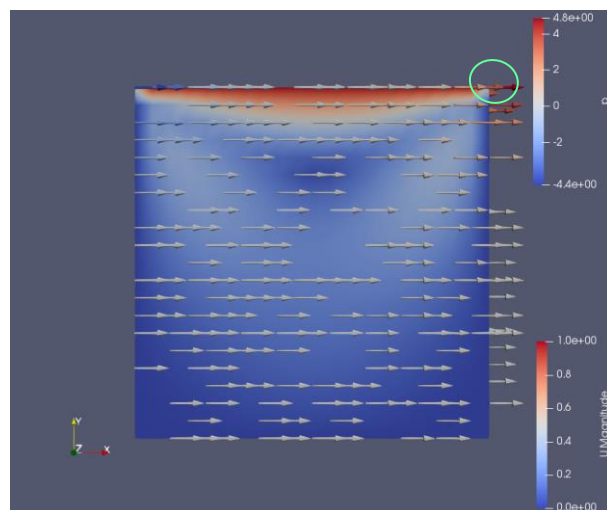
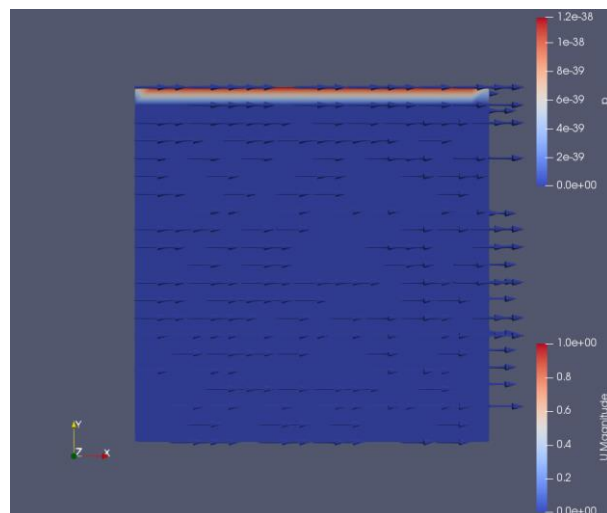
Se modificó las condiciones iniciales del sistema, se incrementó la velocidad inicial de este y se pudo observar que el fluido llegó más rápidamente al extremo final de la tubería. Los puntos donde hay mayor presión en el sistema se mantuvieron, solo que al modificar ciertos parámetros se pudo observar que la presión antes del ingreso del fluido por la tubería de menor diámetro es mayor a 0; sin embargo, la presión es la misma a lo largo del tubo. De igual manera, otro punto crítico del sistema se encuentra

justo en el codo de la tubería mayor, donde esta cambia de orientación (doblez). El punto de mayor velocidad del sistema se mantiene a pesar de los cambios de condiciones iniciales, se encuentra en la intersección de ambas tuberías. A partir del ingreso del fluido, la distribución de velocidades es muy parecido a las condiciones predeterminadas del ejemplo, donde la velocidad es 0 en los bordes y es máxima en el centro.

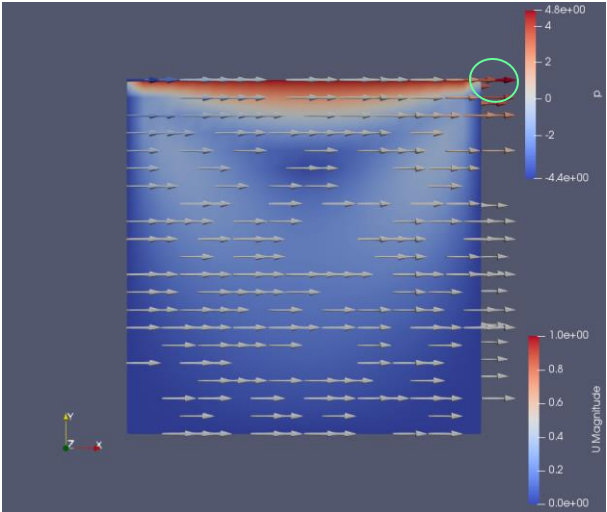
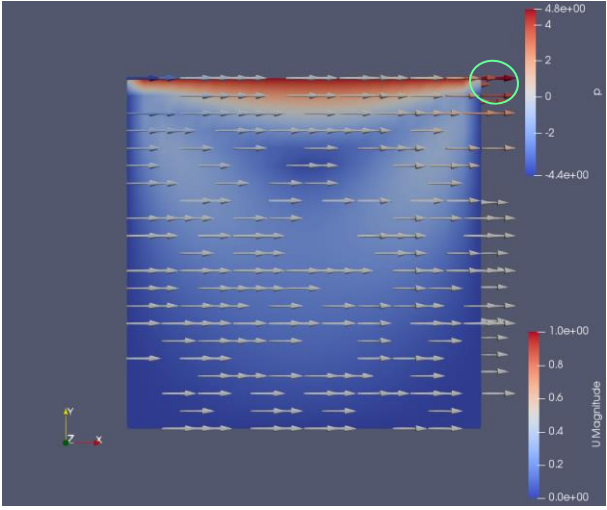
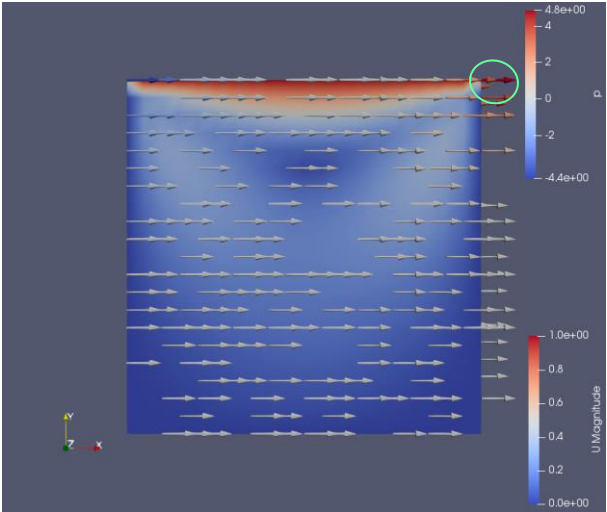
## Cavity

