

Simulación CFD de las cámaras de un convertidor de energía undimotriz OWC

Andrés Jesús Galvis Díaz  
Wilman Andrés Egea Castillo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director  
Jorge Luis Chacón Velasco  
PhD. Ingeniería Mecánica

Codirector  
Fabian Enrique González Esteban  
Ingeniería Mecánico

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
Bucaramanga  
2021

### **Agradecimientos**

Queremos empezar agradeciendo a Dios, por darnos las capacidades, el entendimiento, por poner en nuestro camino a las personas que brindaron su ayuda y permitir que pudiéramos afrontar y salir victoriosos en cada reto que se nos presentó en el desarrollo del proyecto de grado.

Nos gustaría expresar nuestra profunda gratitud al Phd Milad Zahibi de Iran University of science and technology, por su ayuda al orientarnos en la obtención de datos de presión y altura en las cámaras de oscilación y resonancia a partir de los Iso-Clip, por aportar su conocimiento en el manejo del software ANSYS FLUENT ya que esto fue vital para la terminación de la tesis.

También nos gustaría agradecer a nuestro codirector Fabian Gonzales, por su paciente orientación, su entusiasta aliento y sus críticas constructivas, sus ideas, el tiempo dedicado a este trabajo de investigación, por sus consejos y ayuda para mantener el progreso de la tesis a pesar de todas las dificultades que se presentaron.

Nos gustaría resaltar a aquellas personas y compañeros que intervinieron en este proceso de cursar la carrera de Ingeniería Mecánica, extendiéndonos su apoyo cuando más lo necesitábamos.

De mi parte Wilman Andrés Egea Castillo expreso también expreso mi agradecimiento a mis padres, Wilman Egea y Betty Castillo por ser ese apoyo emocional en este gran proceso que culmina de gran manera.

Yo Andrés Jesús Galvis Díaz, quiero agradecer especialmente a mi padre Ciro Alfonso Galvis y a mi madre Patricia Díaz Quiroz por su sacrificio, apoyo incondicional, sabiduría, consejos, amor y la paciencia que me han brindado durante toda mi carrera. Gracias a ellos he podido afrontar todas las dificultades que se me han presentado además la darme la gran oportunidad de ingresar a la Universidad.

También quiero agradecerle a mi hermano Cristhian Jesús Galvis Díaz por sus palabras de aliento, a Nuris María Royert Montt, por acompañarme a cada momento, brindarme su apoyo, animo, amor y cariño durante este difícil proceso y mi familia por creer en mis capacidades.

**Tabla de contenido**

	<b>Pag.</b>
Introducción .....	16
1. Objetivos .....	21
1.1 Objetivo general .....	21
1.2 Objetivos específicos .....	21
2. Marco Teórico .....	22
2.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD) .....	22
2.2 Método de volúmenes finitos .....	23
2.3 Tipos de mallas .....	26
2.3.1 Parámetros de calidad del mallado .....	27
2.4 Teoría del oleaje .....	30
2.4.1 Teoría no lineal del oleaje .....	31
2.5 Clasificación de los dispositivos de conversión de energía del oleaje .....	32
2.6 Tecnología OWC .....	34
2.6.1 Funcionamiento del dispositivo OWC-MDS .....	35
2.7 Ley de Betz .....	36
2.8 Estado del arte .....	36
2.7.1 Dispositivo OWC-MDS .....	41
3. Sintonización del modelo físico en Ansys Fluent .....	43
3.1 ¿Que es la simulación? .....	44
3.2 Independencia de malla .....	46
3.2.1 Selección del modelo numérico .....	47
3.2.2 Selección del tamaño de malla .....	48
3.3 Cálculo del número de Reynolds .....	56
3.4 Escenario periodo $T=1.5s$ – altura $H=15cm$ .....	58
3.4.1 Resultados del experimento de laboratorio T1.5-H15 por Miguel Sandoval .....	58
3.4.2 Resultados simulación ansys fluent T1.5-H15 .....	60

3.5 Escenario periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$ .....	63
3.5.1 Resultados del experimento de laboratorio T2 -H20 por Miguel Sandoval .....	63
3.5.2 Resultados simulación ansys fluent T2-H20.....	65
4. Análisis de sensibilidad.....	70
4.1 Escenario con wec sumergido 3 cm periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$ .....	71
4.2 Escenario con cámara de oscilación alargada 3 cm periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$ .....	74
4.3 Escenario con pestaña de 3 cm en la cámara de oscilación periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$ ...	76
4.4 Escenario con pestaña de 3 cm en la cámara de oscilación y en la cámara de resonancia periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$ .....	79
5. Estudio del diseño de las cámaras del convertidor a condiciones de la zona costera colombiana.....	83
5.1 Condiciones del oleaje en la costa caribe colombiana.....	84
5.2 Escala del oleaje.....	84
5.3 Simulación a condiciones de la costa Caribe Colombiana .....	86
6. Conclusiones .....	89
Referencias Bibliográficas .....	93
Apéndice .....	100

**Lista de tablas**

	<b>Pag.</b>
Tabla 1. Rango de valores de asimetría y la calidad de celda correspondiente.....	28
Tabla 2. Tabla comparativa de los modelos numéricos seleccionados.....	38
Tabla 3. Modelo físico del WEC-OWC-MDS.....	40
Tabla 4. Acotación del modelo numérico del WEC-OWC-MDS.....	48
Tabla 5. Parámetros de calidad de las diferentes mallas simuladas.....	54
Tabla 6. Resultados recopilados de los experimentos de Miguel Sandoval .....	68
Tabla 7. Resultados recopilados de las simulaciones en ansys Fluent. ....	68
Tabla 8. Comparación entre resultados experimentales y simulaciones.....	69
Tabla 9. Parametros de malla de los escenarios simulados en el analisis de sensibilidad .....	71
Tabla 10. Resultados de las diferentes simulaciones variando la altura de las cámaras del WEC82	

**Lista de figuras**

	<b>Pag.</b>
Figura 1. Esquema de una central undimotriz basada en columna oscilante agua. Adaptado de (Garcia, 2016). .....	18
Figura 2. Modelo CAE desarrollado en el software ANSYS 2020 R1.....	24
Figura 3. Malla estructurada .....	26
Figura 4. Malla no estructurada .....	27
Figura 5. Triángulos y cuadriláteros ideales y sesgados.....	28
Figura 6. Ejemplo de la relación de aspecto de un elemento tetraédrico.....	30
Figura 7. Regiones de validez para varias teorías del oleaje. Adaptado de (Department of the army, 1984). .....	31
Figura 8. Clasificación de los diferentes tipos de dispositivos de absorción de energía del oleaje basados en su funcionamiento. (Falcão, 2010).....	34
Figura 9. Diagrama de funcionamiento del dispositivo OWC-MDS. (Sandoval, 2018).....	35
Figura 10. Diagrama del dispositivo OWC-MDS.....	41
Figura 11. Esquema de la distribución del canal de oleaje del LIPC. (Sandoval, 2018).....	42
Figura 12. Condiciones de frontera del canal de oleaje.....	49
Figura 13. Simulación en ansys fluent con la condición de generación de oleaje “wavy”...	51
Figura 14. Zonas de propagación del oleaje. ....	53
Figura 15. Imagen de la simulación en canal 10.146 m de longitud. ....	55

Figura 16. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de $H_s=15\text{cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de oscilación. ....	59
Figura 17. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de $H_s=15\text{cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia. Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 67.....	59
Figura 18. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a las presiones de las cámaras condiciones de $H_s=15\text{cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia. Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 71.....	59
Figura 19. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=15\text{ cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ .....	60
Figura 20. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=15\text{ cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ .....	61
Figura 21. Presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=15\text{ cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ .....	62
Figura 22. Presión en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=15\text{ cm}$ y $T= 1.5\text{s}$ .....	62
Figura 23. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ , registrados en la cámara de oscilación. Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 63.....	63
Figura 24. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de $H_s=20\text{cm}$ y $T= 2\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia. ....	64

Figura 25. Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a las presiones de las cámaras condiciones de $H_s=20\text{cm}$ y $T= 2\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia. ....	64
Figura 26. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ .....	65
Figura 27. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ .....	66
Figura 28. Presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ .....	67
Figura 29. Presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{cm}$ y $T= 2\text{s}$ .....	67
Figura 30. WEC sumergido 3cm .....	71
Figura 31. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con wec sumergido.....	72
Figura 32. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con wec sumergido.....	72
Figura 33. Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con wec sumergido. ....	73
Figura 34. Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con wec sumergido. ....	73
Figura 35. WEC con cámara de oscilacion alargada 3 cm. ....	74
Figura 36. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con cámara de oscilación alargada 3cm. ....	75
Figura 37. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20\text{ cm}$ y $T= 2\text{s}$ con cámara de oscilación alargada 3cm.....	75

Figura 38. Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con cámara de oscilación alargada.....	75
Figura 39. Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con cámara de oscilación alargada.....	76
Figura 40. WEC con pestaña de 3cm en la cámara de oscilación.....	77
Figura 41. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en la cámara de oscilación.....	77
Figura 42. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en la cámara de oscilación.....	77
Figura 43. Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en la cámara de oscilación.....	78
Figura 44. Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en la cámara de oscilación.....	78
Figura 45. WEC con pestaña de 3cm en las cámaras de oscilación y resonancia. ....	79
Figura 46. Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en las cámaras de oscilación y de resonancia.....	80
Figura 47. Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en las cámaras de oscilación y de resonancia.....	81
Figura 48. Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en las cámaras de oscilación y resonancia. ....	81
Figura 49. Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de $H_s=20$ cm y $T= 2s$ con pestaña en las cámaras de oscilación y resonancia. ....	82

Figura 50. Presión total en la cámara de oscilación a condiciones de la costa Caribe

Colombiana. .... 87

Figura 51. Presión total en la cámara de resonancia a condiciones de la costa Caribe

Colombiana. .... 88

**Listas Ecuaciones**

	<b>Pag.</b>
Ecuación 1. Ecuación general de transporte .....	25
Ecuación 2. Ecuación potencial energético de Betz .....	36
Ecuación 3. Ecuación de longitud de onda para aguas intermedias. ....	43
Ecuación 4. Celeridad de la ola para aguas transicionales.....	57
Ecuación 5. Radio hidráulico para canales abiertos de sección transversal rectangular. ....	57
Ecuación 6. Número de Reynolds.....	58
Ecuación 7. Fórmula para escalar el periodo .....	86
Ecuación 8. Fórmula para escalar la altura .....	86
Ecuación 9. Formula de la velocidad dentro de los ductos.....	89

**Lista de Apéndices**

	<b>Pag.</b>
Apéndice A. Paso a paso de la simulación en el software Ansys Fluent.....	100

## Resumen

**Título:** Simulación CFD de las cámaras de un convertidor de energía undimotriz OWC\*

**Autor:** Andrés Jesús Galvis Díaz, Wilman Andrés Egea Castillo\*\*

**Palabras Clave:** CFD, Ansys, Fluent, Energía, Columna, Agua, oleaje, olas.

**Descripción:** Debido a la problemática ambiental por la que atraviesa nuestro planeta, se ha incrementado enormemente la necesidad de obtener nuevas formas de captar energía, que no dependan de los combustibles fósiles. Entre las más destacadas se encuentra la energía undimotriz, que es la encargada de obtener la energía almacenada en el movimiento de las olas del océano. Por esta razón nuestro proyecto busca contribuir en la búsqueda de nuevos artefactos que permitan extraer de forma más eficiente dicha energía, realizando en estudio de un convertidor OWC, utilizando las herramientas CFD para recrear un modelo físico en el software Ansys Fluent, que permita observar cómo influye la geometría de las cámaras del WEC en parámetros de interés que son la oscilación del aire y el delta de presión máximo dentro de las cámaras.

Colombia es un país privilegiado por una gran riqueza hídrica, es uno de los pocos países en la que sus costas se encuentran bañadas por dos océanos diferentes como lo son el océano pacífico y el océano atlántico, con el fin de conocer el potencial que tiene el oleaje colombiano en el ámbito de la obtención de energía se planea realizar una simulación a condiciones de las zonas costeras colombianas.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. PhD. Ingeniería Mecánica. Codirector: Fabián Enrique González Esteban. Ingeniero Mecánico.

### Abstract

**Title:** CFD simulation of the cameras of an OWC wave energy converter\*

**Author:** Andrés Jesús Galvis Díaz, Wilman Andrés Egea Castillo\*\*

**Key Words:** CFD, Ansys, Fluent, Energy, Column, water, ocean, wave, wave motor, simulate.

**Description:** Due to the environmental problems our planet is going through, the need for new ways of capturing energy that do not depend on fossil fuels has increased enormously. Among the most prominent is wave energy, which is responsible for obtaining the energy stored in the movement of ocean waves.

For this reason, our project seeks to contribute to the search for new artifacts that allow the extraction of said energy more efficiently, carrying out a study of an OWC converter, using CFD tools to recreate a physical model in the Ansys Fluent software, which allows us to observe how the geometry of the WEC chambers influences parameters of interest that are the air oscillation and the maximum pressure delta within the chambers.

Colombia is a country privileged by a great water wealth, it is one of the few countries in which its coasts are bathed by two different oceans such as the Pacific Ocean and the Atlantic Ocean, in order to know the potential that the Colombian waves in the field of obtaining energy, it is planned to carry out a simulation of conditions in the Colombian coastal areas.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacón Velasco. PhD. Mechanical Engineering. Co-director: Fabián Enrique González Esteban. Mechanical engineer.

## Introducción

La necesidad de encontrar fuentes de energías limpias y dejar de lado la dependencia energética de los combustibles fósiles ha hecho que en los últimos años se busquen nuevas fuentes de energía que contaminen en menor medida el medio ambiente, esto ha traído consigo diversas investigaciones en las llamadas energías alternativas buscando mejores formas de obtenerlas para aumentar su eficiencia y reducir su costo. Una de las energías alternativas que ha tenido gran impacto y buena acogida ha sido la energía undimotriz por ser una fuente limpia, estable y predecible, debido a que no depende de la irregularidad de los vientos ni de los periodos de luz solar, además, se basa en la obtención de energía del océano aprovechando la energía que se almacena en las olas.

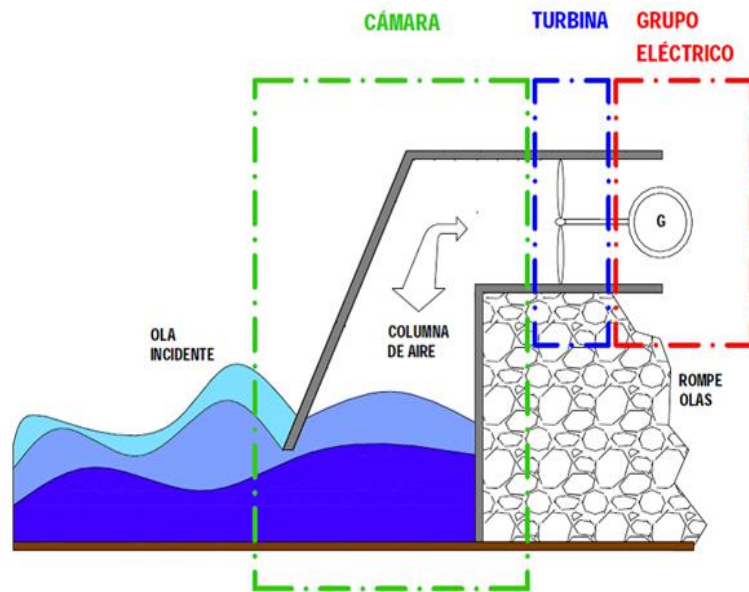
El océano es una fuente de energía renovable con gran potencial, y la obtención de su energía supone tanto un reto desde el punto de vista del alto costo tecnológico, como grandes oportunidades por el potencial energético.

Para superar las barreras de extraer la energía marina y hacerla competitiva con respecto a las demás fuentes de energía se necesitará más investigación y desarrollo, esto ha traído la creación de una serie de convertidores para aprovechar la energía de las olas (en inglés wave energy converter, conocido con la sigla, WEC), las mareas, las corrientes marinas, etc. Uno de los convertidores de energía undimotriz más utilizados en la actualidad es el de columna de agua oscilante con siglas en inglés OWC (ver figura 1), que utiliza la neumática para generar energía al

hacer pasar aire por una turbina tipo Wells, una ventaja de este convertidor es que debido a que usa la neumática el mantenimiento es más sencillo y económico.

En el contexto de la ingeniería, ha cobrado importancia la implementación del modelado y la simulación como una herramienta indispensable y transversal para resolver problemas científicos y tecnológicos planteados desde las ingenierías de sistemas, civil, química, industrial, biomédica, mecánica y otras. El modelado y la simulación trae beneficios y ventajas, especialmente en lo referente a la optimización, el control, bajo costo de implementación, la cuantificación de incertidumbres, el diseño de mecanismos para toma de decisiones y la respuesta a desafíos en tiempo real.

Con el fin de encontrar nuevos convertidores OWC más eficientes que aprovechen mejor la energía almacenada en las olas se establece el interrogante: ¿Se puede conocer el comportamiento hidrodinámico de las cámaras de un OWC sumergido mediante un modelo CFD en fluent ANSYS y encontrar parámetros de diseño geométrico con el fin de obtener un mayor aprovechamiento de energía?

*Figura 1.**Esquema de una central undimotriz basada en columna oscilante agua..*

*Nota: Adaptado de (Garcia, 2016)*

La dinámica de fluidos computacional o CFD viene directamente de la unión del desarrollo de la mecánica de fluidos con la unión y el desarrollo posterior del cálculo numérico. El cálculo numérico en conjunto con la mecánica de fluidos, permite ahora desarrollar y resolver una gran cantidad de ecuaciones simultáneamente, esto es lo que está a la base de cada uno de los softwares de desarrollo de dinámica de fluidos computacional. ANSYS CFD es una poderosa herramienta que ayuda a proporcionar información detallada sobre el comportamiento del flujo de fluidos. Debido a los resultados proporcionados, es una herramienta que puede ser utilizada en todas las etapas de un proceso de ingeniería.

Este trabajo está en el marco y complementa el proyecto de investigación 2322 VIE (Vicerrectoría de investigación y Extensión) de la Universidad Industrial de Santander.: EVALUACION DE UN CONVERTIDOR DE ENERGIA UNDIMOTRIZ EN COLOMBIA.

La presente investigación surge de la necesidad del estudio del convertidor OWC-MDS sumergido en un canal de oleaje, se hace necesario conocer el comportamiento hidrodinámico tanto de su cámara de oscilación como el de la cámara de resonancia mediante un modelo CFD en ANSYS 17.1. Inicialmente lo que hace ANSYS es basarse en el método de volúmenes finitos, que consiste directamente en una discretización del dominio en pequeños volúmenes de control sobre los cuales se van a resolver ecuaciones generales de transporte tales como ecuaciones de continuidad (conservación de masa), ecuaciones de momentum (segunda ley de Newton, conocidas como “ecuaciones de Navier-Stokes”) y ecuaciones de energía (primera ley de la termodinámica). Las técnicas CFD simulan mediante métodos numéricos el comportamiento real de los fluidos con el objetivo de obtener más información y comprensión del mismo, lo que consiste es en tener la capacidad de llevar el dominio físico o sistema que se va a estudiar a un dominio computacional, discretizarlo adecuadamente en pequeños volúmenes de control para que el software pueda resolver cada una de las ecuaciones de transporte en cada uno de los volúmenes y encontrar así una solución adecuada.

Basado en lo anterior se propone desarrollar un modelo numérico en CFD, que permita estudiar el comportamiento hidrodinámico de un convertidor de energía undimotriz de columna de agua oscilante (WEC-OWC), y a partir de este, realizar un análisis de sensibilidad para identificar la influencia que tiene la altura de las cámaras, en la energía potencial de las cámaras del WEC-OWC-MDS.