### **Cavity No Modificado**

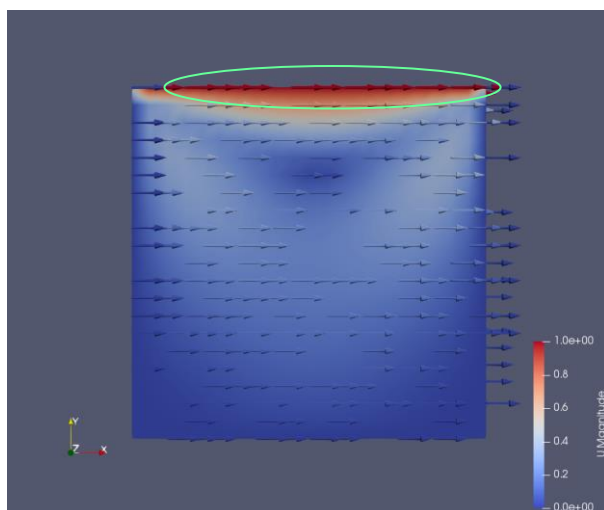
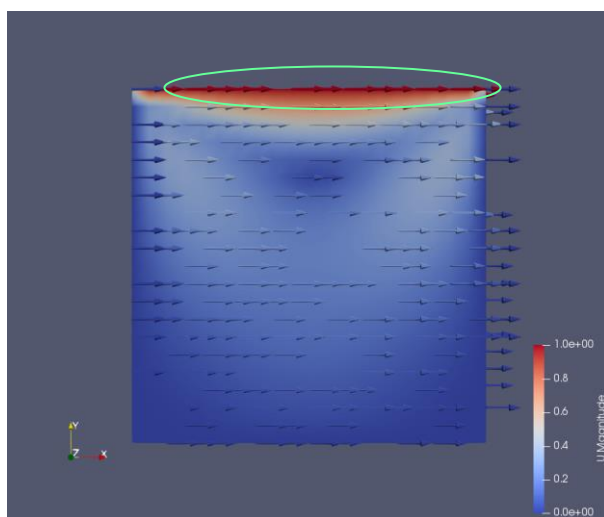
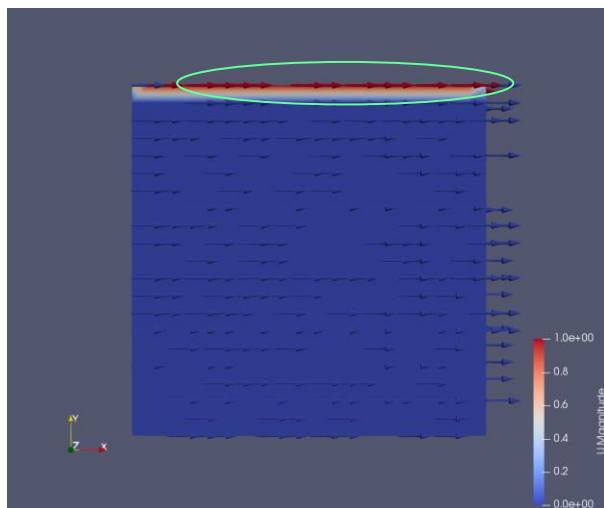
Campos Vectoriales de Presión

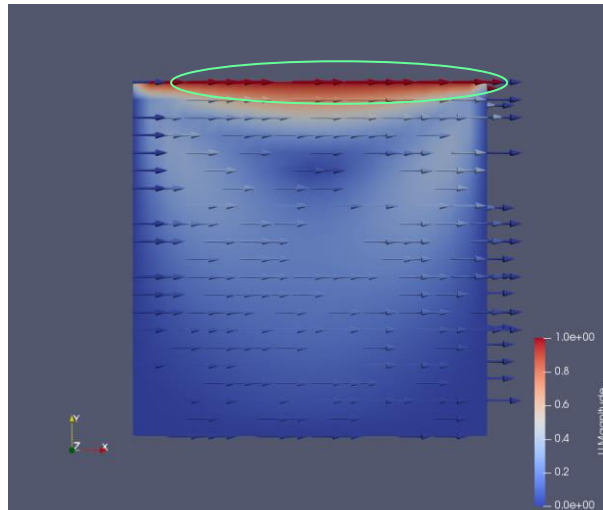






## Campos Vectoriales de Velocidad

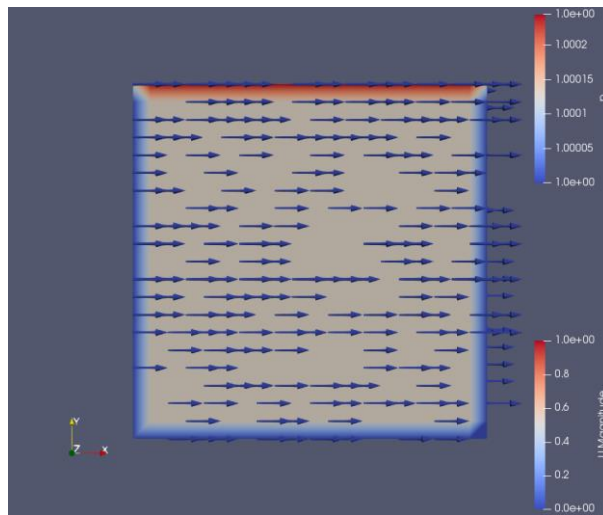


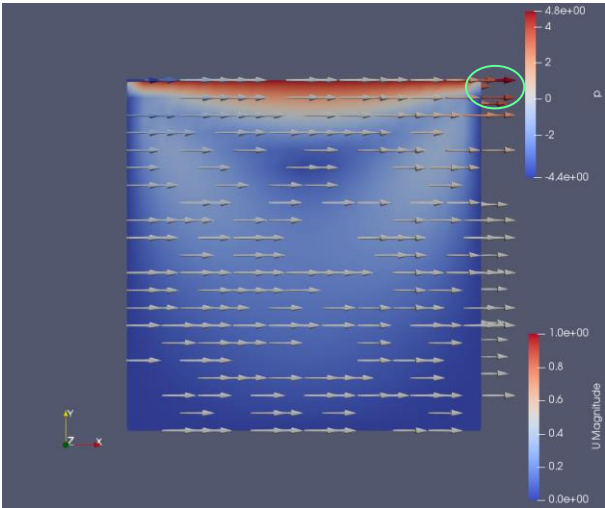
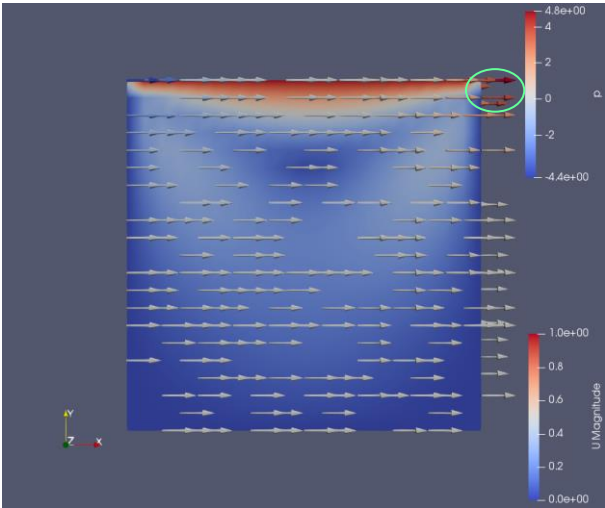
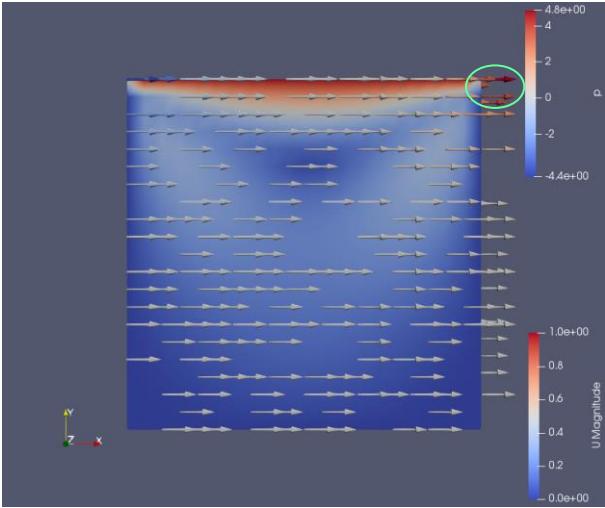