La presente investigación servirá también en lo académico para profundizar en el conocimiento y aplicación de los convertidores OWC en el estudio de energías renovables como la undimotriz.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Estudiar el comportamiento hidrodinámico de las cámaras de un convertidor de energía undimotriz de columna de agua oscilante (OWC-MDS) por medio de un modelo numérico CFD.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Simular en Fluent ANSYS el comportamiento hidrodinámico de un WECOWC-MDS en un canal de oleaje y validar el modelo numérico con datos experimentales de referencia encontrados en la literatura.
- Realizar un análisis de sensibilidad para identificar la influencia que tiene la altura de las cámaras del OWC-MDS en la energía potencial de estas.
- Estudiar un diseño de las cámaras del convertidor OWC utilizando condiciones específicas de oleaje para una zona costera colombiana.

## 2. Marco Teórico

En este apartado se describe brevemente las bases o conceptos necesarios a tener en cuenta para llevar a cabo la simulación fluido dinámica de un convertidor de energía del tipo columna de agua oscilante. Se describe la teoría lineal del oleaje en conjunto con las ecuaciones que gobiernan el movimiento de propagación del oleaje. También se describen las ecuaciones que definen el funcionamiento del dispositivo OWC MDS, la física de las cámaras de este dispositivo, ecuaciones de Navier Stokes y al final se acotará un modelo físico con el fin de obtener un modelo numérico que permita la obtención de datos de presión en el interior de las cámaras del WEC.

### 2.1 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa se dividen en:

Preproceso, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y pre-acondicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.

Proceso, el resultado del preproceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de  $N$  ecuaciones y  $N$  incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier

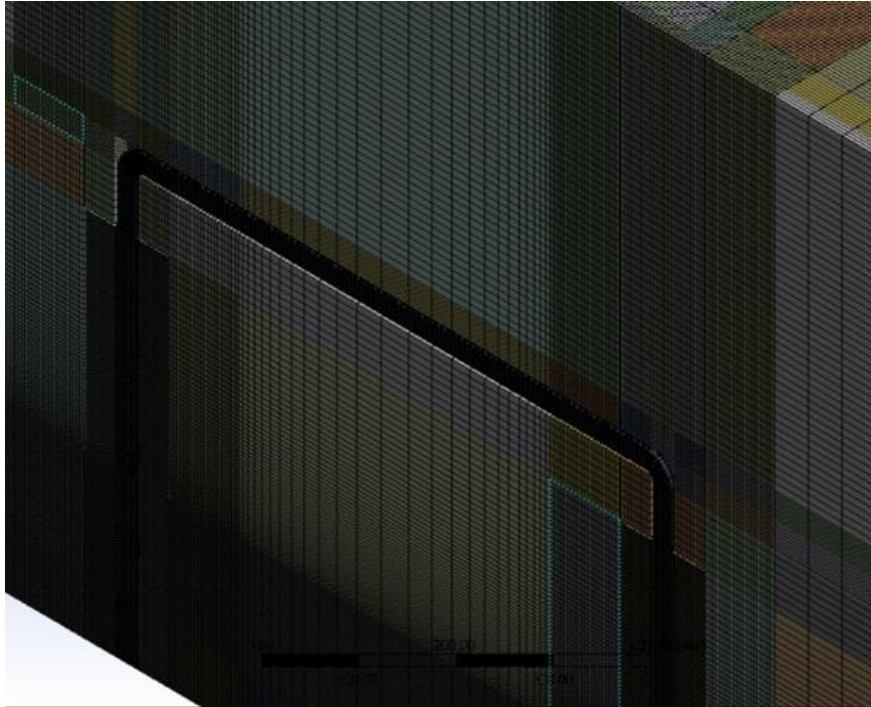
algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de  $N$  ecuaciones y  $N$  incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

Postproceso, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el postproceso se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.(Bern & Eppstein, 1995).

## **2.2 Método de volúmenes finitos**

Para realizar la simulación en Fluent ANSYS del comportamiento hidrodinámico del convertidor OWC MDS es necesario tener conocimiento en el método de los volúmenes finitos (Finite Volume Method – FVM por sus siglas en inglés). Las ecuaciones de Navier-Stokes se desarrollan para flujos en geometrías simples y para condiciones de trabajo ideales, lo que hace al método de volúmenes finitos imprescindible para casos en que se tiene una geometría más compleja.

Este método consiste en:

*Figura 2.**Modelo CAE desarrollado en el software ANSYS 2020 R1.*

a. Descomponer el dominio en volúmenes de control; En este paso se realiza una partición del volumen continuo que se tomó como dominio en varios fragmentos pequeños los cuales se denominan volúmenes de control como se muestra en la figura 2, con el fin de representar de manera acertada el comportamiento hidrodinámico del fluido.

b. Formular las ecuaciones integrales de conservación para cada volumen de control; Una vez realizada la descomposición del dominio se analiza cada uno de los volúmenes de control, las ecuaciones de conservación son descritas en forma integral para cada uno de los volúmenes. La ecuación de transporte general queda descrita de la siguiente manera:

*Ecuación 1.*

*Ecuación general de transporte*

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_v \rho \varphi dV + \oint_A \rho V \varphi dA = \oint_A \Gamma V \varphi dA + \int_v S_\varphi dV$$

*Nota: Adaptado de (Osses, 2016)*

“Dónde:  $\varphi$  es la variable transportada a través de un medio de densidad  $\rho$  y constante de difusión  $\Gamma$  que se mueve a una velocidad  $\mathbf{V}$  con un término fuente  $S_\varphi$ ”. (Osses, 2016)

- c. Aproximar numéricamente las integrales;
- d. Aproximar los valores de las variables en las caras y las derivadas con la información de las variables nodales;
- e. Ensamblar y resolver el sistema algebraico obtenido.

### Medio Continuo

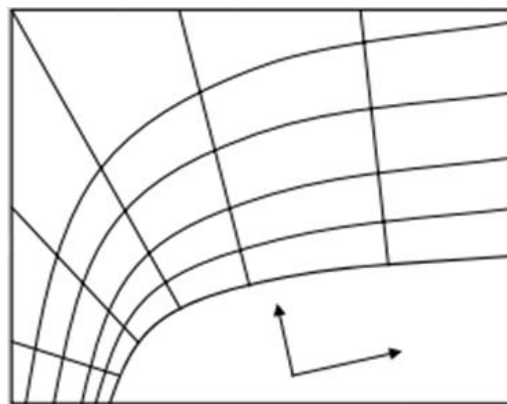
El medio continuo es una conceptualización matemática que considera que todo sólido es homogéneo y que las propiedades físicas de este sólido se preservan independientemente de la porción de este sólido que se analiza.

### 2.3 Tipos de mallas

En los fenómenos físicos las ecuaciones diferenciales pueden ayudar a deducir que ocurre en el espacio y el tiempo. Cuando se habla de discretizar un medio continuo en el espacio entra el concepto de mallado y en lugar de decir que este es un medio discretizado, se habla es de una geometría. Se puede discretizar un medio continuo de distintas maneras y estas son de dos formas son: mallado estructurado y no estructurado.

Malla estructurada. Una malla estructurada se define como aquella donde cada elemento de control tiene el mismo número de elementos vecinos, la solución de las mallas estructuradas comúnmente se implementa mediante el método de las diferencias finitas. En las estructuradas, que ofrecen ciertas ventajas sobre las no estructuradas, cada vértice de la malla excepto en las fronteras, tiene un vecino isomorfo.(Vega Molero, 2011)

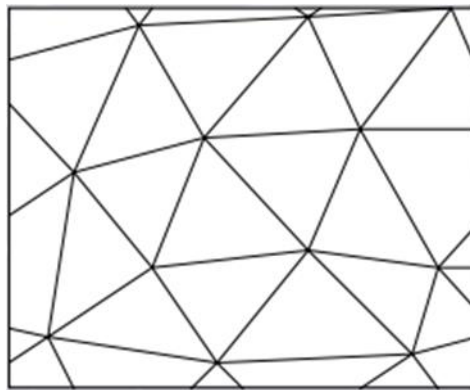
*Figura 3.*  
*Malla estructurada*



Malla no estructurada. En una malla no estructurada estos tienen diferentes números de elementos adyacentes, el método de los elementos finitos se usa generalmente para la solución de las mallas no estructuradas. Los elementos finitos tienen una inherente habilidad para tratar con mallas no estructuradas, estas permiten fácilmente refinamientos locales para dar resoluciones altas en regiones de interés, sin perder precisión.

*Figura 4.*  
*estructurada*

*Malla no*



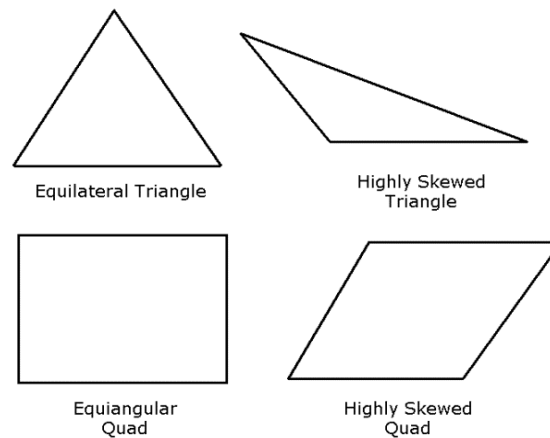
### 2.3.1 Parámetros de calidad del mallado

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados. Existen distintos parámetros de calidad a la hora de realizar un mallado, pero hay parámetros especiales que son de gran importancia y se van a tener en cuenta para este proyecto. Algunos de los parámetros que tienen relevancia en cuando a la calidad de la malla son: asimetría u oblicuidad (SKEWNESS), ortogonalidad (ORTHOGONAL QUALITY) y finalmente aspecto de radio (ASPECT RATIO), entre otros.

**Oblicuidad (Skewness):** “Este parámetro permite determinar qué tan cerca se está de una cara ideal. La asimetría u oblicuidad es una de las principales medidas de calidad para una malla. La asimetría determina qué tan cerca de lo ideal (es decir, equilátero y equiángulo) está una cara o una célula” (sharcnet, s.f.)

*Figura 5.*

*Triángulos y cuadriláteros ideales y sesgados*



*Nota: ANSYS. Skewness [En línea]. Disponible en:*

*[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_skewness.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html)*

La **Tabla 1** enumera el rango de valores de asimetría y la calidad de celda correspondiente.

**Tabla 1.**

*Rango de valores de asimetría y la calidad de celda correspondiente.*

Valor de la asimetría	Calidad celular
1	degenerada
0.9 - <1	malo (astilla)

Valor de la asimetría	Calidad celular
0.75 - 0.9	pobre
0.5 - 0.75	justa
0.25 - 0.5	bueno
> 0 - 0.25	excelente
0	equilátero

*Nota: ANSYS. Skewness [En línea]. Disponible en:*

*[https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb\\_msh/msh\\_skewness.html](https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/wb_msh/msh_skewness.html)*

Se puede decir que, de acuerdo con la definición de asimetría, un valor de 0 indica una celda equilátera (mejor) y un valor de 1 indica una celda completamente degenerada (la peor).

**Ortogonalidad (Orthogonal Quality):** El rango de calidad ortogonal es 0-1, donde un valor de 0 es el peor y un valor de 1 es el mejor.

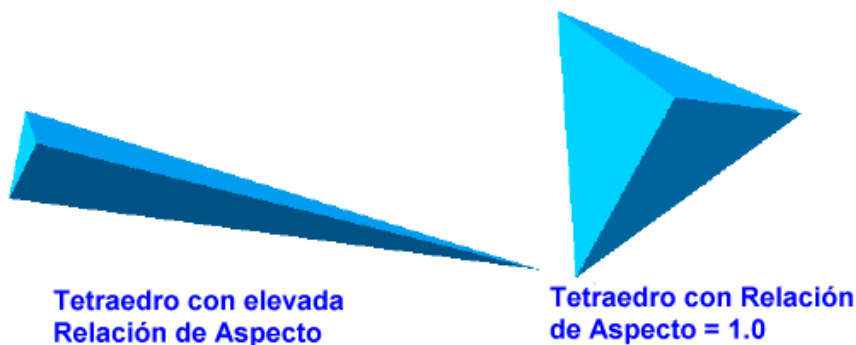
“La calidad ortogonal para las celdas se calcula utilizando el vector de cara normal, el vector desde el centroide de la celda hasta el centroide de cada una de las celdas adyacentes, y el vector desde el centroide de la celda hasta cada una de las caras, ilustran los vectores utilizados para determinar la calidad ortogonal de una célula” (sharcnet, s.f.)

**Aspecto de radio (Aspect Ratio):** El aspecto de radio de un elemento se define como la relación entre la arista más larga y la más corta colocadas desde un vértice a la cara opuesta normalizada con respecto a un tetraedro perfecto. Por definición:

La relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto es 1. La verificación de relación de aspecto supone que las aristas rectas se conectan con los cuatro nodos angulares. Dicha verificación es utilizada automáticamente por el programa para comprobar la calidad de la malla. (Solidworks simulation , 2016).

*Figura 6.*  
*relación de aspecto de un elemento tetraédrico*

*Ejemplo de la*



*Nota: SOLIDWORKS. Verificaciones de calidad de malla. [En línea]. Disponible en:*  
*[http://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c\\_Mesh\\_Quality\\_Checks.htm](http://help.solidworks.com/2016/spanish/solidworks/cworks/c_Mesh_Quality_Checks.htm)*

## **2.4 Teoría del oleaje**

Para poder analizar el oleaje es preciso utilizar un modelo que lo represente. Este modelo debe predecir con fiabilidad el comportamiento de las olas generadas en el canal, y debe además ser sencillo. Para ello son necesarias ciertas simplificaciones de la realidad. Cabe destacar que en este proyecto se va a usar la teoría no lineal, no se usa la teoría lineal del oleaje porque en el canal se usan aguas intermedias. La teoría lineal del oleaje tiene un determinado rango de aplicación que depende de la amplitud, del periodo y del calado de la ola. Fuera de este rango las simplificaciones producen bastante error y se hace necesario emplear teorías no lineales del oleaje.

En la Figura 7, permite seleccionar la teoría no lineal del oleaje más conveniente a partir de la relación  $d/L$  y  $d/gT^2$  siendo:

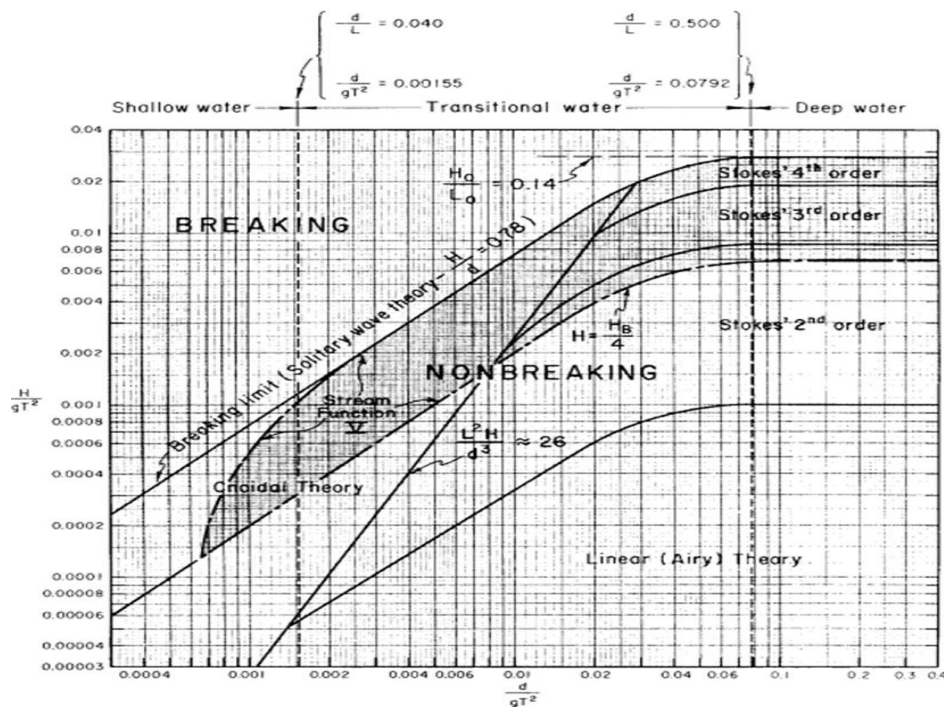
L: la longitud de la ola en metros

T: el periodo de la ola en segundos y

d: la profundidad del canal de oleaje en metros

g: la aceleración de la gravedad en  $m/s^2$

Figura 7.  
Regiones de validez para varias teorías del oleaje.



Nota: Adaptado de (Department of the army, 1984).

### 2.4.1 Teoría no lineal del oleaje

Teoría de ondas de airy de primer orden, se aplica a ondas de pequeña amplitud en rangos de profundidad poco profundos a profundos, y es de naturaleza lineal.

Las teorías de ondas de Stokes de orden superior, que se aplican a ondas de amplitud finita en rangos de profundidad de líquido intermedios a profundos, y son de naturaleza no lineal.

Teorías de ondas Cnoidales / Solitarias de orden superior, se aplican a ondas de amplitud finita en rangos de profundidad poco profundos, y son de naturaleza no lineal.

Superposición de ondas lineales, se utiliza para generar diversos fenómenos físicos como interferencias, betas, ondas estacionarias y ondas irregulares.

Espectros de onda de cresta larga / corta, se utilizan para modelar ondas aleatorias no lineales en rangos de profundidad de líquido intermedios a profundos basados en una función de distribución de energía de las olas.(Fluent Ansys Help, 2020)

## **2.5 Clasificación de los dispositivos de conversión de energía del oleaje**

Los distintos tipos de convertidores de energía de oleaje (Wave Energy Converters, WECs) que permiten la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas son muchos, esto debido a que este tipo de energía renovable es una de las más estudiadas en la actualidad. De esta manera para clasificar o distinguir los distintos dispositivos WEC que existen hasta hoy se pueden clasificar en dos grupos: a) Por su localización y b) Por el tipo de conversión y forma de operación.

Por su localización: De acuerdo a este grupo, se pueden distinguir dos subgrupos que son:  
1) dispositivos WEC de aguas someras y 2) dispositivos WEC de aguas profundas

Una de las principales características obvia de los dispositivos de aguas someras, es que los costos de producción y mantenimiento son menores comparados con los dispositivos de aguas profundas. Estos se ubican principalmente en la zona de rompiente. Sin embargo, estos dispositivos se ven limitados por el potencial de energía que ofrece esta zona. (Sandoval, 2018)

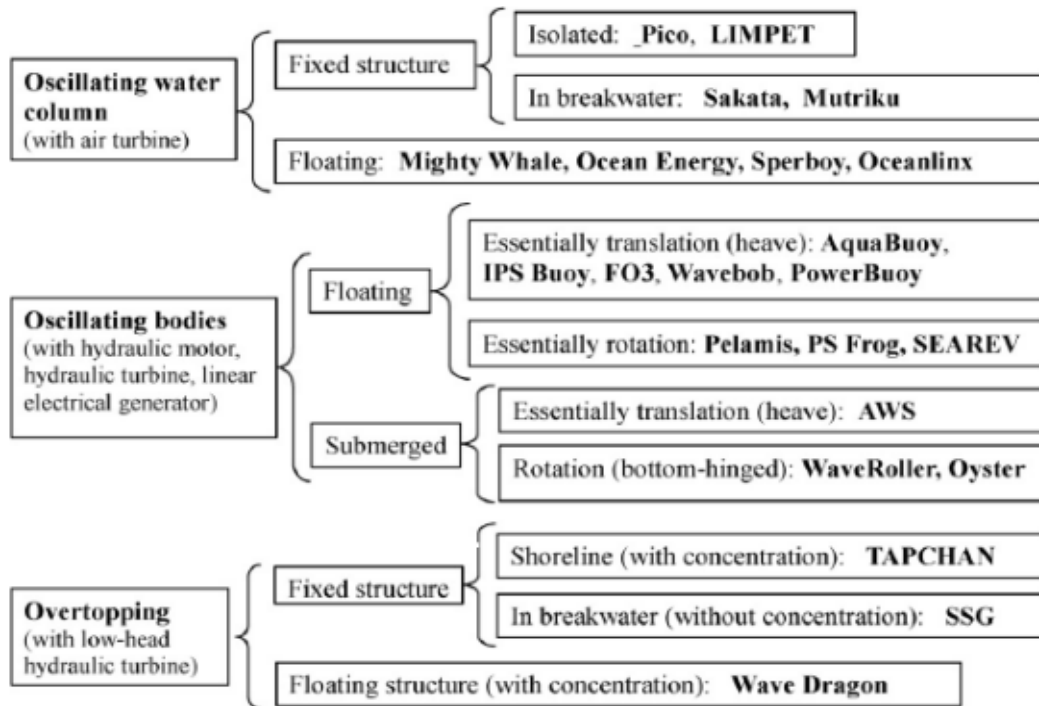
En cuanto a los dispositivos de aguas profundas todo es diferente y las dificultades en el mantenimiento, construcción e instalación requieren de equipo sofisticado y de mayor envergadura lo que significa directamente mayor costo de producción, además en aguas profundas el potencial energético del oleaje es también mayor lo que deriva en dispositivos de dimensiones mayores en comparación con los dispositivos de aguas poco profundas.(Sandoval, 2018).

Tipo de conversión: Esta es quizás el tipo de clasificación más importante o predominante de la que se destaca los convertidores tipo atenuador, surge wave, presión diferencial, punto de absorción rebases de agua, pelamis(UK), spar buoy(UK), wave dragon(DK), Oceanolix(AU) y el que empleó en este proyecto, el convertidor de oscilación de columna de agua.

Muchos autores clasifican los dispositivos dependiendo de su localización con respecto a la costa (somera o profunda) o por su método de absorción. En la , se tiene una clasificación tomada de la revisión realizada por Falcão en 2010 la cual describe las diferentes categorizaciones antes mencionadas y los dispositivos propuestos de cada una de las clasificaciones.

Figura 8.

Clasificación de los diferentes tipos de dispositivos de absorción de energía del oleaje basados en su funcionamiento. (Falcão, 2010)



## 2.6 Tecnología OWC

En la tecnología OWC, no son las olas las que mueven las turbinas directamente, sino una masa de aire comprimido que estas empujan. Se trata de una estructura generalmente ubicada en un rompeolas, cuya parte superior forma una cámara de aire (de ahí la masa comprimida), y cuya parte inferior está sumergida en el agua. De esta manera, la turbina aprovecha el movimiento provocado por la ola tanto cuando viene como cuando se va, y el generador doblemente alimentado (tanto por el rotor o parte móvil como por el estator o parte fija) al que está acoplada inyecta la energía en la red.

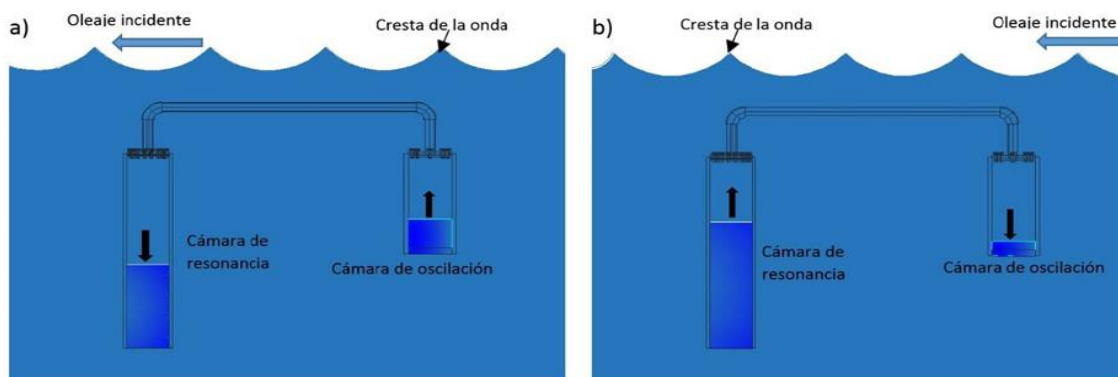
### 2.6.1 Funcionamiento del dispositivo OWC-MDS

El funcionamiento del dispositivo se presenta en dos etapas, la primera a) representa el momento en el que la cresta de la onda incidente esta justo encima de la cámara de oscilación por lo tanto al aumentar el nivel superficial la presión dinámica aumenta y genera una fuerza en dirección a la superficie que tiene que ser equilibrada por el cambio en el nivel de agua en la cámara de resonancia, la cámara de oscilación al tener mayor sección transversal tendrá un movimiento vertical menor ya que la fuerza vertical generada será mayor.

Cuando el oleaje avanza y la cresta este sobre la cámara de resonancia b) se produce el mismo efecto de aumento de presión, esta vez se verá afectada la cámara de resonancia con lo cual la fuerza y el nivel será mayor en esta cámara, provocando la disminución del nivel en la cámara de oscilación. Los cambios internos del nivel de agua inducidos por el oleaje provocaran un flujo de aire en el interior del sistema, este flujo cambiara de dirección en función a la oscilación de las columnas de agua.

*Figura 9.*

*Diagrama de funcionamiento del dispositivo OWC-MDS. (Sandoval, 2018)*



## 2.7 Ley de Betz

Para determinar el potencial energético extraído de las cámaras del WEC OWC MDS se utiliza la ley de Betz, la cual plantea que podemos aprovechar menos del 59% de la energía cinética del aire. (Dominguez Sandoval & Lopez González, 2018). Para calcular el coeficiente de potencia de Betz se utiliza la Ecuación 2.

*Ecuación 2.*

*Ecuación potencial energético de Betz.*

$$Ep = CP * \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * S * V^3$$

Cp: Coeficiente del potencial

$\rho$ : densidad

S: superficie por la cual se desplaza el fluido

V: velocidad del fluido al cubo

## 2.8 Estado del arte

En el estado del arte se busca analizar los distintos modelos numéricos y condiciones de frontera que se aplican en la simulación CFD para convertidores tipo columna de agua oscilante (OWC), así también, a partir de la investigación se realizó el acotamiento de un modelo numérico que permita el rediseño del tipo de convertidor OWC sumergido.

Como primer filtro, en la revisión realizada para cada artículo, se tuvo en cuenta, el tipo de oleaje, ya que, las olas pueden ser regulares (monocromáticas) o irregulares y su dominio puede ser en dos o tres dimensiones y el software que se empleó para llevar a cabo la simulación CFD; también se tuvo en cuenta las características del fluido como su densidad, la inmiscibilidad de este ya que en la mayoría de los artículos consultados existía una bifase aire-agua en los convertidores OWC, compresibilidad del fluido, entre otros. Las unidades de análisis fueron todos aquellos documentos sobre el tema, encontrados en las bases de datos SCIENCE DIRECT y ELSEVIER.

Como criterios de búsqueda, se incluyeron los siguientes descriptores: “model”, “OWC”, “converter”, “wave”, “tank”, “numerical”. Estos descriptores fueron combinados de diversas formas al momento de la exploración con el objetivo de ampliar los criterios de búsqueda.

Al realizar la búsqueda de los documentos, en cada una de las bases de datos, se preseleccionaron 15 artículos y 3 tesis (Horko, 2007) (Conde & Didier, 2011) (Finnegan & Goggins, 2012) (Gomes et al., 2012) (Bouali & Larbi, 2013) (Zaouf et al., 2014) (Isoldi et al., 2015) (Kamath et al., 2015) (Russo et al., 2015) (Zabihi et al., 2015) (Kim et al., 2016) (Ribeiro et al., 2016) (Elhanafi, et al., 2017) (Elhanafi, et al., 2017) (Vyzikas et al., 2017) (Scarpetta, Gurnari, et al., 2017) (Scarpetta, Torresi, et al., 2017) (Elhanafi et al., 2018) (Filianoti et al., 2018) (Lee & Kim, 2018) ) (Marques Machado et al., 2018) (Sandoval, 2018) (Simonetti et al., 2018) (Park et al., 2018) (Windt et al., 2018) (Benreguig et al., 2019) (Conghao & Huang, 2019) (Dai et al., 2019) (Elhanafi et al., 2018) (Shalby et al., 2019) (Zabala et al., 2019) de los cuales se escogieron siete documentos, de acuerdo con los criterios de inclusión y exclusión. Para la organización de los documentos, se creó la Tabla 2, con los siguientes campos (categorías de análisis): Autor, año, título del artículo o tesis, el tipo de oleaje, comportamiento en el tiempo, número de fases presentes

en el modelo, características de los fluidos y software en el que se realizó la simulación. Una vez organizada la información, se realizó el análisis de cada uno de los modelos numéricos y se procedió con el acotamiento del modelo físico que se muestra en la Tabla 3, el cual se utilizará para selección del modelo numérico de unos de los artículos o la construcción de un modelo numérico que cumpla con las características necesarias para llevar a cabo simulaciones bastante aproximadas al modelo físico. Las principales condiciones que se tendrán en cuenta para seleccionar el modelo numérico serán el tipo de oleaje (monocromático), comportamiento en el tiempo (transitorio), número de fases presentes en el modelo (bifase, agua-aire), características de los fluidos (inmiscibles, turbulento e incompresibles) y el software en el cual se realizaran futuras simulaciones, que en nuestro caso es el software ANSYS 2020 R1.

**Tabla 2.**

*Tabla comparativa de los modelos numéricos seleccionados.*

<b>Autores y año</b>	<b>Artículo o tesis</b>	<b>Tipo de oleaje</b>	<b>Comportamiento en el tiempo</b>	<b>Número de fases en el modelo</b>	<b>Características de los fluidos</b>	<b>Simulación</b>
Conghao Xu, Huang Zhenhua. (2019)	Three-dimensional CFD simulation of a circular OWC with a nonlinear power-takeoff: Model validation and a discussion on resonant sloshing inside the pneumatic chamber(Conghao & Huang, 2019)	Regular(monocromático), dominio de las ondas en 3D  Turbulento	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Densidad uniforme  Inmiscibles	OPENFOAM (biblioteca dinámica de fluidos computacional, para el modelo numérico basado ecuaciones de RANS para flujo incompresible)

Liercio Isoldi, Mateus Gomes, M. Letzow, Luiz A. O. Rocha. (2015)	3D numerical analysis about the shape influence of the hydro-pneumatic chamber in an oscillating water column (OWC)(Isoldi et al., 2015)	Regular (monocromático), Metodología numérica en 3D	Transitorio	Bifásico (aire-agua), priorizand o el flujo de aire en la cámara hidroneumática.	Inmiscibles e Incompresibles	ANSYS-FLUENT
Valeria Russo, Tommaso Crescenzi, Daniele Nicolini. (2016)	CFD analysis of devices in oscillating water column - OWC(Russo et al., 2015)	Se toma en cuenta dos tipos de ola: Wind Waves Long swells  Dominio de las ondas en 3D  Ondas con tendencia sinusoidal	Transitorio	Flujo isotérmico de dos fases (aire-agua)	Inmiscibles e incompresibles Turbulento	OPENFOAM (Interfoam solucionador)
Ahmed Elhanafi*, Gregor Macfarlane, Alan Fleming, Zhi Leong (2017).	Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter(Elhanafi, Macfarlane, et al., 2017)	Onda Regular (monocromático)	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Incompresible e inmiscible  Flujo turbulento k- $\omega$  Densidad uniforme	FLUINCO
Fábio M. Marques Machado, António M. Gameiro Lopes, Almerindo D. Ferreira. (2018).	Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank(Marques Machado et al., 2018)	Regular (monocromática)  Metodología numérica en 3D	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Se realizaron pruebas asumiendo flujo turbulento  Densidad uniforme  Viscosidad constante  Incompresible e inmiscible	ANSYS CFX
B.Bouali, S.Larbi. (2013).	Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy	Onda Regular (monocromática)	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Flujo laminar  Incompresible e inmiscible	ANSYS-ICEMCFD y CFX

Converter(Bouali & Larbi, 2013)						
Hyoungsu Park, Trung Do, Tori Tomiczek, Daniel T. Cox, John W. van de Lindt. (2018).	Numerical modeling of non-breaking, impulsive breaking, and broken wave interaction with elevated coastal structures: Laboratory validation and inter-model comparisons(Park et al., 2018)	Tres condiciones onda diferentes se probaron incluyendo ondas regulares (periódicas), irregulares (al azar), y transitorios (tsunamis, similares).  Las validaciones modelo de datos utilizan sólo las olas regulares.  Columna de agua oscilante en 3D.	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Incompresible e Inmiscible  Densidad uniforme  Turbulento	IHFOAM y ANSYS-FLUENT

**Tabla 3.****Modelo físico del WEC-OWC-MDS**

<b>Autores y año</b>	<b>Artículo o tesis</b>	<b>Tipo de oleaje</b>	<b>Comportamiento en el tiempo</b>	<b>Número de fases en el modelo</b>	<b>Características de los fluidos</b>	<b>Simulación</b>
Miguel Sandoval. (2018).	Análisis de desempeño de un dispositivo para la conversión de la energía del oleaje por oscilación de columna de agua (OWC)(Sandoval, 2018)	✓ Regular (monocromático)  ✓ Metodología numérica en 3D	Transitorio	Bifásico (aire-agua)	Inmiscibles  Flujo laminar.  El aire contenido dentro de las cámaras y el ducto es incompresible	Modelo Físico

La revisión permite acotar un modelo numérico que cumple con las condiciones que se tuvieron en cuenta en los experimentos del modelo físico, dado que no se encontró un artículo que

tomara en cuenta todas las consideraciones del modelo físico fue necesario extraer las condiciones de los artículos dando como resultado la construcción del modelo numérico que posteriormente se utilizara en la simulación del WEC-OWC-MDS.

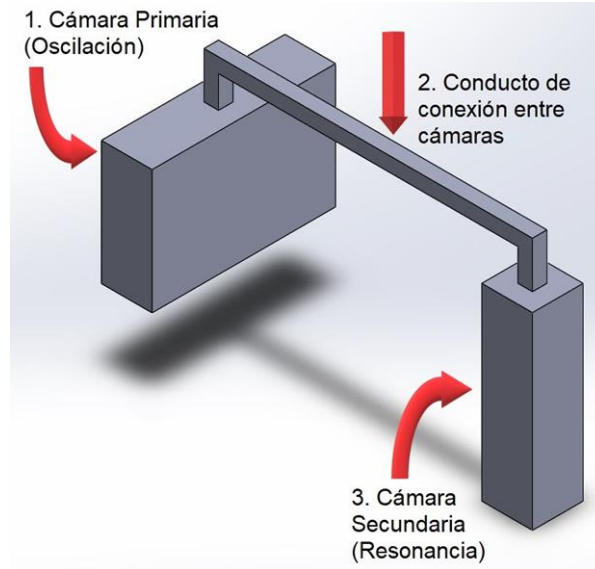
Se emplea FLUENT como la librería del software ANSYS en él que se realizara el estudio CFD del WEC-MDS.

En la literatura se recomienda que en caso de no tener una playa que amortigüe la ola al realizar las simulaciones controlar el tiempo de la simulación y aumentar tamaño de la malla al final del canal, para evitar el fenómeno de reflexión.

### 2.7.1 Dispositivo OWC-MDS

El convertidor se considera completamente sumergido y no cuenta con piezas móviles o un sistema de transformación. Al estar sumergido completamente en las cavidades de las cámaras existe una bifase agua-aire. En la Figura 10 se muestra el esquema del dispositivo denominado OWC-MDS.

*Figura 10.*  
*Diagrama del dispositivo OWC-MDS.*

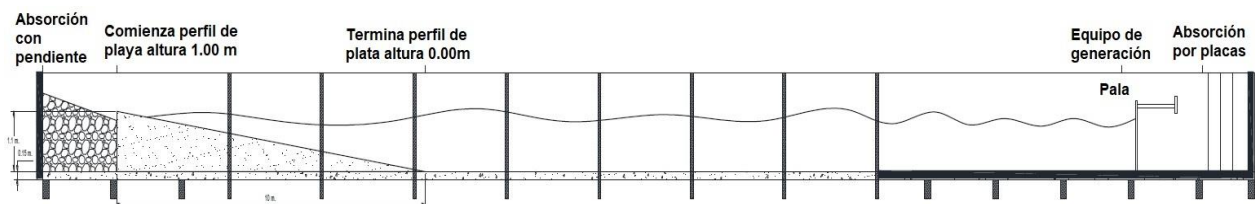


Las condiciones que se tomaron para realizar el experimento del modelo físico, se presentan en la Tabla 3. Los experimentos del modelo físico se llevaron a cabo en un canal de oleaje con las siguientes condiciones:

El canal de oleaje tiene 40 metros de longitud, 0.80 metros de ancho y altura de 1 metro. El canal funciona con una pala mecánica instalada en un extremo de este, existe también una playa colocada a una distancia de 25.3 metros con respecto al pie de playa y cara de la pala mecánica. Los experimentos se realizaron con una máxima altura de agua en el canal de oleaje fue de 0.70 metros, esto con la finalidad de no sobrepasar el nivel máximo de llenado del canal.

*Figura 11.*

*Esquema de la distribución del canal de oleaje del LIPC. (Sandoval, 2018)*



### 3. Sintonización del modelo físico en Ansys Fluent

En este apartado se busca obtener el comportamiento del experimento de laboratorio que realizó Miguel Sandoval, para tener un modelo numérico en el que se puedan estudiar diferentes escenarios en donde se varíe la geometría de las cámaras del WEC-OWC-MDS.

Para llevar a cabo el Benchmark con el modelo de experimentos de Sandoval se replicaron los siguientes escenarios en Ansys usando el solver de Fluent:

1. Escenario con periodo  $T= 1,5$  s y altura  $H= 15$  cm
2. Escenario con periodo  $T= 2$  s y altura  $H= 20$  cm

Se medirán los parámetros de presión y diferencia de alturas que se presenten en las cámaras oscilación y resonancia del wec, los cuales se compararán con los resultados mostrados en la tesis de Miguel Sandoval.

El ANSYS en sus variables de ingresos permite configurar longitud de onda de la ola y altura de la ola, por lo que se usa las ecuaciones de airy para olas intermedias, para calcular la longitud de onda que tenga en cuenta el periodo.

*Ecuación 3.*

*Ecuación de longitud de onda para aguas intermedias.*

$$\lambda = \frac{g * T^2}{2\pi} \operatorname{Tanh}\left(\frac{2 * \pi * d}{\lambda}\right)$$

En donde:

$T$ =Periodo [s]

$g$ = Gravedad en [ $m/s^2$ ]

$d$ = Profundidad [m]

$\lambda$ = Longitud de onda [m]

### 3.1 ¿Que es la simulación?

En el campo de la ingeniería, enfocada a la hidrodinámica marina, existe una base para el entendimiento de los procesos físicos que ocurren en el océano. Esta base se fundamenta en las mediciones en campo, análisis y conclusiones de los datos medidos y experimentación en laboratorio, lo que permite recrear ciertos escenarios simplificados de la realidad a escala reducida; y la modelación numérica, que usa las ecuaciones de transporte de los fluidos o las teorías de onda para simular eventos presentes en la naturaleza.(Euse, 2018)

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD es el área de conocimiento que trata sobre la simulación numérica de flujos fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados tales como reacciones químicas, combustión, Aero acústica etc. El CFD tuvo origen a partir de la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo fluido tienen origen en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos.