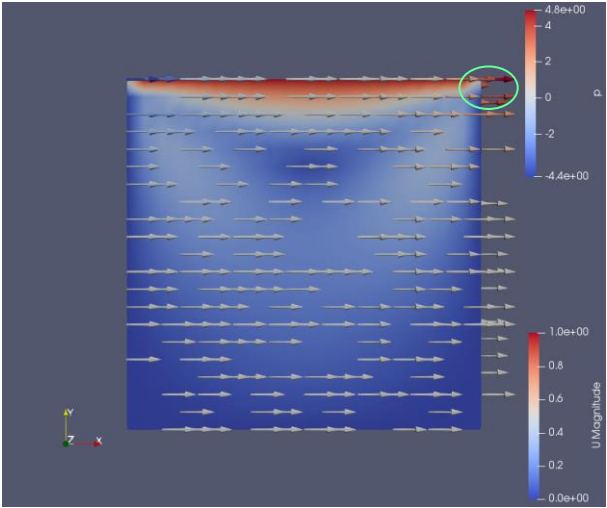
En el caso no modificado del ejemplo cavity se pudo observar que el punto con mayor presión del sistema se encuentra ubicado en la esquina superior derecha. En los campos vectoriales de velocidad se pudo observar que el fluido se mueve solo en una pequeña porción del sistema, ubicado en la parte superior, prácticamente una pequeña franja. El resto del sistema no tiene movimiento alguno y se encuentra en un estado estacionario.

## Cavity Modificado

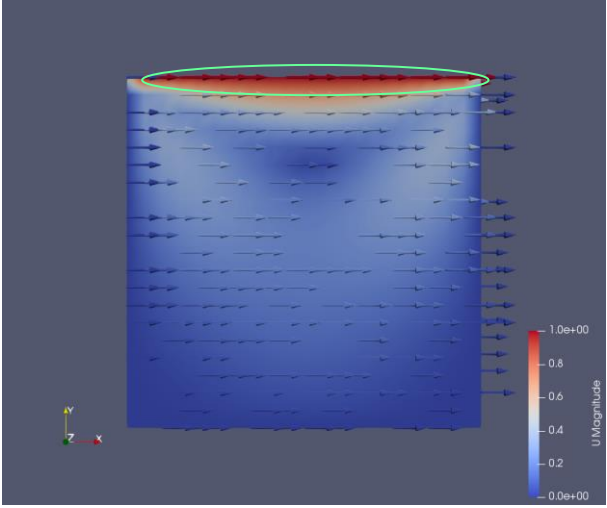
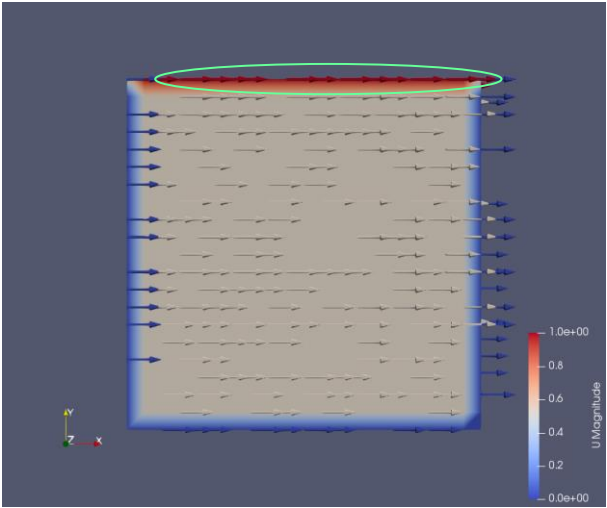
### Campos Vectoriales de Presión

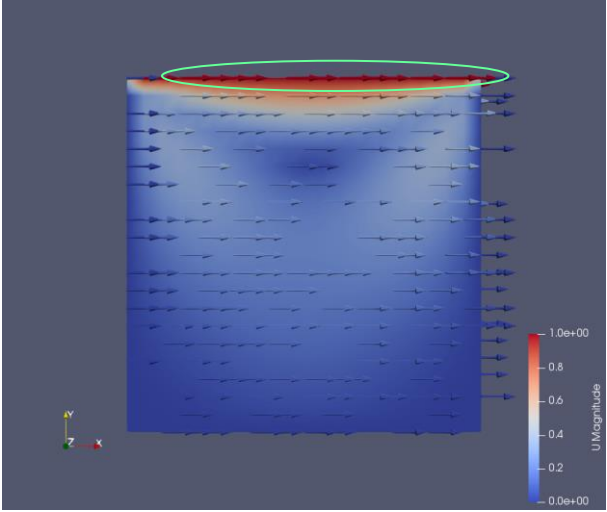
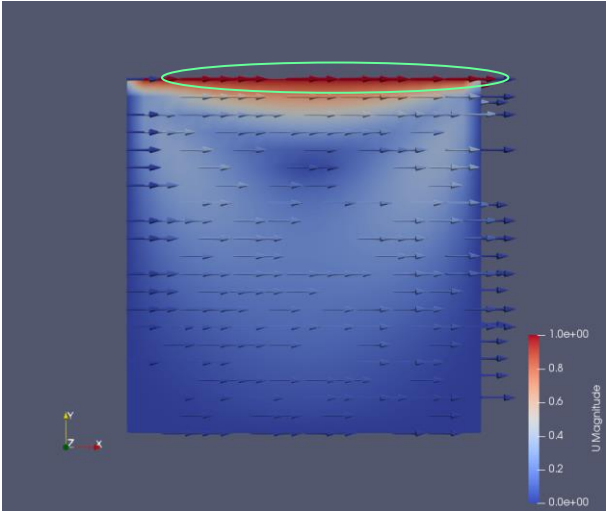
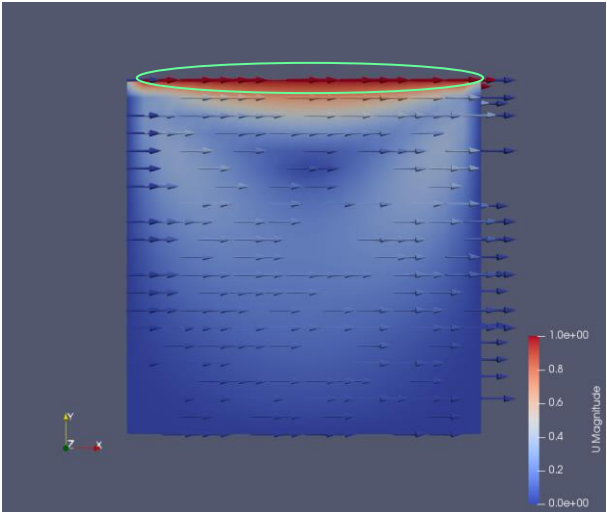


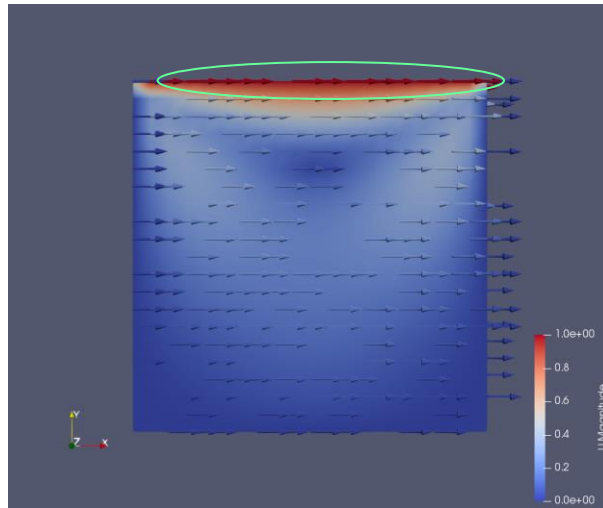




Campos Vectoriales de Velocidad





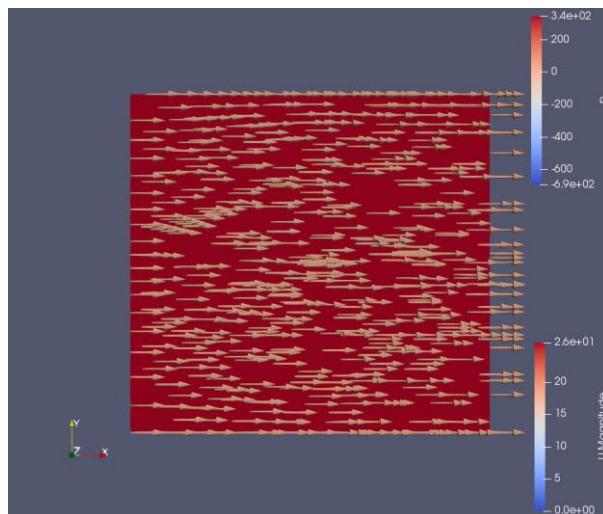


A pesar que se hicieron cambios en las condiciones iniciales del sistema, la ubicación del punto crítico del sistema no cambia y solo se encuentra en una pequeña parte de la esquina superior derecha. A pesar de que se hicieron cambios en las condiciones iniciales del sistema, la manera en cómo reacciona ante estos cambios es prácticamente idénticos a los valores predeterminados.

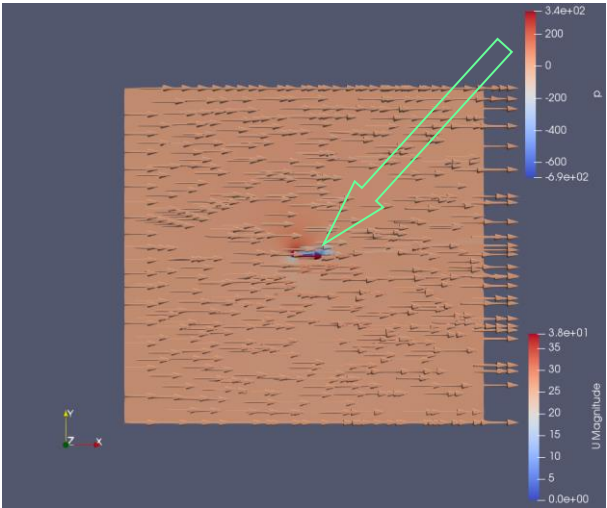
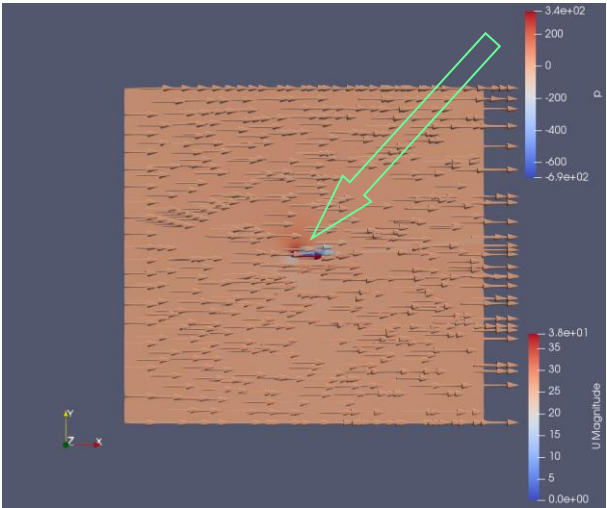
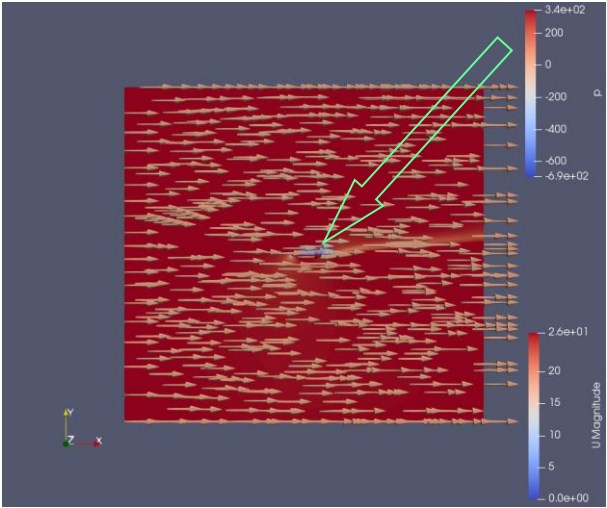
## **Airfoil 2D**