En este proyecto de investigación se estudiará el convertidor OWC-MDS sumergido en un canal de oleaje mediante una simulación que permita modelar el comportamiento de las cámaras de un convertidor de energía del tipo columna de agua oscilante mediante la dinámica de fluidos

computacional CFD, para lo cual se emplea la modelación numérica, utilizando las ecuaciones de gobierno para dar solución al modelo numérico propuesto.

La simulación consta de un pre-proceso, de un proceso y un post-proceso.

El pre-proceso consiste en la construcción de la geometría, el refinamiento de la malla, la generación del oleaje y establecer los parámetros del modelo físico que permitirá la discretización del modelo numérico, esto con el fin de obtener resultados con una mayor aproximación.

Se tomó como referencia el experimento del convertidor OWC sumergido propuesto por el autor Miguel Fernando Domínguez Sandoval de la Universidad Autónoma de México (UNAM)(Sandoval, 2018), en esta geometría acotada, se aprecia la bifase agua-aire del canal y el WEC-OWC que consta de una cámara de oscilación de mayor sección transversal que su otra cámara de resonancia, en donde ambas cámaras están unidas por un ducto por el que transita una masa de aire incompresible, en dicho ducto está contenida una turbina Wells que es la encargada de obtener al energía.

Una vez se haya creado la geometría se procede a la discretización del dominio, para esto se utiliza el mallador de Ansys Workbench, en donde se dio relevancia a los parámetros tales como skewness, oblicuidad y aspecto de radio, esto con el fin garantizar una malla funcional y de la que se obtengan resultados coherentes.

Para determinar la funcionalidad de la malla se realizó un estudio de independencia de malla en el cual se deben probar diferentes escenarios y estudiar los resultados que estos arrojen, con el fin de establecer las dimensiones de la geometría, el tamaño y el número de elementos que debe contener la malla, y de esta forma obtener resultados más aproximados y confiables.

También se consideró las condiciones de frontera del canal, las bifase agua-aire, las propiedades de los fluidos, el modelo de generación de ola, el orden de las ecuaciones de Navier Stokes que debe llevar el modelo numérico basado en la altura y la longitud de onda de la ola, la utilidad de la playa numérica, el balance masa y balance de energía, los esquemas de interpolación, entre otras.

En el proceso se establecen los puntos de estudio, los parámetros que se van a estudiar en la simulación, la graficas que debe arrojar la simulación, los intervalos en los que se va a guardar la simulación, los contornos visuales del modelo y el tiempo de simulación.

Finalmente, en el post-proceso se realizó el estudio de los resultados obtenidos en la simulación, efectuando un benchmark con los resultados de oscilación en la cámara del WEC y la variación de la presión en el interior de estas con el experimento de laboratorio propuesto por Miguel Sandoval.

### **3.2 Independencia de malla**

En el modelado de volúmenes finitos, una malla más refinada, por lo general, da como resultado una solución más precisa. Sin embargo, a medida que la malla se vuelve más refinada, el tiempo de cálculo aumenta y también el gasto computacional. Por este motivo se hace necesario realizar un estudio de independencia de malla con el objetivo de obtener una malla que equilibre de manera satisfactoria la exactitud y los recursos informáticos.

En este proyecto de investigación se describe cómo llevar a cabo un estudio de independencia de malla en forma manual y se aplica a todos los tipos de modelos. Se requieren los siguientes pasos básicos:

### 3.2.1 Selección del modelo numérico

Este apartado es muy importante porque se deben conocer las condiciones y propiedades de los fluidos (agua y aire) y también el tipo de oleaje que se va a simular. El acotamiento del modelo físico se efectuó gracias a datos de literatura.

Desde el punto de vista práctico de la Ingeniería de Costas, podríamos hablar de dos tipos de modelos: (1) aquellos que propagan oleaje monocromático (propagación de un tren de ondas de una única frecuencia y amplitud); y (2) los que propagan un espectro de energía asociado a un oleaje irregular aleatorio. El primer tipo de modelos generalmente se utiliza para caracterizar el patrón de oleaje en una zona de estudio, su bajo costo computacional permite propagar un alto número de trenes de ondas monocromáticas, las cuales se obtienen a partir de los regímenes medios direccionales del oleaje en el área. (Hidrográficas & Aquaterra, 2005)

Se escoge oleaje monocromático porque es más idealizado. Es una aproximación que se tiene en la que se supone que las olas que se generan todas están a la misma amplitud de onda y periodo, esto permite obtener resultados más aproximados a los del modelo de experimentos de Sandoval sin alejarse tanto de lo que es el comportamiento un oleaje real.

Se presenta una interfase bifase agua-aire tanto en canal como en el WEC, estas dos fases deben ser inmiscibles ya que las propiedades del aire son para una masa incompresible de aire seco dentro del WEC (Sin presencia de agua, calidad  $x=0$ ).

En la tabla 4, se muestran los parámetros y las aproximaciones que se usaran en la construcción del modelo numérico.

**Tabla 4.**

*Acotación del modelo numérico del WEC-OWC-MDS*

Tipo de oleaje	Comportamiento en el tiempo	Número de fases en el modelo	Características de los fluidos	Software
✓ Regular (monocromático)	✓ Transitorio	✓ Bifásico (aire-agua)	✓ Inmiscibles.	✓ Ansys Fluent
✓ Metodología numérica en 3D			✓ El aire contenido dentro de las cámaras y el ducto es incompresible	
			✓ Flujo laminar	

### 3.2.2 Selección del tamaño de malla

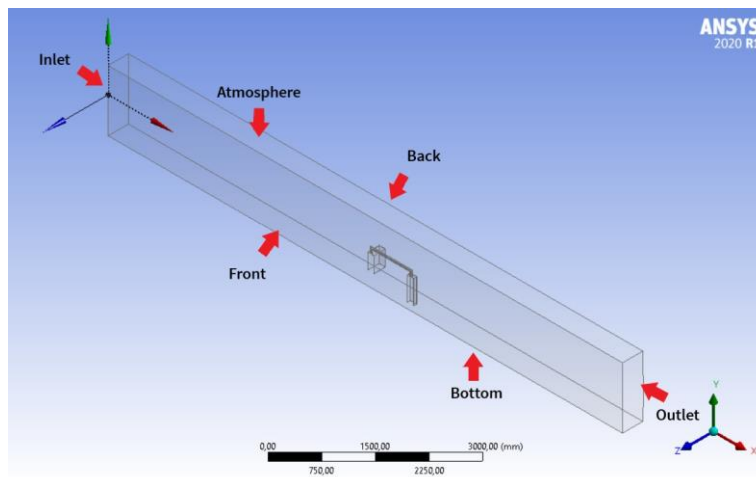
Inicialmente se busca un tamaño de malla en la que se pueda generar un oleaje estable que se propague a lo largo del canal y no presente reflexión por lo que se emplea el canal de oleaje sin el WEC OWC para efectuar estas simulaciones.

Se empezó generando oleaje en una malla de  $0.8 \times 1.2 \times 7$  metros. Es importante resaltar que gracias a la simetría que presenta el WEC OWC MDS y el canal de oleaje, se realizó un corte simétrico a lo largo de la dirección en la que se propaga el oleaje, arrojando unas dimensiones para el canal de  $0.4 \times 1.2 \times 7$ , sólo se simuló la mitad del canal. La condición de simetría se establece seleccionando la opción “symmetry” en la cara frontal del canal (front).

En la Figura 12, se puede observar el canal y el nombre que se le dio a cada condición de frontera.

*Figura 12.*

*Condiciones de frontera del canal de oleaje.*



Se empezó tomando solo el canal sin el WEC-OWC-MDS, con una malla burda (poco refinada), las condiciones que se consideraron en el “setup” de la interfaz de Fluent son las siguientes para un canal que inicialmente se tomó de 7 metros de largo ( $0.4 \times 1.2 \times 7$ ):

- ✓ Numero de olas: 1
- ✓ Altura de ola: 0,1 m
- ✓ Longitud de ola: 1,56 m

Se generó una sola ola ya que, al considerar más, el periodo de onda varía con cada ola que se propaga, por lo que para modelar un oleaje monocromático se debe considerar que todas las olas en curso tienen el mismo número de longitud de onda y esta consideración se cumple solo si se genera una sola ola.

Velocity inlet (Velocidad de entrada): Define el flujo que ingresa al dominio físico del modelo

- ✓ Bottom level: -0,7 m
- ✓ Free Surface level: 0 m
- ✓ Averaged flow Velocity Magnitude: 0 m/s

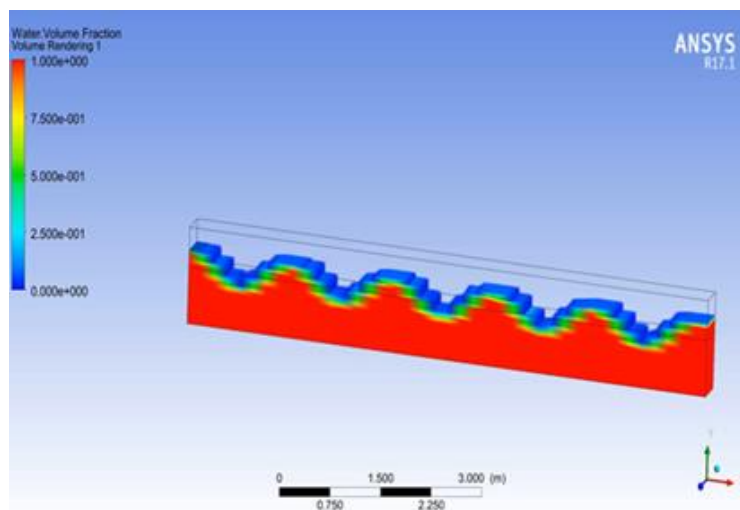
En esta frontera se establece la zona del oleaje, el número de olas, el orden de stokes que describe la cinemática del oleaje, la altura de ola y la longitud de onda de la ola. Se establece que el oleaje estará ubicado en una zona de aguas intermedias, teniendo en cuenta el periodo, la altura de la ola y la profundidad del canal, para establecer que orden de stokes es el adecuado para que la simulación sea convergente. Teniendo en cuenta los parámetros de altura de ola y longitud de onda en el apartado de “console” se usa el código **define/boundary-conditions/open-channel-wave-settings** que recomienda el orden de Stokes en el cual se puede correr la simulación, en el caso de estudio el código nos recomienda usar Stokes de tercer, cuarto o quinto orden.

- ✓ Navier-Stokes fifth order

Para establecer la generación del oleaje, al seleccionar la condición “wavy”, se produjo un error. La condición “wavy” es alejada de la realidad debido a que genera un tren de olas al instante en que empieza la simulación como se observa en la Figura 13.

*Figura 13.*

*Simulación en ansys fluent con la condición de generación de oleaje “wavy”*



Por consiguiente, se genera el oleaje usando la condición de pala “Flat” en la entrada del canal “Inlet”. Este método de generación del oleaje permitió la generación y propagación de la ola a condiciones específicas de periodo y altura.

- ✓ Solution Methods: Simple C

La corrección de asimetría SIMPLE C y PISO para mallas muy sesgadas si el valor (número de iteraciones) es mayor que 0. El valor predeterminado es 0 para SIMPLE C y 1 para PISO.

Run Calculation: En este apartado se establecen los parametros para iniciar las iteraciones)

- ✓ Time step size:0,01 s
- ✓ Number of time step: 3000

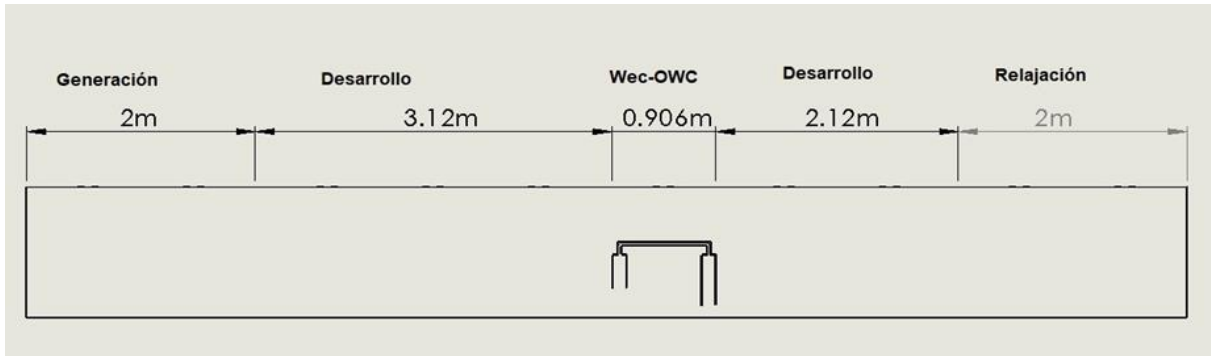
El número finalmente se seleccionó de “time step” final fue 3000, ya que, este tiempo permite que el oleaje se relaje y se estabilice.

Este canal a estas dimensiones presentó refracción a medida que se propagaba el oleaje, por lo que se consideró simular el comportamiento a estas mismas condiciones de oleaje con un canal de 8 metros de largo (malla de 0.4x1.2x8). El resultado fue positivo hasta que se aumentó el periodo a 2 segundos y la altura de la ola a 20 cm. Cuando se simuló a estas condiciones en el canal de oleaje de 8 metros se presentó reflexión, lo que llevó a un alargamiento del canal. La nueva medida del canal se elige respetando las siguientes zonas:

- ✓ Zona de generación de 2 metros.
- ✓ Zona de desarrollo de ola 3,12 metros.
- ✓ Zona del wec 0,906 metros.
- ✓ Zona de desarrollo posterior al wec 2,12 metros.
- ✓ Zona de relajación 2 metros.

La longitud final del canal es de 10.146 metros para unas dimensiones de (0.4x1.2x10.146), como se muestra en la Figura 14.

*Figura 14.*  
*Zonas de propagación del oleaje.*



La simulación que se llevó a cabo con esta malla (0.4x1.2x10.146), se efectuó incluyendo el WEC. Para separar la bifase agua-aire dentro del convertidor se selecciona una región en “adapt”, esto se explica de forma más detallada en el paso a paso presentado en los anexos. Las condiciones de operación para el escenario T2H20 fueron las siguientes:

Numero de olas: 1

- ✓ Altura de ola: 0,2 m;
- ✓ Longitud de ola: 4,624 m

Velocity inlet

- ✓ Bottom level: -0,7 m.
- ✓ Free surface level: 0 m

Navier-Stokes Fifth order

Solution Methods: Simple C = 0

Run Calculation:

- ✓ Time step size: 0,01 s
- ✓ Number of time step: 3000

Para disminuir aún más la reflexión de la ola se optó por una condición de playa al final del canal. La malla presentó un buen comportamiento durante la simulación, y con este tamaño de malla se redujo totalmente la refracción de la ola al final del canal.

Para tener una buena calidad de mallado es necesario que los valores de factores como skewness o asimetría (rango de 0 a 1, es bueno para el valor más cercano a 0), aspecto de radio y ortogonalidad (rango de 0 a 1, es bueno para el valor más cercano a 1) estén dentro de los rangos admisibles para cada uno de estos. Los factores anteriormente mencionados para cada una de las mallas están organizados en la tabla 5.

**Tabla 5.**

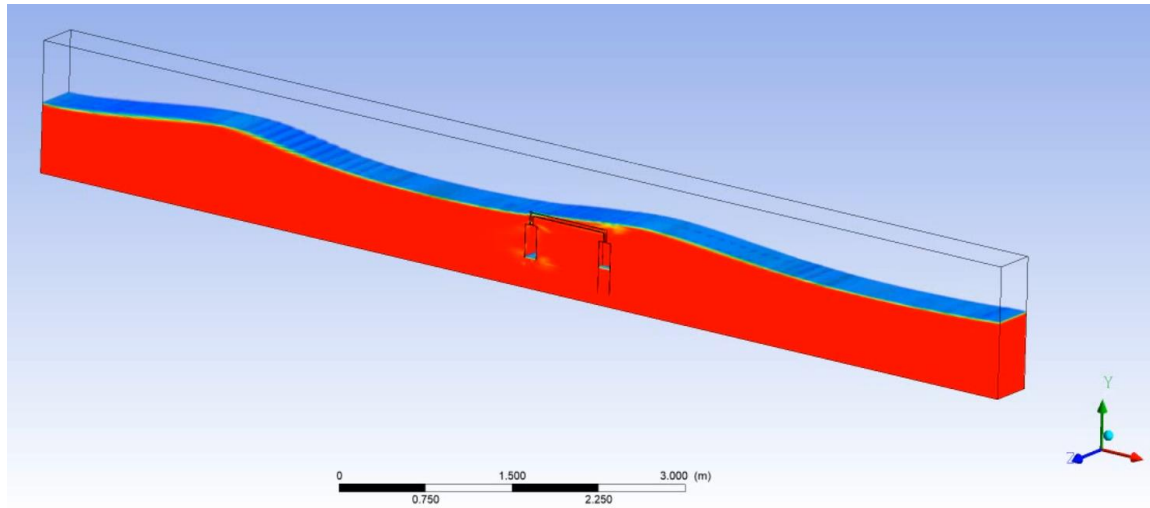
*Parámetros de calidad de las diferentes mallas simuladas*

	Malla canal 8m	Malla canal 10,146m	Malla canal 10,146m celdas del wec 3mm	Malla canal 10,146, celda del wec 5mm
Skewness	0,36315	0,35577	0,35577	0,35619
Aspect ratio	56,617	62,435	40	40
Orthogonal quality	0,93079	0,86898	0,87538	0,87983
Número de elementos	93222	372684	322590	253816

En la simulación del canal de 8 m de largo se maneja un tamaño de celda de 10 mm que está dentro de los parámetros que debe tener una malla que arroje resultados confiables, pero debido a la reflexión que se presentó en la simulación, se decide utilizar un canal de 10,146 m como se muestra en la Figura 15 y refinar la malla en regiones estratégicas que permiten mejores resultados. Estas zonas son: 10 mm encima de la superficie libre del canal, 10 mm por debajo de la superficie libre, 3 mm debajo de las cámaras del WEC. Estos refinamientos ayudan evitar errores durante el proceso de simulación. La primera malla del canal de 10.146 m tuvo un tamaño de celda de 2 mm dentro del wec lo que arrojó una malla densa y al realizar la simulación tuvo un buen comportamiento, pero el tiempo de simulación fue extenso, por lo que se realiza una nueva malla con un tamaño de celda de 4mm y se buscó disminuir del aspecto de radio para mejorar el comportamiento entre las celdas. Por último, se observó que se podría disminuir el costo computacional por lo que se usó una malla final que tiene un tamaño de celda de 5 mm en las cámaras del canal siendo este el tamaño utilizado para todas las cámaras. A lo largo de las diferentes simulaciones y escenarios varían el número de elementos de cada malla por los diferentes “refine” implementados para que las mallas fueran funcionales y cumplieran con los parámetros de calidad.

*Figura 15.*

*Imagen de la simulación en canal 10.146 m de longitud.*



### 3.3 Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un parámetro adimensional cuyo valor indica si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento.