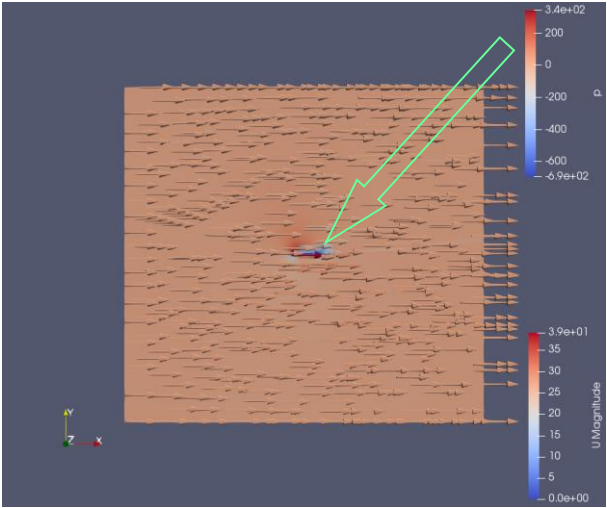
### **Airfoil 2D No Modificado**

Campos Vectoriales de Presión

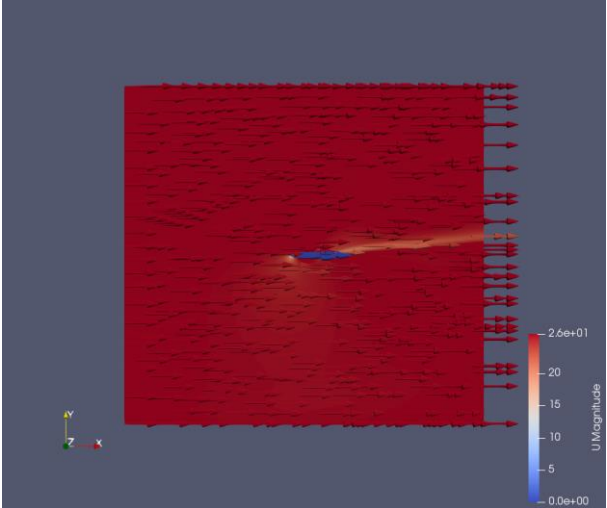
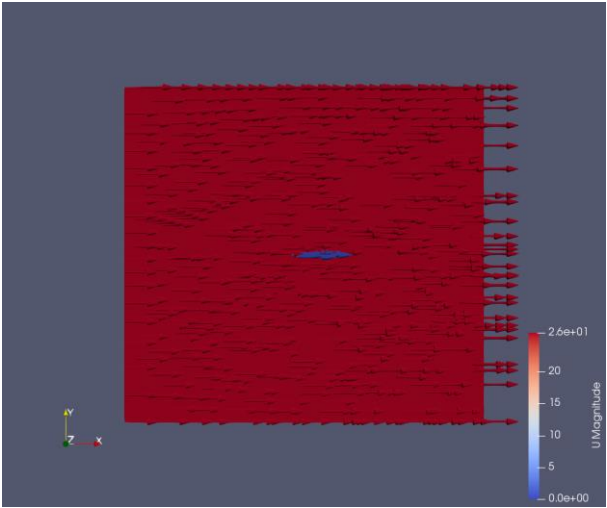


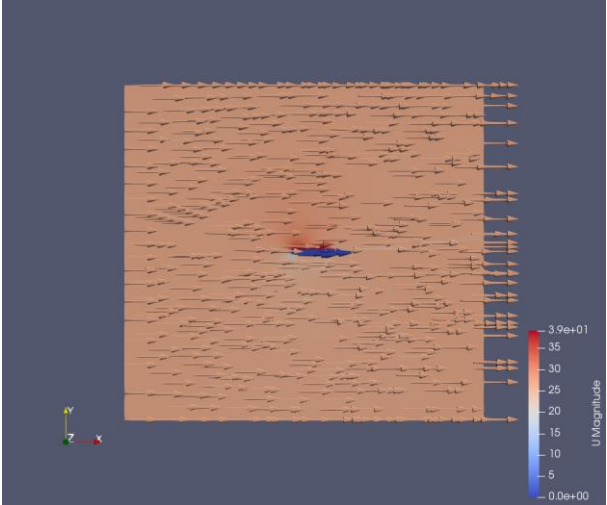
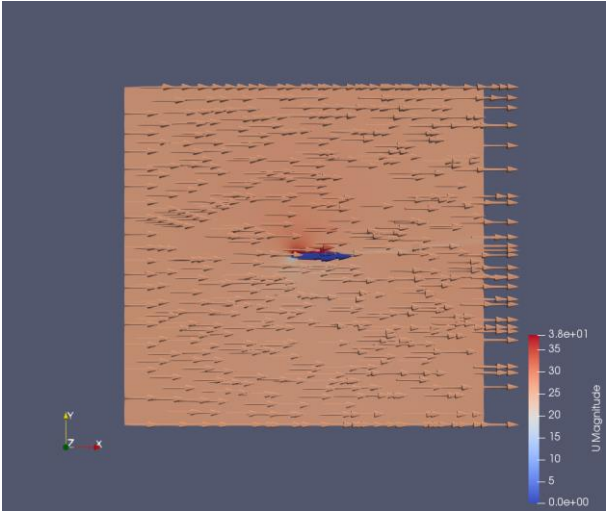
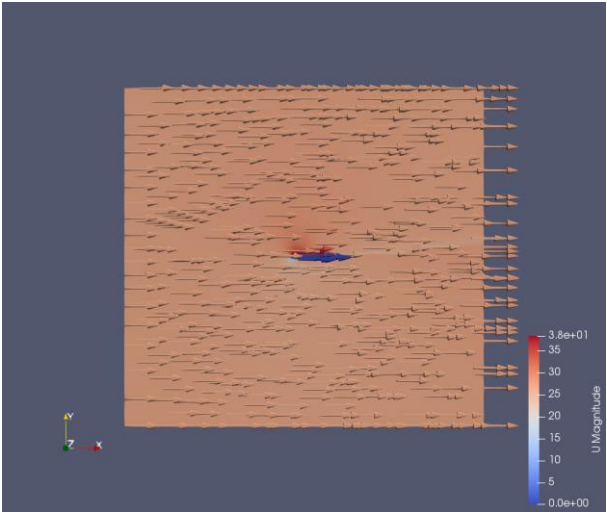


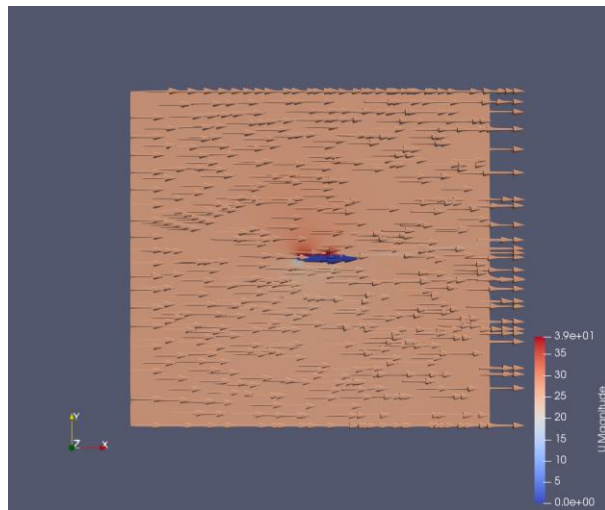
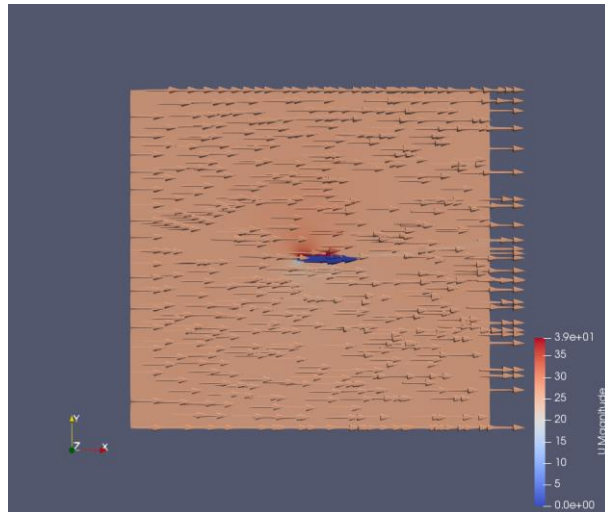




Campos Vectoriales de Velocidad



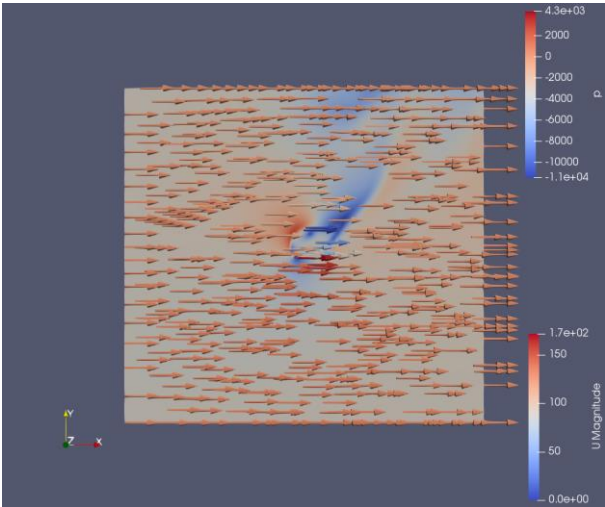
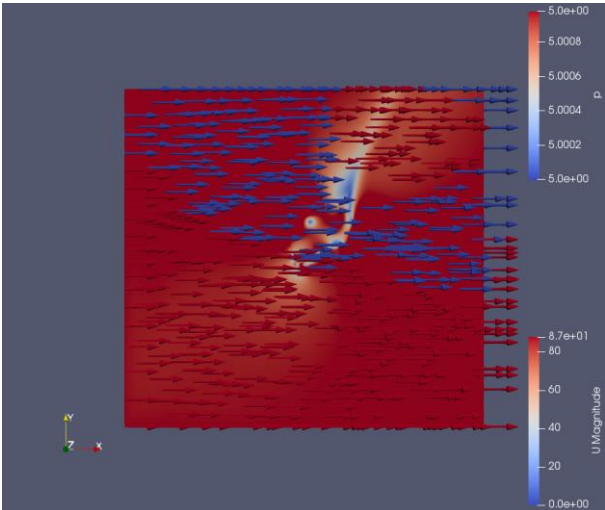
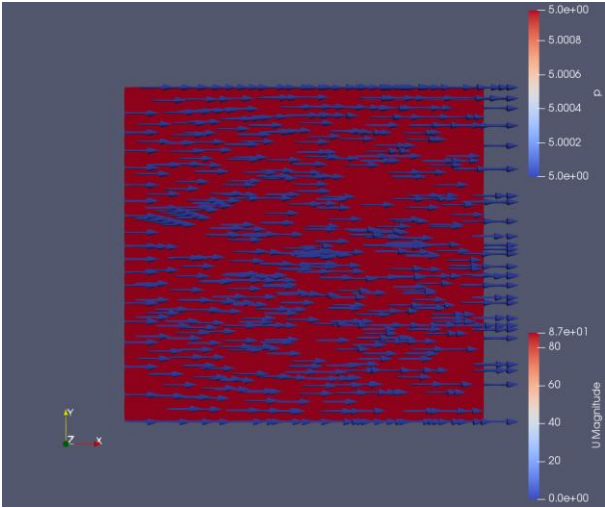


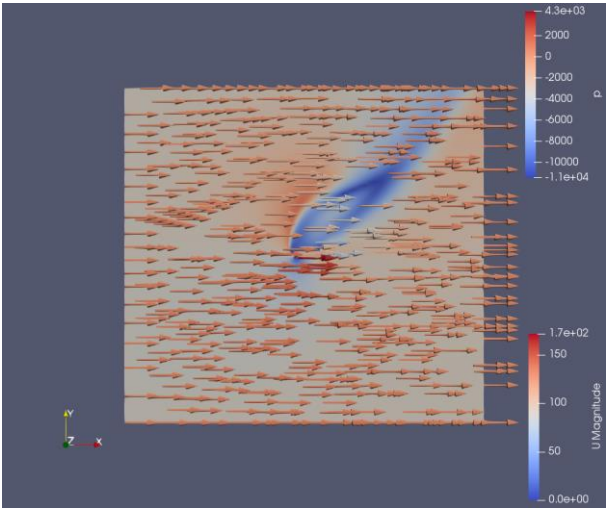
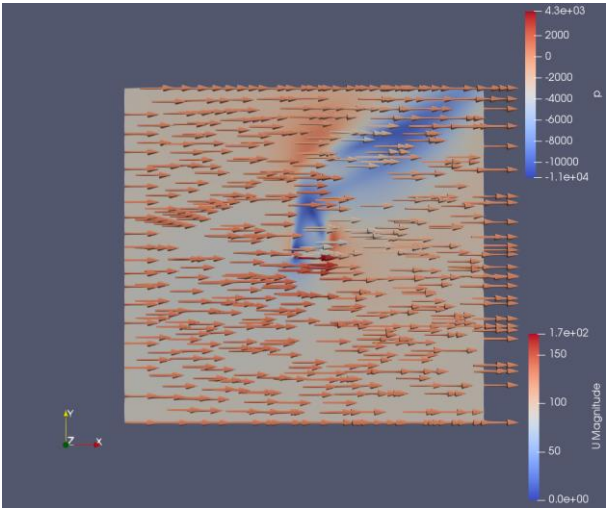
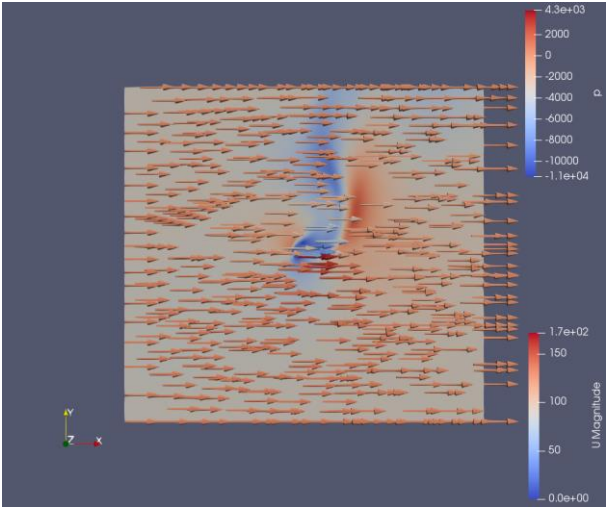