Para efectos del cálculo se considera:

- $Re < 2100$  El flujo sigue un comportamiento laminar.
- $2100 < Re < 4000$  Zona de transición de laminar a turbulento.
- $Re > 4000$  El fluido es turbulento.(Anaya-Durand et al., 2014)

Se hace necesario determinar el número de Reynolds para el canal de oleaje, con el fin de realizar las simulaciones de los escenarios de estudio ya sea en régimen laminar o turbulento según lo que arroje dicho número. Se empieza hallando la longitud de la ola para un periodo de 2 segundos usando la Ecuación 3;

*Ecuación 3.*

Ecuación de longitud de onda para aguas intermedias.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)$$

Donde T=2 segundos es el periodo de la ola en segundos, g= 9,81 m/s<sup>2</sup> es la aceleración de la gravedad y d=0,7 metros es la profundidad del canal en metros. La longitud de ola para el caso de estudio fue de 4,624 metros y es dato de entrada para la ecuación 2 y posterior cálculo de la celeridad que lleva la ola en el canal. Se determina dicha celeridad de ola usando la Ecuación 4 :

*Ecuación 4.*

*Celeridad de la ola para aguas transicionales.*

$$Cs = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right).$$

*Nota: Extraída de (Gijón Mancheño, 2014)*

El valor para la celeridad de la ola es de 2,312 m/s. Se determina el radio hidráulico del canal usando la Ecuación 5;

*Ecuación 5. Radio hidráulico para canales abiertos de sección transversal rectangular.*

$$Rh = b\left(\frac{y}{b + 2y}\right)$$

*Nota: Extraída de (Garcia, 2016)*

En donde  $b=0,8$  es el ancho del canal y  $y=0,7$  es la profundidad de este mismo,  $R_h$  es el radio hidráulico calculado de  $0,2545$ . Se procede a determinar el número de Reynolds para el canal usando la Ecuación 6:

*Ecuación 6. Número de Reynolds.*

$$Re = \rho * Cs * 4 \frac{R_h}{\mu}$$

*Nota: Extraída de (Garcia, 2016)*

Donde  $\rho = 997,1 \text{ Kg}/\text{m}^3$  densidad del agua y  $\mu = 0,895 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$  es la viscosidad cinemática a la temperatura ambiente.

El número de Reynolds calculado fue de  $2622$ , que se encuentra en la zona de transición entre flujo laminar y turbulento, y para este caso de estudio se decide utilizar flujo laminar en el modelo numérico.

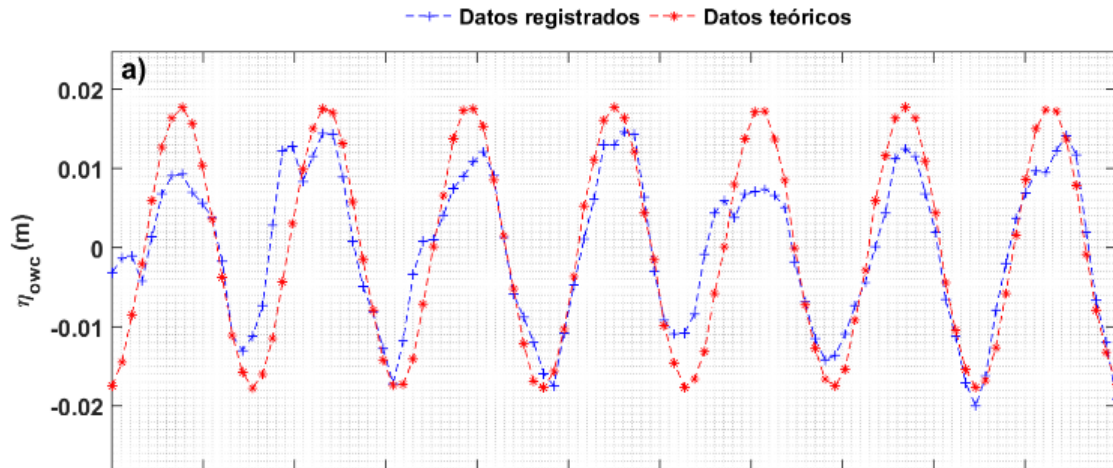
En los siguientes apartados se mostrarán los resultados obtenidos por Miguel Sandoval en el laboratorio y los resultados obtenidos en las simulaciones, posteriormente se procederá a comparar los resultados.

### **3.4 Escenario periodo $T=1.5s$ – altura $H=15\text{cm}$**

#### **3.4.1 Resultados del experimento de laboratorio T1.5-H15 por Miguel Sandoval**

Figura 16.

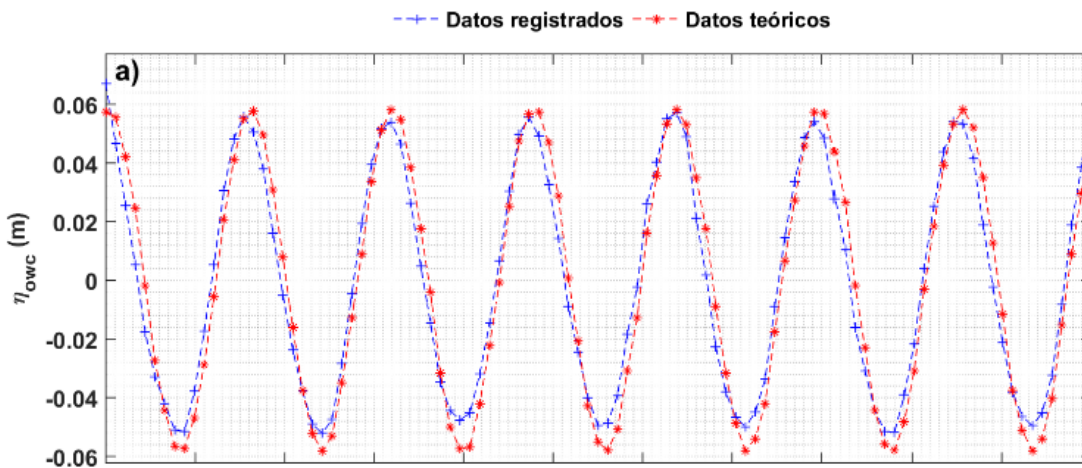
Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de  $H_s=15\text{cm}$  y  $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de oscilación.



Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 66.

Figura 17.

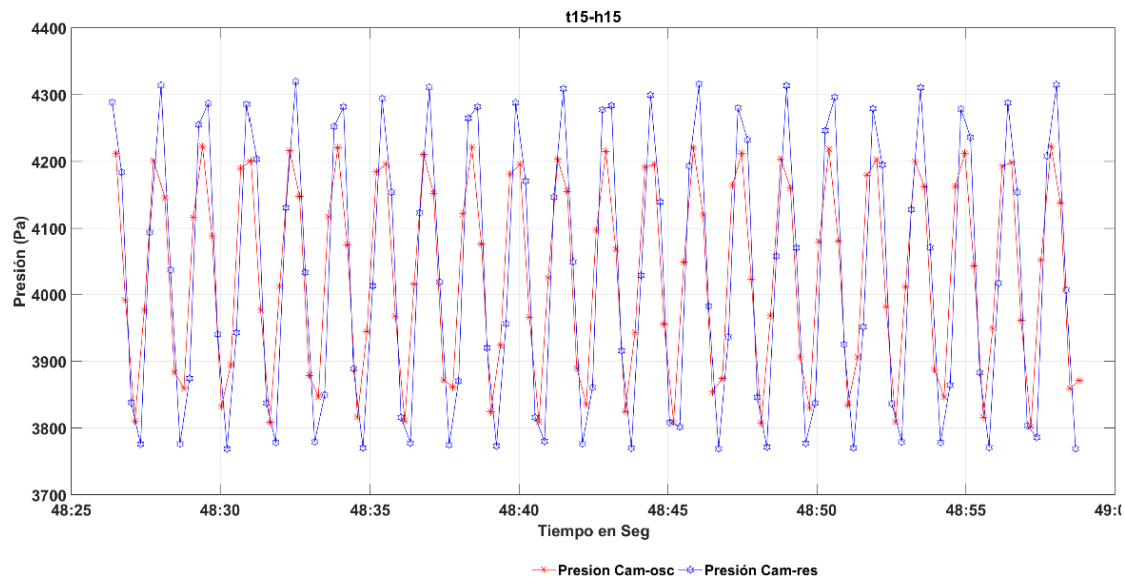
Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de  $H_s=15\text{cm}$  y  $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia.



Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 67.

Figura 18.

Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a las presiones de las cámaras condiciones de  $H_s=15\text{cm}$  y  $T= 1.5\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia.



*Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 71.*

Como se observa en las gráficas obtenidas en los experimentos realizados por Miguel Sandoval, para la prueba T1.5-H15. En la cámara de oscilación la variación de la columna en la cámara de oscilación es de 3.2 cm, y en la cámara de resonancia se presenta en una variación de 10.4 cm.

El delta de presión de aire para esta prueba fue de aproximadamente 500 Pa. Se puede observar la presión en la cámara de oscilación (rojo) y la cámara de resonancia (azul), alcanzando un máximo de 4300 Pa y un mínimo de 3780 Pa para este experimento.

### 3.4.2 Resultados simulación ansys fluent T1.5-H15

*Figura 19.*

*Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=15$  cm y  $T= 1.5s$*

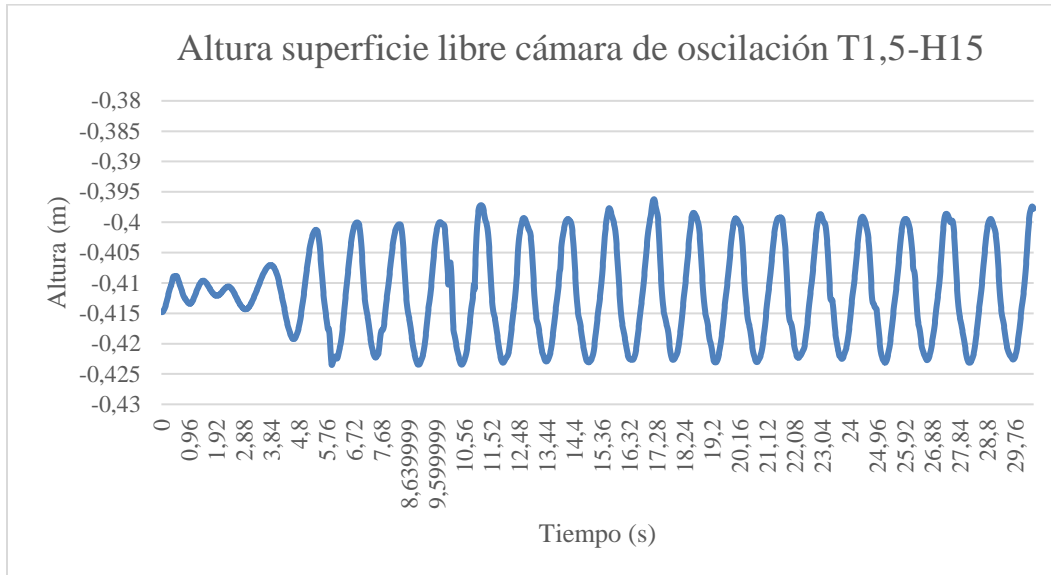
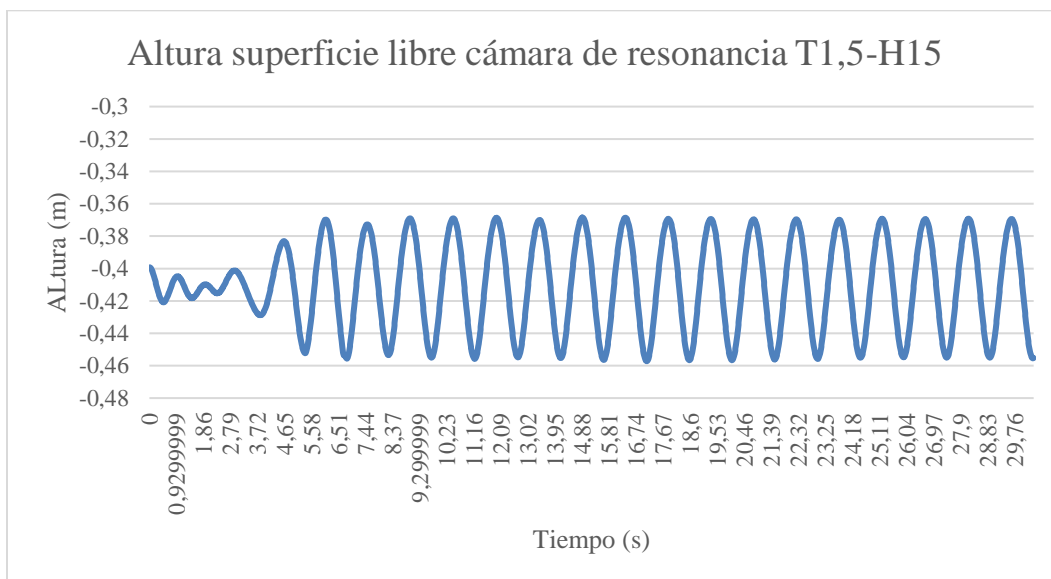


Figura 20.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=15$  cm y  $T=1.5$ s



Se puede observar que en la cámara de oscilación la variación de la superficie libre es de 2,8 cm teniendo un pico máximo de -0.395 m y un mínimo de -0.423 m, en la cámara de

resonancia la variación fue de 9,5 cm teniendo un pico mínimo de -0.46 m y un máximo de -0.365 m.

Figura 21.

Presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=15$  cm y  $T= 1.5$  s

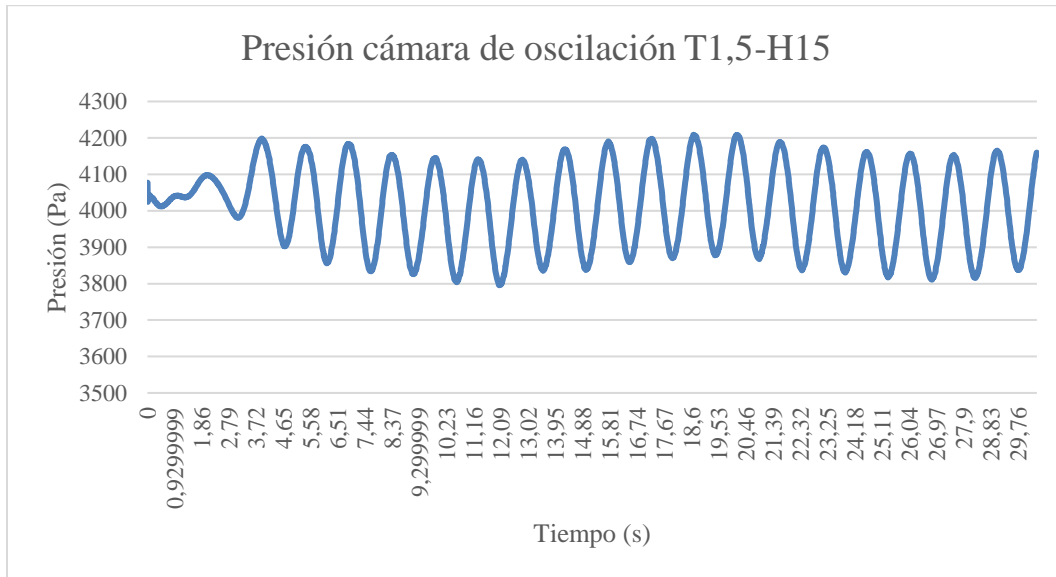
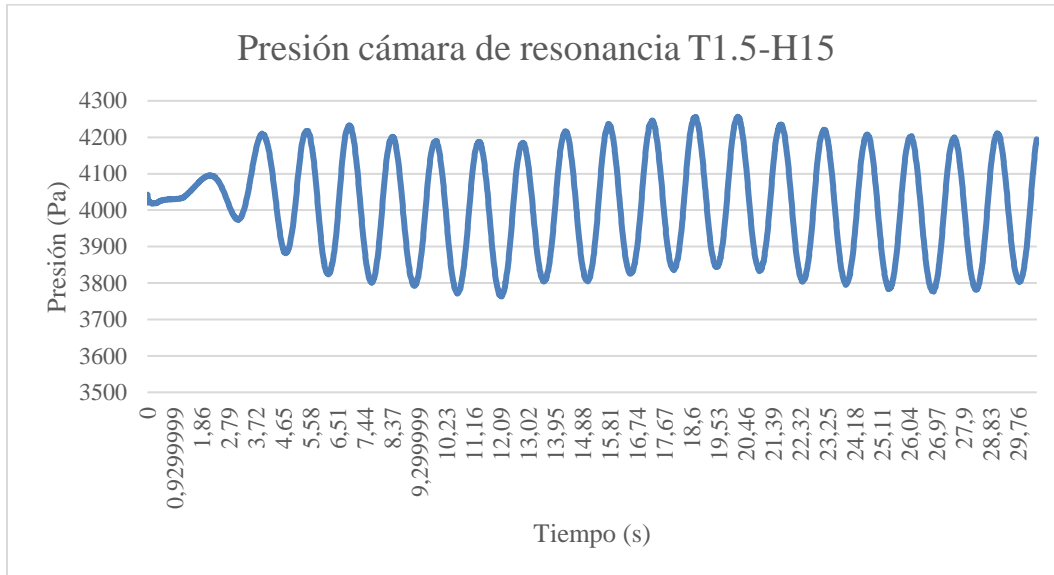


Figura 22.

Presión en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=15$  cm y  $T= 1.5$  s



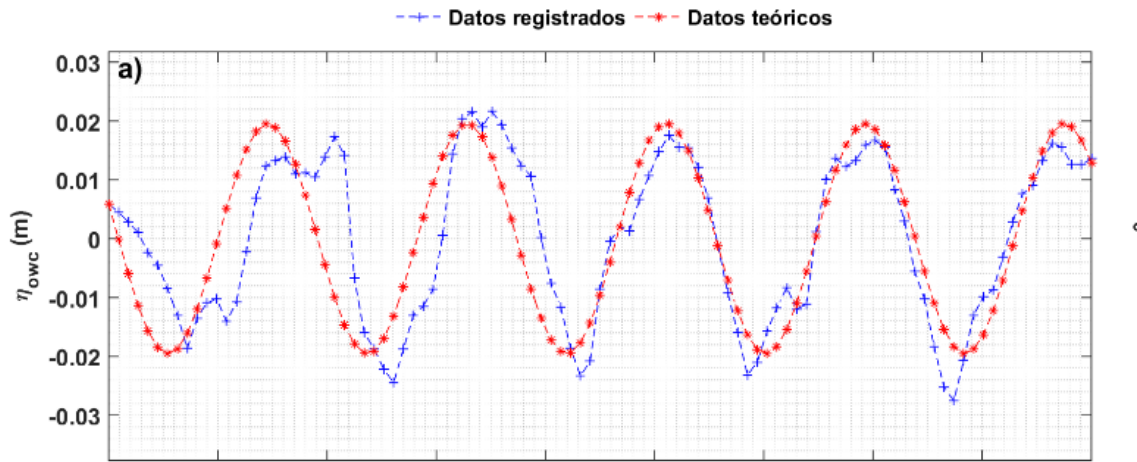
Se puede observar que en la cámara de oscilación un delta de presión de 340 Pa teniendo un pico máximo de 4186 Pa y un mínimo de 3846 Pa, en la cámara de resonancia la delta fue de 417 Pa teniendo un pico mínimo de 4249 Pa y un máximo de 3832 Pa.