Como las condiciones iniciales del sistema son muy pequeñas (magnitud) el sistema no muestra cambios muy fuertes. El punto crítico del sistema se encuentra ubicado justo en el centro de la figura que lo conforma, ahí se puede observar que se encuentra la mayor magnitud de presión. La velocidad se encuentra distribuida homogéneamente a lo largo del sistema cuando se llega al tiempo final de simulación, excepto en el punto central, donde el fluido se encuentra estático. En el punto central se encuentra el perfil aerodinámico por el cual recibe el nombre el tutorial.

## Airfoil 2D Modificado

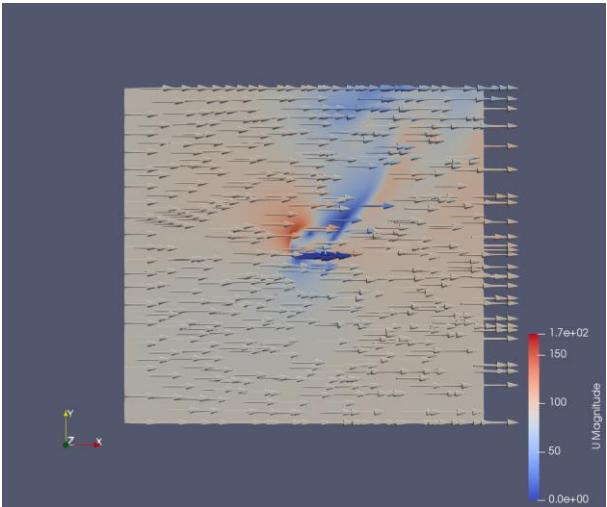
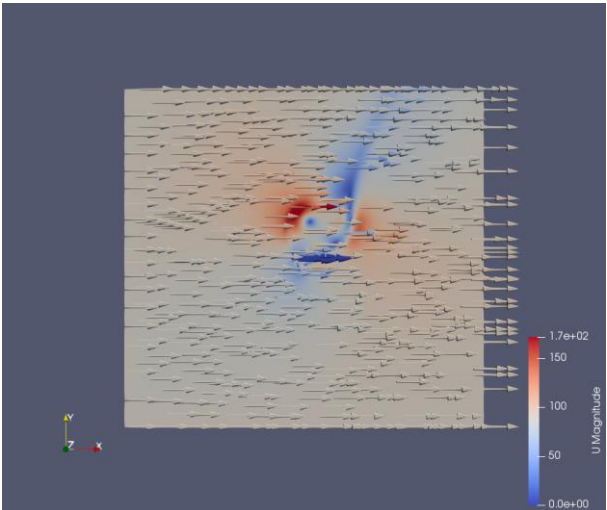
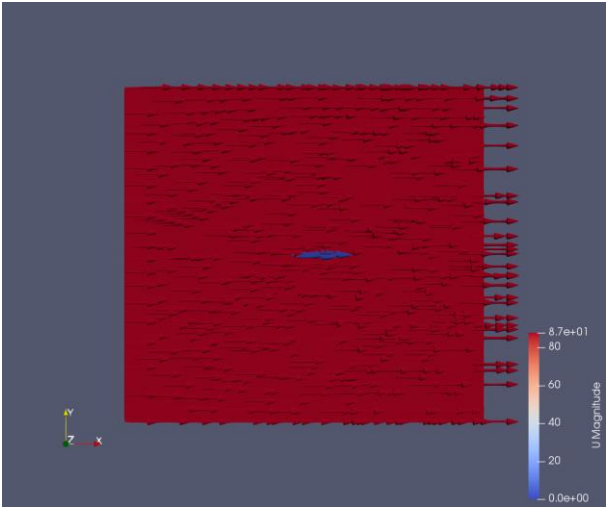
### Campos Vectoriales de Presión



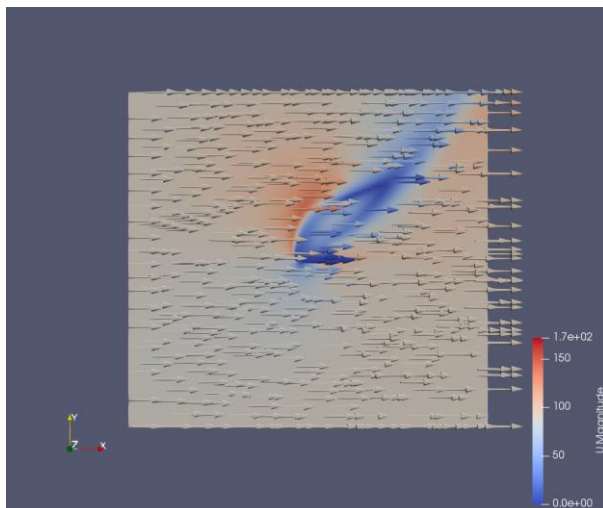
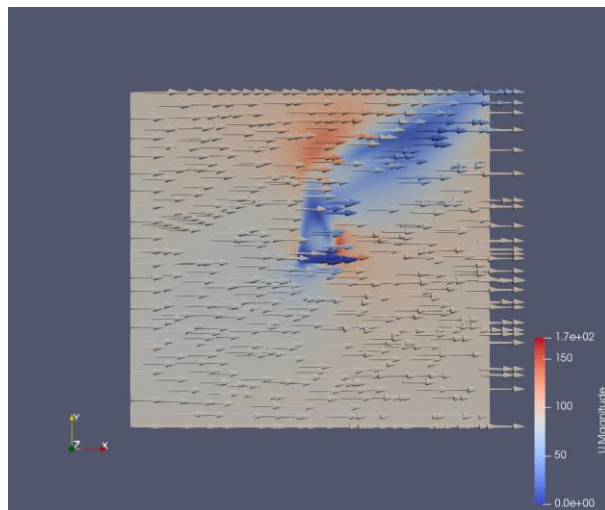
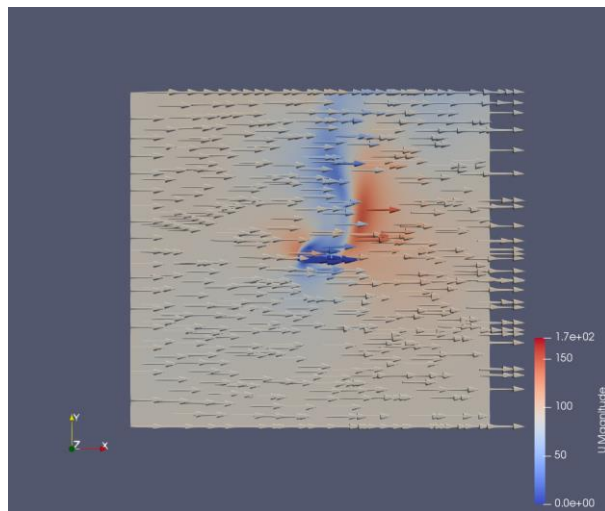


Campos Vectoriales de Velocidad









Se hizo cambios en las condiciones iniciales del sistema, se agregó una presión uniforme inicial y una velocidad inicial mucho mayor a la predeterminada. Se pudo observar a partir de esto que el fluido tiene un comportamiento turbulento y aleatorio. Los puntos críticos de presión del sistema van cambiando conforme pasa el tiempo, comienza distribuyéndose en casi todo el sistema para luego concentrarse en el centro del sistema, igual que en las condiciones del sistema no modificado,

desapareciendo la presión en todo el sistema excepto en el centro de la figura. En cuanto a los campos vectoriales de velocidad se puede observar un comportamiento aleatorio o turbulento, la ubicación de la zona con mayor magnitud del sistema va cambiando conforme al tiempo y nunca llega a estabilizarse completamente.

## VII. CONCLUSIONES

- **Modelo Cavity**
  - A pesar de que se hizo diversos cambios a las condiciones iniciales tanto de velocidad como de presión, el sistema se estabiliza rápidamente y los cambios son casi imperceptibles. Los campos vectoriales solo permiten observar que los cambios son más perceptibles en una pequeña porción en la parte superior del sistema.
  - Es un sistema estacionario con tendencia a una estabilización rápida (fracciones de segundo), por como el fluido no transita a lo largo de todo el sistema. Se puede observar que existe una pequeña cavidad en la esquina superior derecha, de donde recibe su nombre el ejemplo, por como hay un cambio de presiones fuerte en ese punto, siendo el punto más crítico del sistema.
- **Modelo Elbow**
  - En este modelo se pudo observar como influye las condiciones iniciales de velocidad para el alcance o la distancia que viaja el fluido a través de la tubería. Mientras mayor velocidad inicial, el fluido llega más rápido al extremo superior de la tubería. Se pudo observar que el punto de mayor velocidad del sistema se encuentra justo en la intersección de ambas tuberías, el cambio geométrico de la estructura por donde va el fluido sería el determinante para esta característica.
  - Se puede ver que en ambos casos el fluido se comporta laminarmente después de corto tiempo, una vez que este llega a ubicarse completamente en la tubería principal. Los campos vectoriales son paralelos entre sí y no se observa turbulencia alguna.
- **Modelo Airfo2d**
  - El sistema se estabiliza rápidamente en el caso no modificado debido a que las condiciones iniciales de velocidad son muy bajas, no pudiéndose observar un cambio significativo a lo largo del tiempo.
  - Como es un modelo de flujo turbulento, al hacer un cambio a las condiciones iniciales para velocidad y presión se pudo observar fácilmente el comportamiento de este tipo de fluido, donde se perciben movimientos caóticos y aleatorios en el sistema.

## 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.

Diseño de catéteres ventriculares, un estudio realizado por Lin, Morris, Olivero, Boop y Sanford, 2003 abordó el problema de las características del fluido en un catéter ventricular utilizando un programa de CFD. Ellos

estudiaron cinco diseños actuales de catéteres ventriculares disponibles comercialmente utilizando CFD y concluyeron que estos catéteres comerciales tienen un patrón de distribución de flujo anormalmente mayor. Al variar el diámetro de orificio, cantidad de orificios y la relación orificio/segmento, se obtuvieron mejores resultados con lo que IcoFoam se podría usar para verificar la adecuada distribución de flujo sanguíneo en el catéter diseñado.

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

Por el principio de la conservación de la masa a través de un Volumen control, sabemos que la masa ingresante es igual a la masa de salida. Entonces, considerando al fluido incompresible (la densidad no variará en el tiempo), nos quedamos con la gradiente de la velocidad igual a cero. Esto llega a representar la ecuación de continuidad, es decir, la sumatoria de las velocidades multiplicados con su respectiva área de entrada o salida, debe resultar cero, para cumplir con el principio de conservación de masa. De esta forma, ya que existe una razón inversamente proporcional entre el área y la velocidad del fluido, mientras mayor sea el área, menor será su velocidad. Sabemos, además que, el área de un círculo depende de su diámetro; por lo tanto, mientras mayor sea el diámetro de una entrada o salida, menor será la velocidad del fluido que corre a través de esta.

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

Las geometrías donde convienen analizar estos puntos son en las paredes, contornos, superficies de contacto, áreas de difusión (donde se mezclan fluidos) y en las curvaturas. Es importante analizarlos en estas zonas porque estos pueden desestabilizar el sistema y producir errores en los resultados.

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

La cavitación es un efecto hidrodinámico (aspiraciones en vacío) producido cuando se generan cavidades de vapor dentro de cualquier fluido en estado líquido, en donde actúan fuerzas correspondientes a las diferencias de presiones, produciendo una descompensación del fluido debido a la conservación de la constante de bernoulli. Cuando se alcance la presión de vapor del líquido, las moléculas cambian a su fase gaseosa súbitamente, formando las cavidades. Estas burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implosionan súbitamente, retornando a su fase líquida. Entonces, la implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido a velocidades cercanas a las del sonido. Para que la cavitación se produzca, es necesario una superficie donde se puedan nuclear. Esta superficie puede ser la pared del contenedor, impurezas o cualquier otra irregularidad dentro del fluido. Sin embargo, el factor determinante es la temperatura del líquido, ya que cuando este varía, también varía la presión de vapor proporcionalmente. Si la presión de vapor varía, producto del cambio de temperatura, será más fácil o difícil que la cavitación se dé.

## IX. BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- 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.
- 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.