### 3.5 Escenario periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$

#### 3.5.1 Resultados del experimento de laboratorio T2 -H20 por Miguel Sandoval

*Figura 23.*

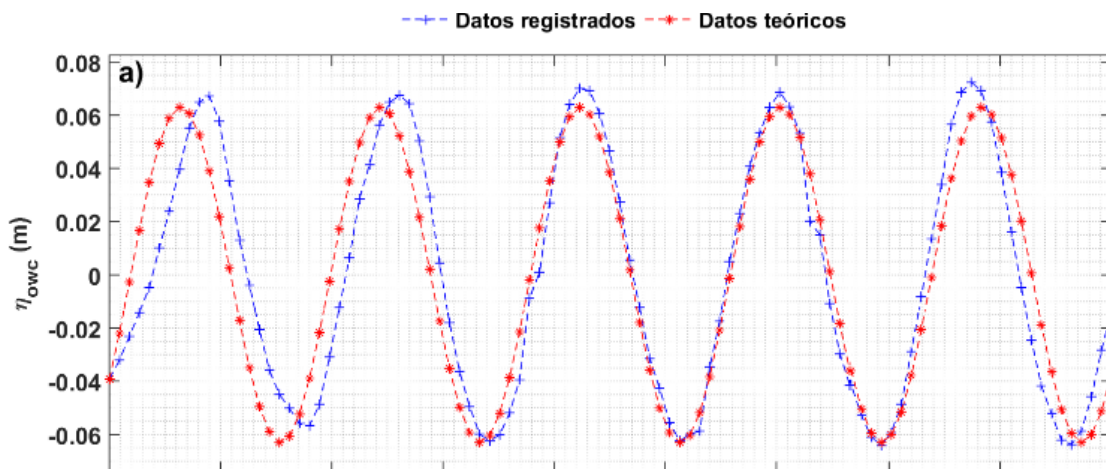
*Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de  $H_s=20\text{ cm}$  y  $T= 2s$ , registrados en la cámara de oscilación.*



Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 63.

Figura 24.

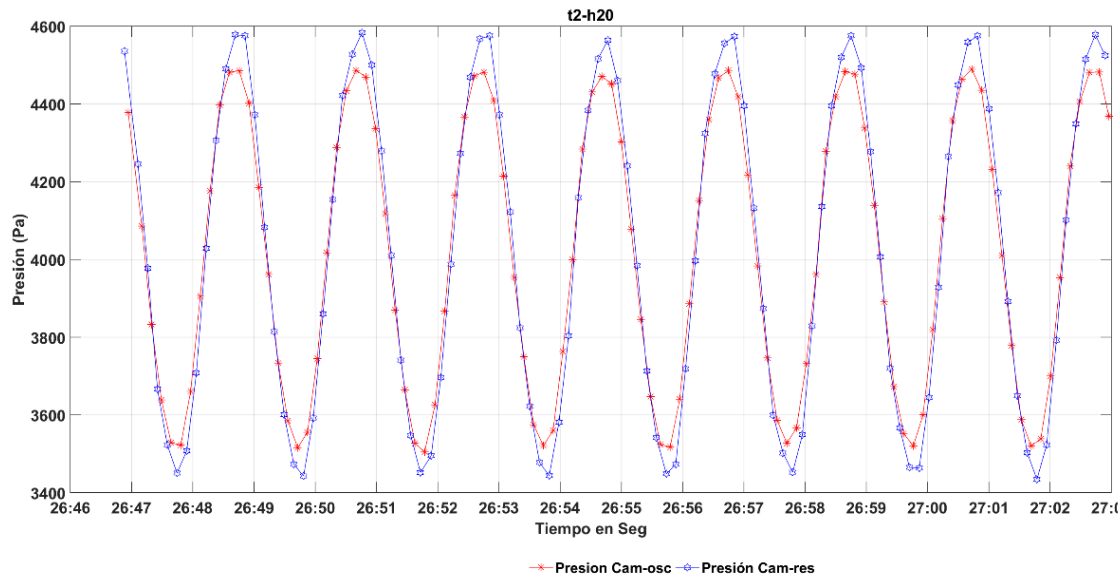
Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a la variación del nivel de agua con las condiciones de  $H_s=20\text{cm}$  y  $T= 2\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia.



Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 64.

Figura 25.

Resultado de la tesis del Miguel Sandoval correspondiente a las presiones de las cámaras condiciones de  $H_s=20\text{cm}$  y  $T= 2\text{s}$ , registrados en la cámara de resonancia.



*Nota: Adaptado de (Sandoval, 2018), pagina 70.*

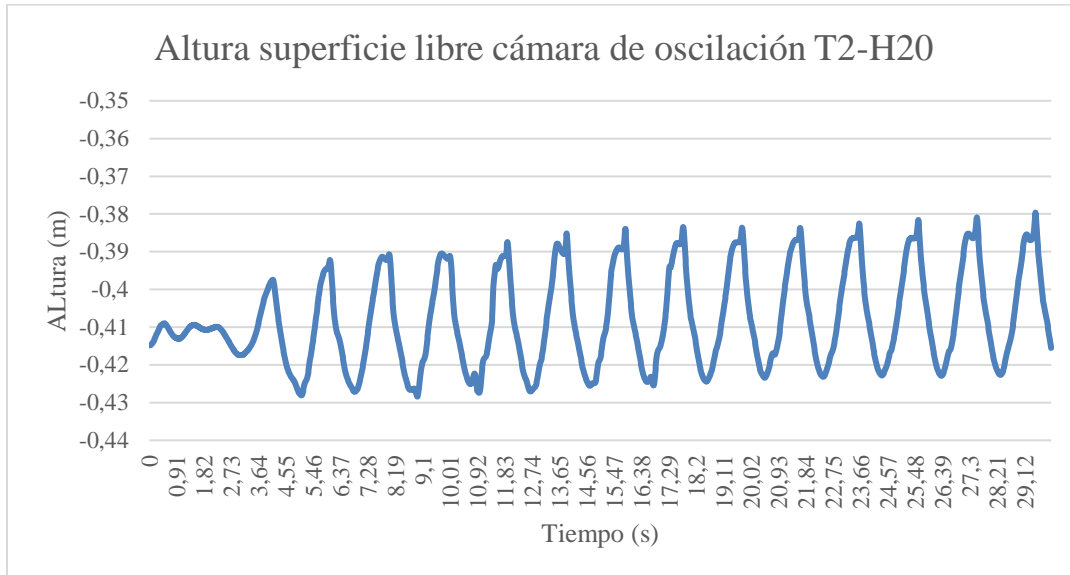
Para el experimento T2-H20. En la cámara de oscilación la variación de la superficie libre en la cámara de oscilación es de 1.9 cm, y en la cámara de resonancia se presenta en una variación de 6.2 cm.

El delta de presión de aire para esta prueba fue de aproximadamente 1015 Pa. Se puede observar que la presión en la cámara de oscilación alcanzo un máximo de 4528 Pa y un mínimo de 3513 Pa.

### 3.5.2 Resultados simulación ansys fluent T2-H20

*Figura 26.*

*Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$*



*Figura 27.*

*Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2$ s.*

Se puede observar que en la cámara de oscilación la variación del nivel de agua es de 4,1 cm teniendo un pico máximo de -0.381m y un mínimo de -0.422 m, en la cámara de resonancia la variación fue de 12,5 cm teniendo un pico mínimo de -0.468 m y un máximo de -0.343 m.

Figura 28.

Presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s

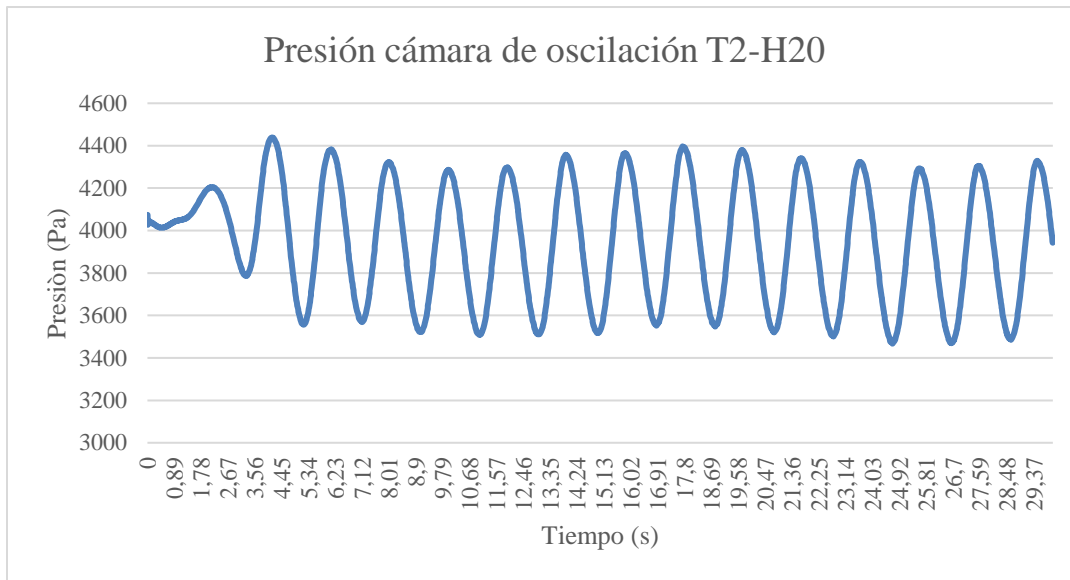
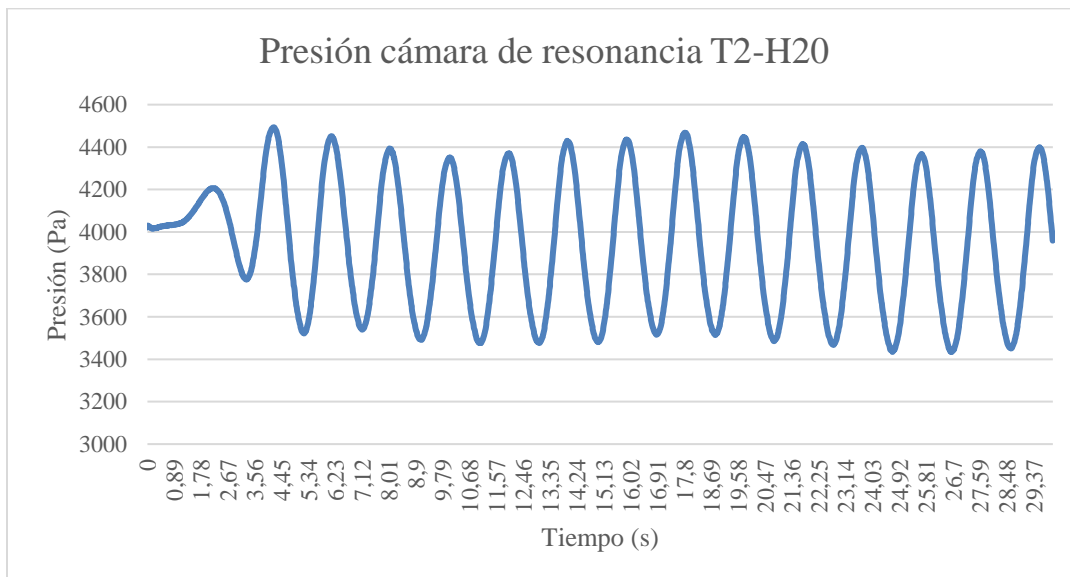


Figura 29.

Presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$ cm y  $T=2$  s

Presión en la



Se puede observar que en la cámara de oscilación un delta de presión de 843 Pa teniendo un pico máximo de 4391 Pa y un mínimo de 3548 Pa, en la cámara de resonancia la delta de presión fue de 959 Pa teniendo un pico mínimo de 3487 Pa y un máximo de 4446 Pa.

En las Tabla 6 y Tabla 7 se hace una recopilación de los resultados de las simulaciones y las pruebas de Laboratorio que realizó Miguel Sandoval, para posteriormente ser comparadas en la Tabla 8, en la cual también se calculó que hay presente entre los datos de laboratorio y los resultados obtenidos en las simulaciones.

**Tabla 6.**

*Resultados recopilados de los experimentos de Miguel Sandoval*

Prueba laboratorio		Cámara de oscilación	
Altura H (cm)	Periodo T (s)	Oscilación superficie libre (cm)	Delta presión (Pa)
15	1,5	3,2	410
20	2	4,4	1015
Prueba laboratorio		Cámara de resonancia	
Altura H (cm)	Periodo T (s)	Oscilación superficie libre (cm)	Delta presión (Pa)
15	1,5	10,4	500
20	2	13,2	1140

**Tabla 7.**

*Resultados recopilados de las simulaciones en ansys Fluent.*

Simulación		Cámara de oscilación	
Altura H (cm)	Periodo T (s)	Oscilación superficie libre (cm)	Delta presión (Pa)
15	1,5	2,8	340
20	2	4,1	843
Simulación		Cámara de resonancia	

Altura H (cm)	Periodo T (s)	Oscilación superficie libre (cm)	Delta presión (Pa)
15	1,5	9,5	417
20	2	12,5	959

Basado en los datos recopilados en la Tabla 7, se puede apreciar que la configuración de periodo  $T=2s$  y la altura  $H= 20$  arroja los mejores resultados, ceñido al comportamiento de los experimentos de laboratorio, con un oscilación de superficie libre en las cámaras de oscilacion y de resonancia de 4,1 cm y 12,5 cm respectivamente, y un delta de presión en las cámaras de oscilacion y resonancia de 843 Pa y 959 Pa respectivamente.

**Tabla 8.**

*Comparación entre resultados experimentales y simulaciones*

Cámara de oscilación				
Parámetro	Escenario	Prueba laboratorio	Simulación	Error %
Oscilación superficie libre (cm)	T1,5H15	3,2	2,8	12,5
Delta de presión (Pa)	T1,5H15	410	340	17,1
Oscilación superficie libre (cm)	T2H20	4,4	4,1	6,8
Delta de presión (Pa)	T2H20	1015	843	16,9
Cámara de resonancia				
Parámetro	Escenario	Prueba laboratorio	Simulación	Error %
Oscilación superficie libre (cm)	T1,5H15	10,4	9,5	8,7
Delta de presión (Pa)	T1,5H15	500	417	16,6
Oscilación superficie libre (cm)	T2H20	13,2	12,5	5,3
Delta de presión (Pa)	T2H20	1140	959	15,9

Se puede apreciar que las simulaciones realizadas en ANSYS FLUENT siguen el mismo comportamiento que las pruebas realizadas en el laboratorio, permitiendo establecer que la configuración  $T=2s$  y  $H=20cm$  es la que presenta la mayor oscilación de la superficie libre dentro de las cámaras y el mayor delta de presión en las cámaras del WEC-OWC-MDS con un error inferior al 20% como se puede apreciar en la Tabla 8.

#### **4. Análisis de sensibilidad**

Por medio de la simulación fluido dinámica (CFD) se presenta un análisis sobre sensibilidad de la influencia que tiene la altura de las cámaras en la oscilación de la superficie libre y el delta de presión dentro de las cámaras del WEC. Del capítulo anterior se selecciona la mejor configuración de periodo y altura de ola para llevar a cabo las simulaciones con estas condiciones de ola. Se realizaron 4 simulaciones variando las alturas de la cámaras, en el primer escenario se deja el wec intacto pero se sumerge, disminuyendo la altura de la cámara con respecto al fondo del canal, en el segundo escenario se decide alargar 3 centímetros la cámara de oscilación, en el tercer escenario se decide crea un pestaña de 3 cm de largo en las caras laterales y posteriores de la cámara de oscilación del wec quedando una hendidura en la cara frontal de este, para el 4 y ultimo escenario se crean 2 pestañas, de iguales dimensiones a las del escenario 3 pero una de estas en la cámara de oscilación y la otra en la cámara de resonancia del WEC.

En la Tabla 9, se muestran los parámetros de las mallas creadas para los diferentes escenarios que se simularon.

**Tabla 9.***Parametros de malla de los escenarios simulados en el analisis de sensibilidad*

	Canal 10,146	WEC sumergido	WEC con cámara de oscilación alargada 3cm	WEC con pestaña de 3 cm cámara de oscilación	WEC con pestaña de 3 cm cámara de oscilación y resonancia
Skewness	0,35619	0,35619	0,35619	0,35619	0,35619
Aspect ratio	40	40	40	40	40
Orthogonal quality	0,87983	0,87983	0,88125	0,9336	0,86399
Número de elementos	253816	256420	252422	264006	287890

#### 4.1 Escenario con WEC sumergido 3 cm periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$

En la Figura 30, se muestra que el WEC está sumergido 3cm más que la configuración original, quedando a una distancia de 37mm con respecto a la superficie libre; la configuración que simulo Miguel Sandoval en el laboratorio tiene una distancia de 7mm con respecto a la superficie libre.

*Figura 30.*

*WEC sumergido 3cm*

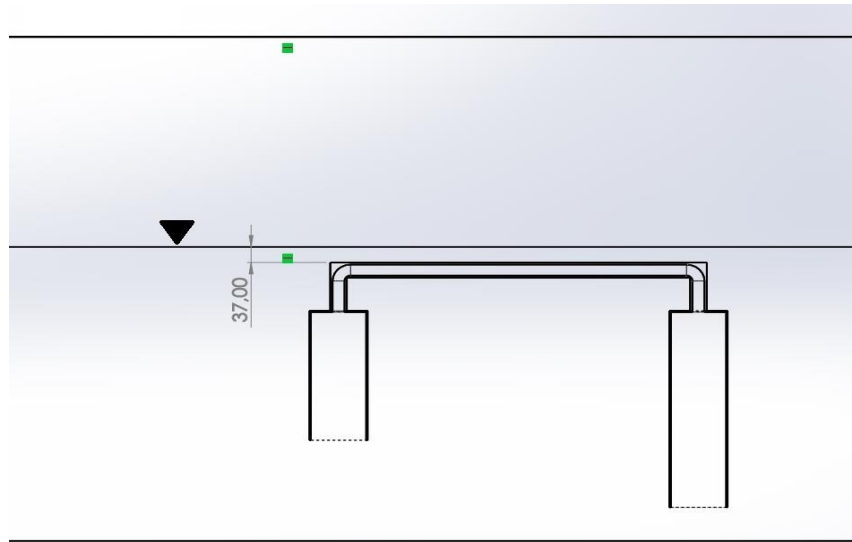


Figura 31.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$  con wec sumergido

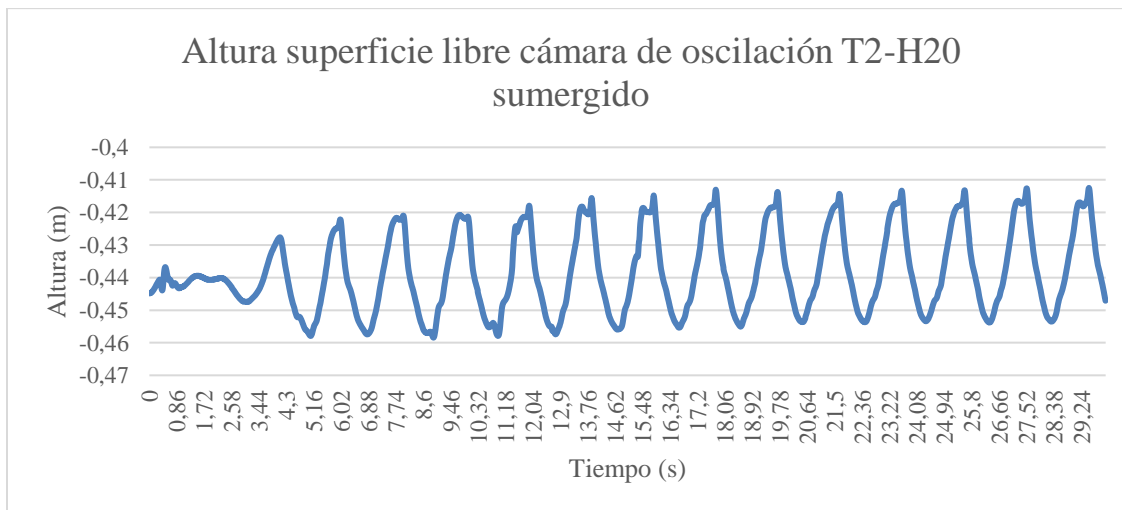


Figura 32.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$  con wec sumergido

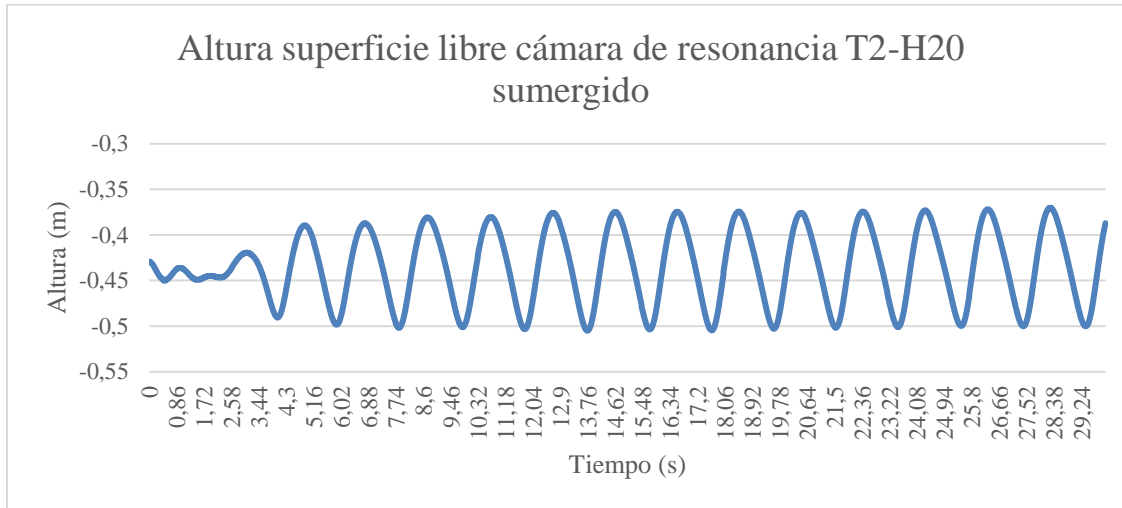


Figura 33.

Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2$  s con  $wec$  sumergido.

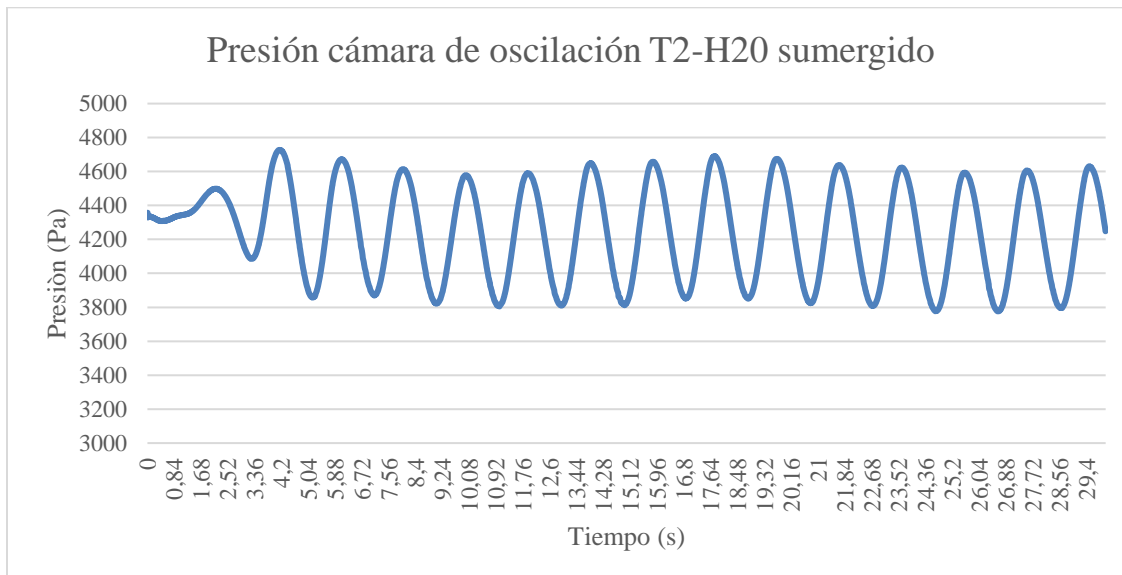
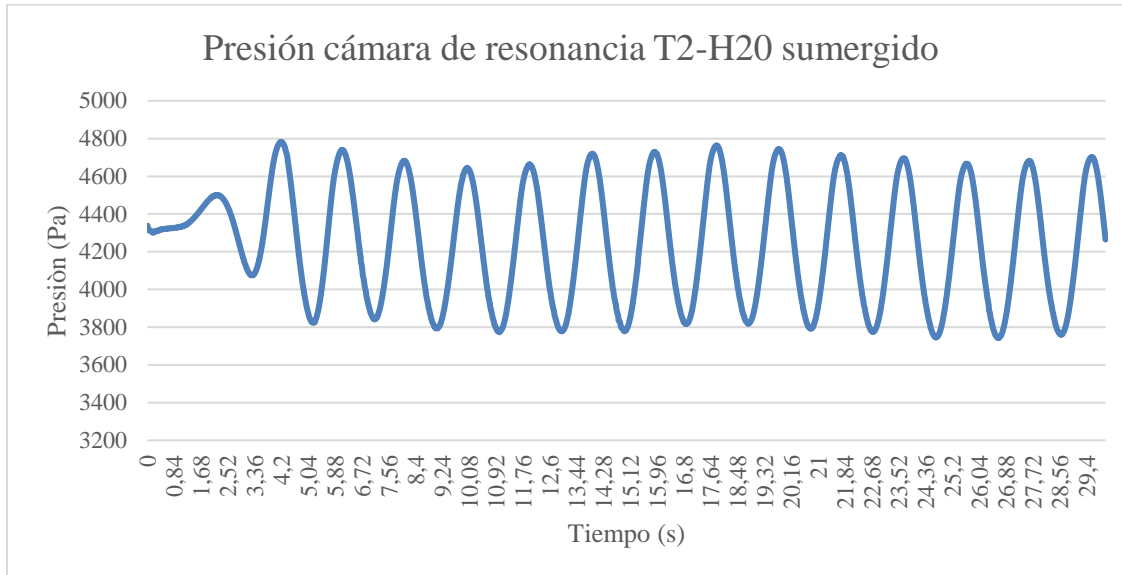


Figura 34.

Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2$  s con  $wec$  sumergido.



#### 4.2 Escenario con cámara de oscilación alargada 3 cm periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$

En la Figura 35, se observa que la altura de la cámara de oscilación se alargó 3cm quedando de 335 mm, puesto que la altura original de la cámara de oscilación del WEC es de 305mm.

*Figura 35.*

*WEC con cámara de oscilacion alargada 3 cm.*

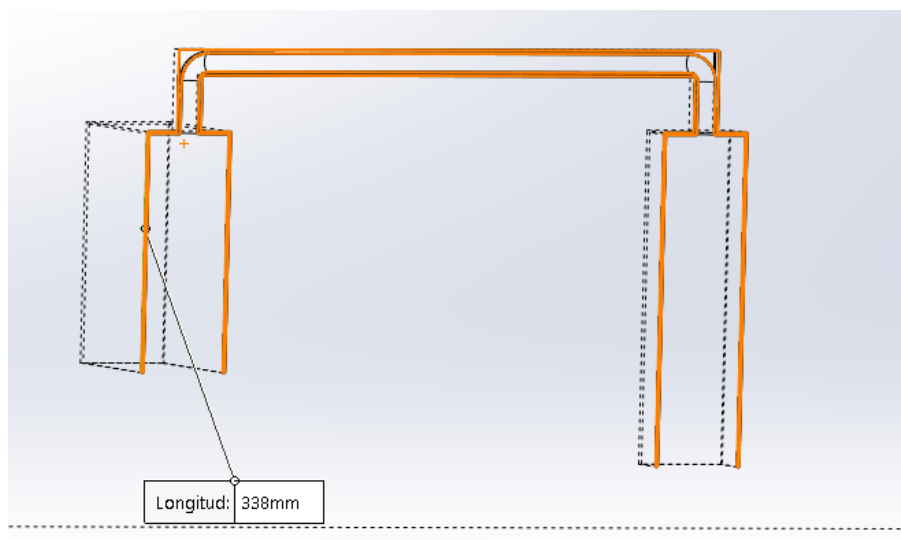


Figura 36.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$  con cámara de oscilación alargada 3cm.

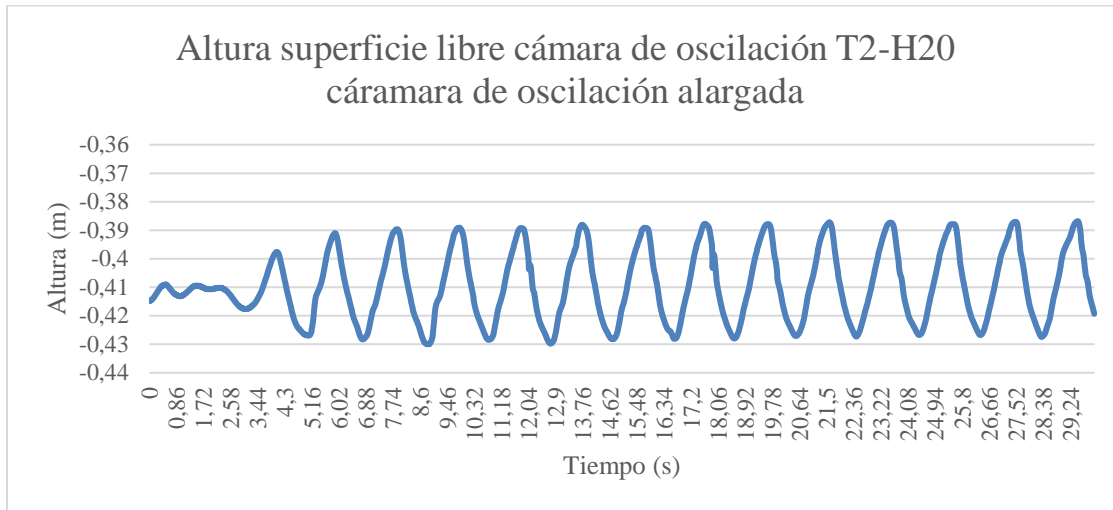


Figura 37.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$  con cámara de oscilación alargada 3cm

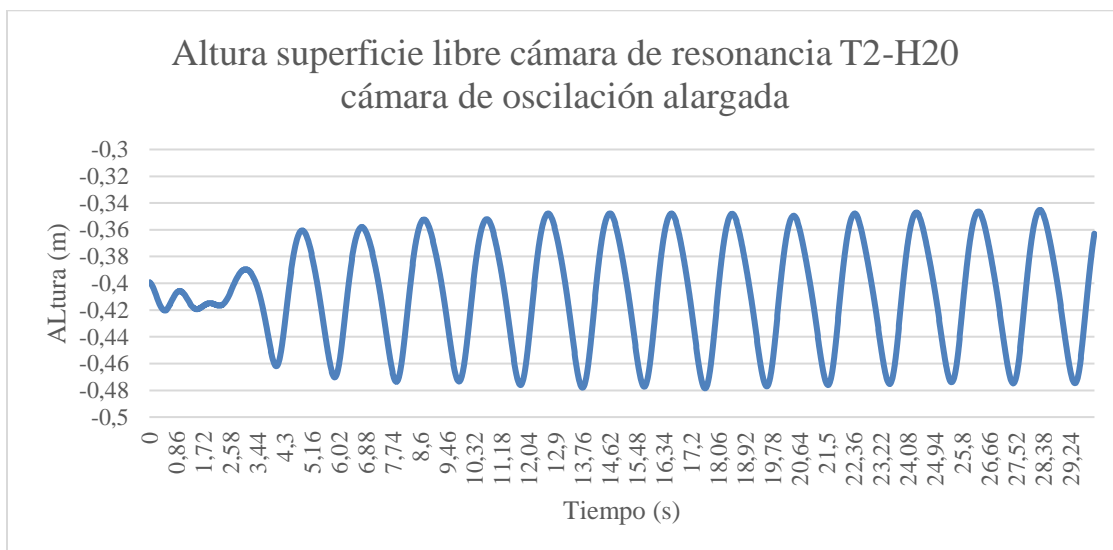


Figura 38.

Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T= 2s$  con cámara de oscilación alargada.

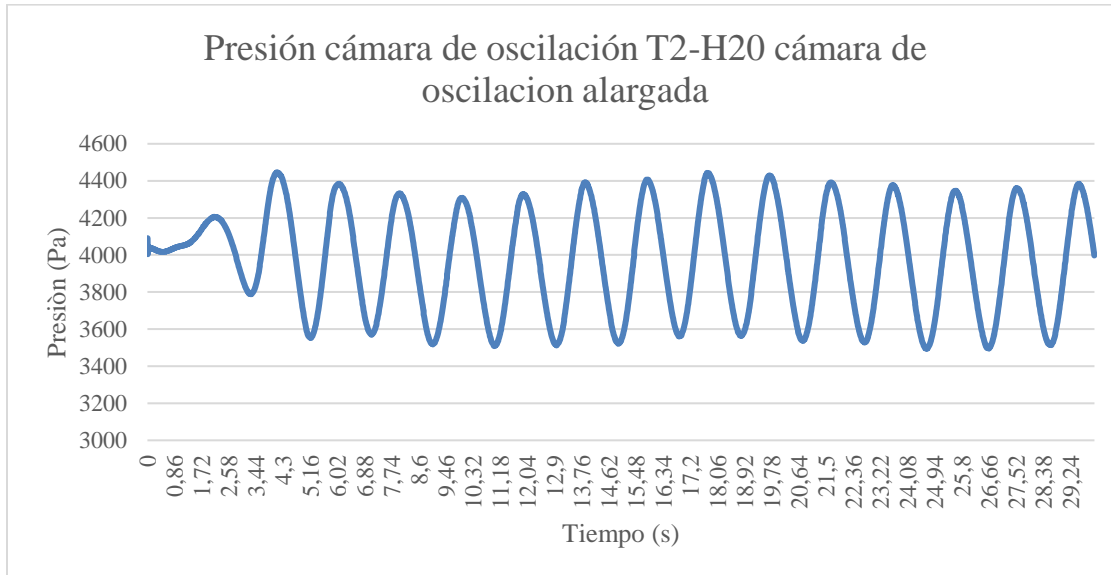
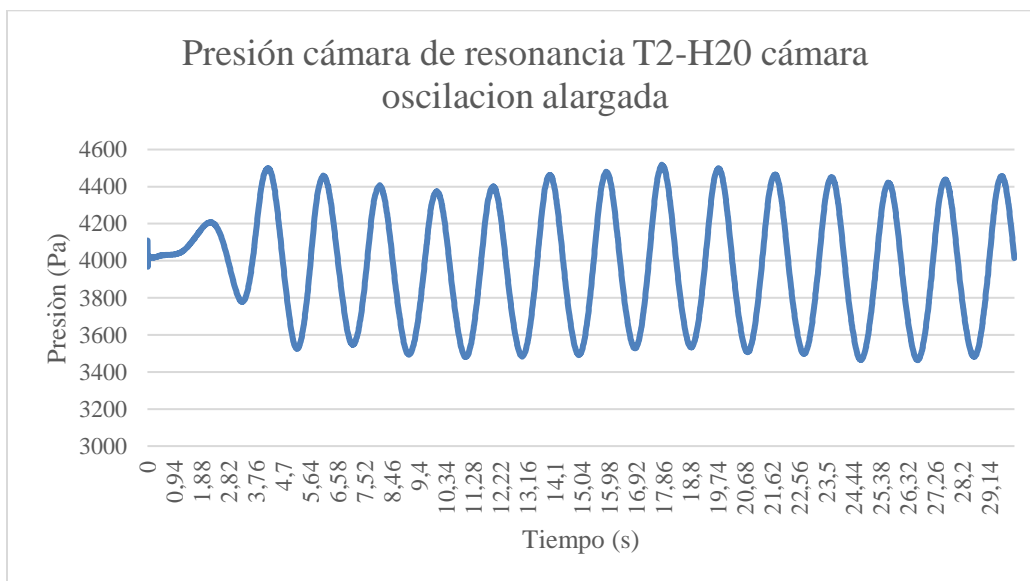


Figura 39.

Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con cámara de oscilación alargada.



#### 4.3 Escenario con pestaña de 3 cm en la cámara de oscilación periodo $T=2$ s- altura $H=20$ cm

La Figura 40, permite tener una mejor perspectiva de la pestaña de 3cm que se agrega en la cámara de oscilación.

Figura 40.

WEC con pestaña de 3cm en la cámara de oscilación.

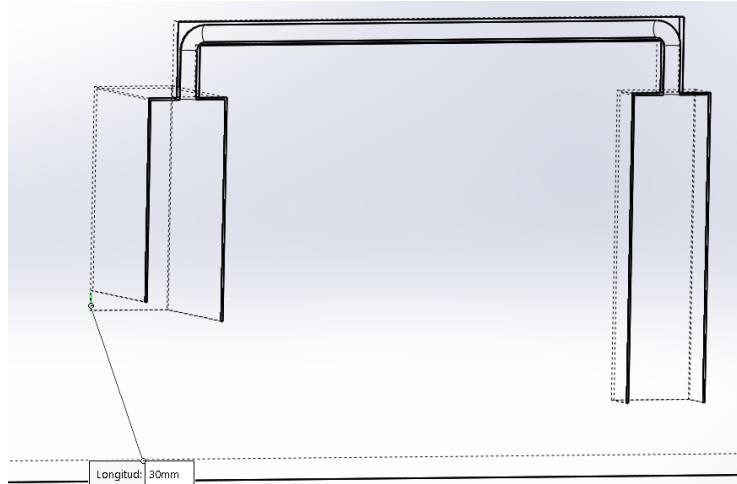


Figura 41.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en la cámara de oscilación.

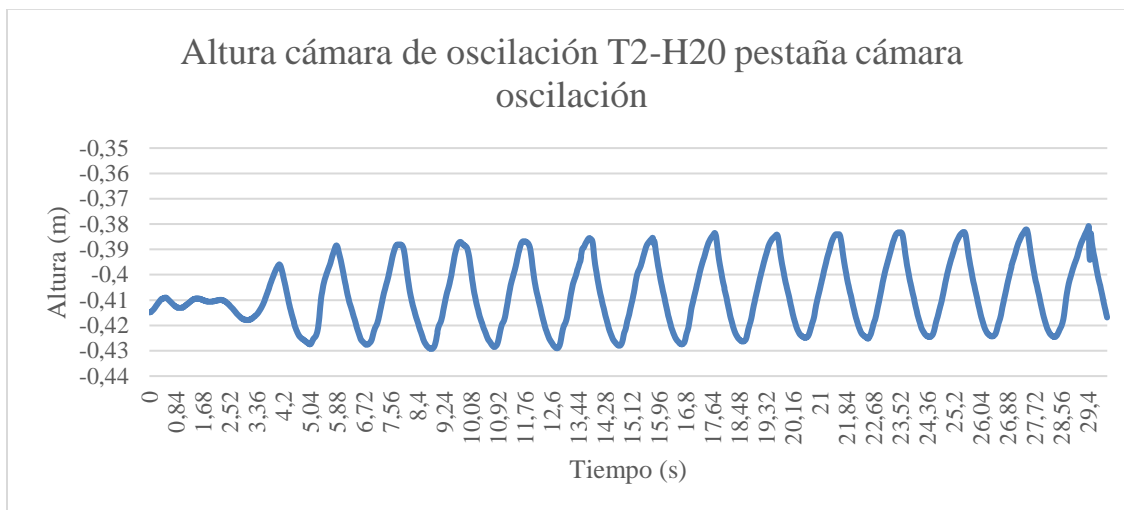


Figura 42.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en la cámara de oscilación.

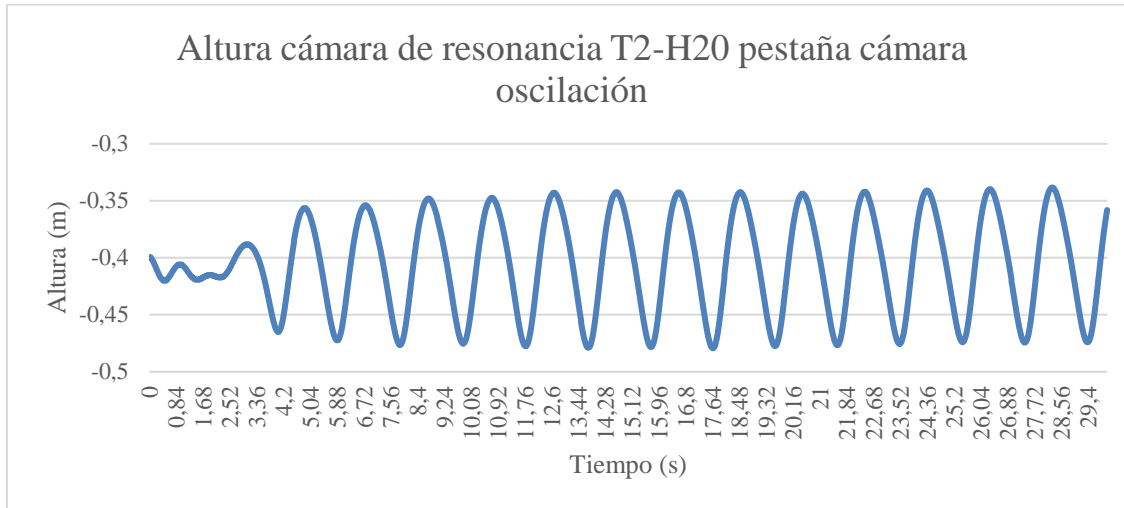


Figura 43.

Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en la cámara de oscilación.

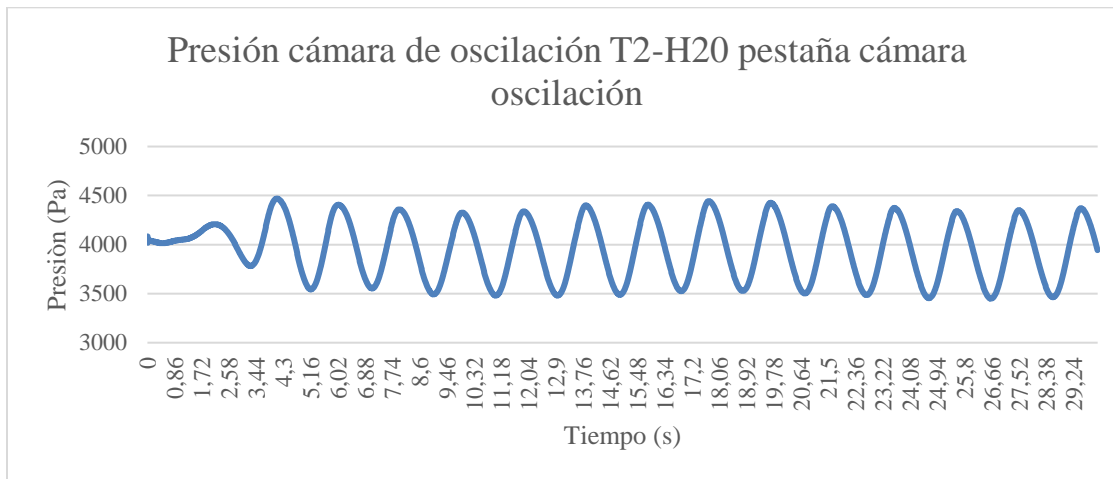
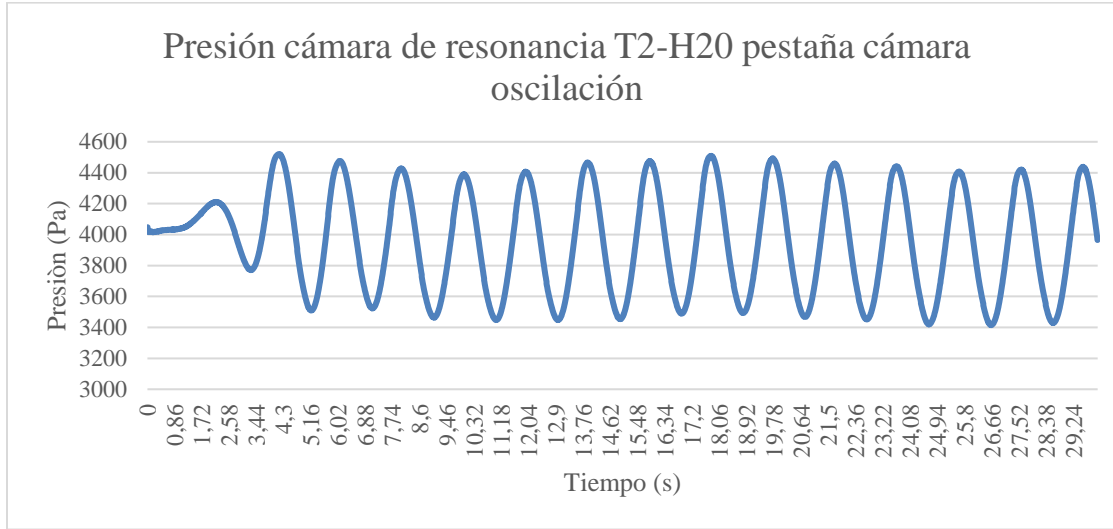


Figura 44.

Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en la cámara de oscilación.



#### 4.4 Escenario con pestaña de 3 cm en la cámara de oscilación y en la cámara de resonancia periodo $T=2s$ - altura $H=20cm$

*La Figura 45, ilustra el wec con la pestaña de 3cm que estará presente en las cámaras de oscilación y de resonancia.*

*Figura 45.*

*WEC con pestaña de 3cm en las cámaras de oscilación y resonancia.*

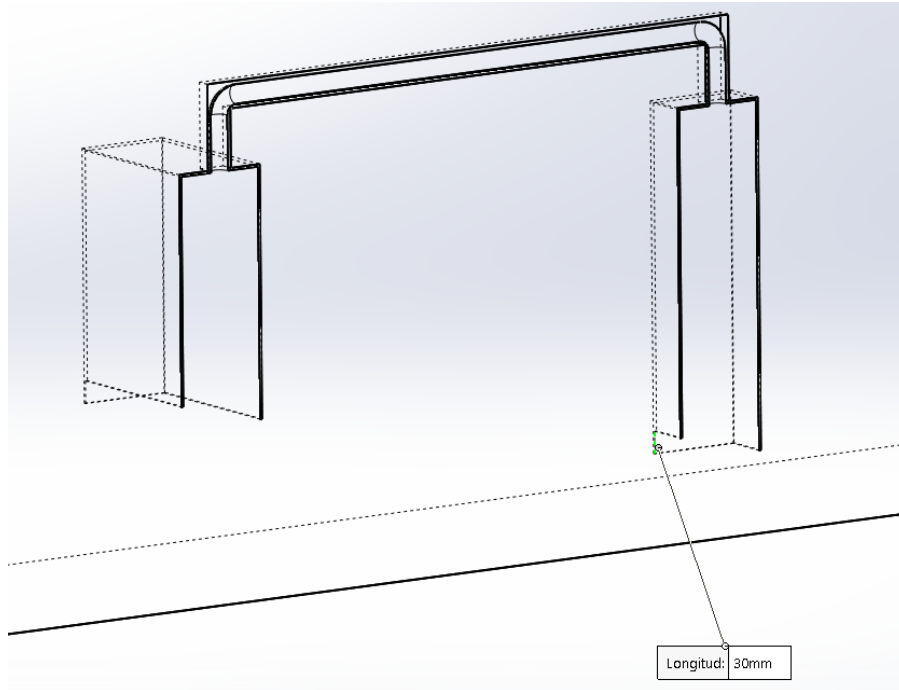


Figura 46.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en las cámaras de oscilación y de resonancia.

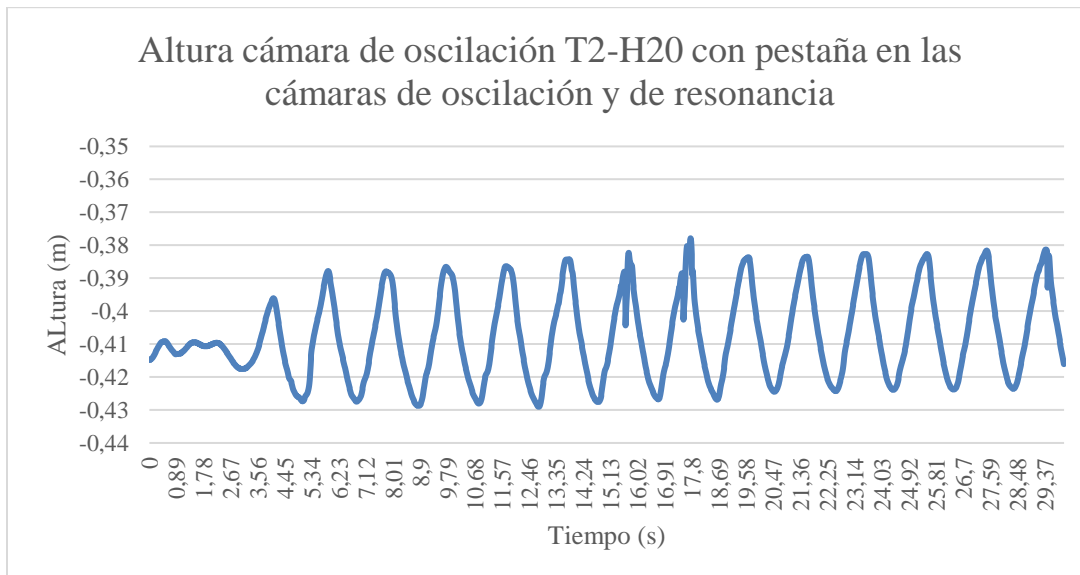


Figura 47.

Oscilación de la superficie libre en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en las cámaras de oscilación y de resonancia.

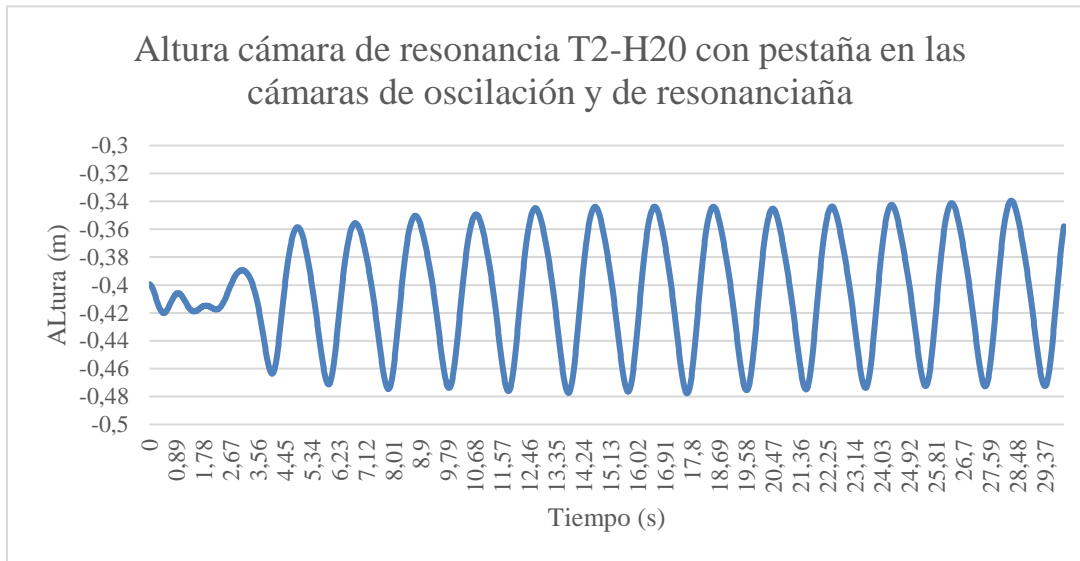


Figura 48.

Delta de presión en la cámara de oscilación a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en las cámaras de oscilación y de resonancia.

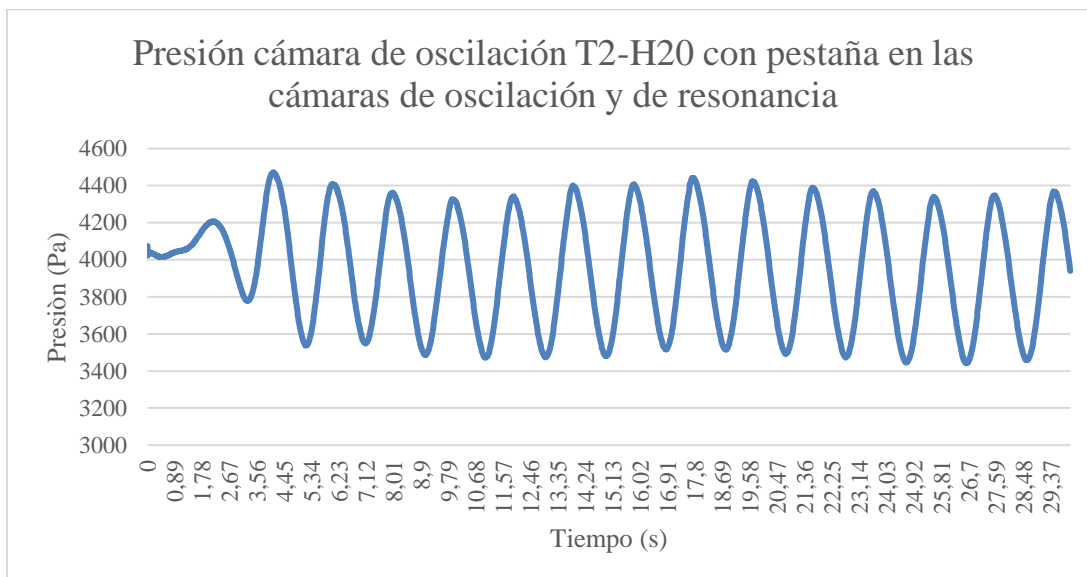


Figura 49.

Delta de presión en la cámara de resonancia a condiciones de  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s con pestaña en las cámaras de oscilación y resonancia.

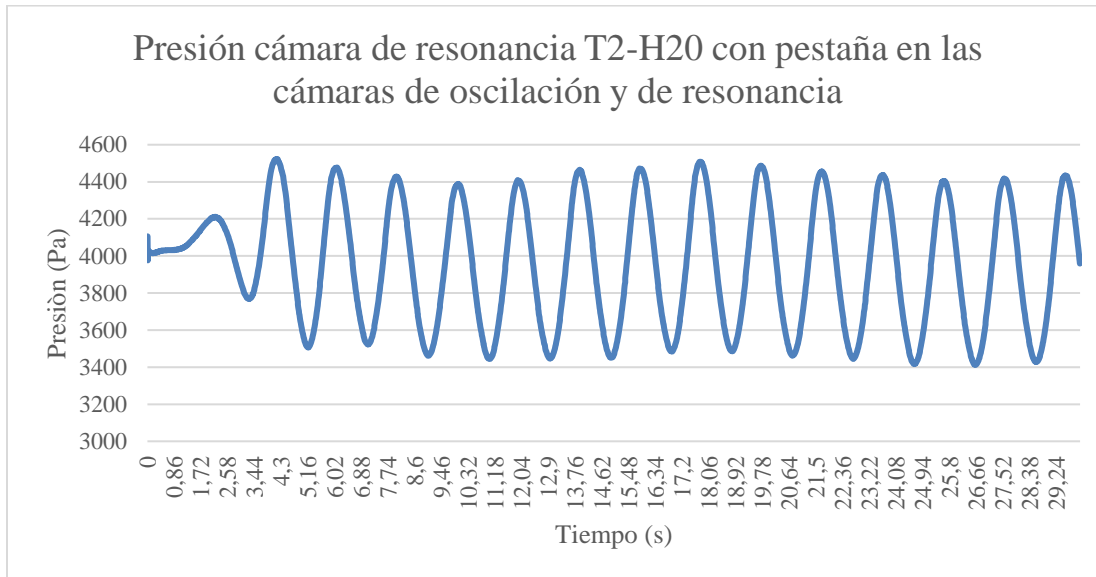


Tabla 10.

Resultados de las diferentes simulaciones variando la altura de las cámaras del WEC.

Resultados de simulaciones			
Escenario	Magnitud	Cámara de oscilación	Cámara de resonancia
T2-H20	Altura (cm)	4,1	12,5
	Presión (Pa)	843	959
T2-H20 sumergido	Altura (cm)	4,2	12,51
	Presión (Pa)	848	934
T2-H20 cámara de oscilación alargada	Altura (cm)	4,09	12,68
	Presión (Pa)	878	944
T2-H20 pestaña cámara de oscilación	Altura (cm)	4,32	13,29
	Presión (Pa)	891	1009
T2-H20 con pestaña en la cámara de oscilación y pestaña en la cámara de resonancia	Altura (cm)	4,5	13,34
	Presión (Pa)	926	1021

En la **Tabla 10** se puede evidenciar que al variar la altura de las cámaras del wec se obtiene una mayor variación en la oscilación de la superficie libre y en el delta de presión de las cámaras, obteniendo mejores resultados con la configuración  $T=2s$ ,  $H=20$  cm y con pestaña en la cámara de oscilación y resonancia, arrojando una oscilación de superficie libre de 4.5 cm en la cámara de oscilación, 13.34 cm en la cámara de resonancia y un delta de presión de 926 Pa en la cámara de oscilación y 1021 Pa en la cámara de resonancia.

## **5. Estudio del diseño de las cámaras del convertidor a condiciones de la zona costera colombiana**

Colombia cuenta con un alto potencial para aprovechar energías marinas, es uno de los pocos países del mundo que, por su ubicación geográfica, tiene acceso al Mar Caribe en el norte y al Océano Pacífico en el occidente, lo que convierte a Colombia en una gran fuente para la extracción de energía undimotriz. Cinco fuentes de potencial energético marino en Colombia ayudarían a comunidades costeras aisladas: las mareas, las olas, las corrientes, los gradientes termales –diferencia térmica entre la superficie y el fondo del mar– y salinos, y la energía eólica en el mar.

La energía extraída de las olas presenta grandes ventajas, como, por ejemplo, la producción de energía eléctrica sin emitir gases contaminantes a la atmósfera, generando un impacto ambiental mínimo, tanto visual como sonoro, ya que no requiere de grandes instalaciones. En este apartado se simulará un oleaje condiciones específicas del mar colombiano de un convertidor de

energía OWC MDS y posteriormente se calculará el potencial energético extraído de las cámaras de oscilación y resonancia.

### **5.1 Condiciones del oleaje en la costa caribe colombiana**

Costa Caribe: Barranquilla y Santa Marta.

Para simular a condiciones del mar colombiano, es necesario conocer datos de ola como altura significativa y periodo. Los valores más altos de la potencia undimotriz media oscilan entre los 5-7 kW / m y aparecen de diciembre a abril (1er trimestre), coincidiendo con una de las temporadas veraniegas ventosas en Colombia. Los valores medios de la altura de ola significativa ( $H_s$ ) son de alrededor de 1,8 m y los valores del período de pico alto de aproximadamente 8 s. Por el contrario, durante las temporadas de lluvias, los valores medios de la potencia de las olas apenas alcanzan 1kW / m. Información recopilada de (Osorio A. F., 2013) (Osorio, Ortega, & Arango-Aramburo, 2016) (Osorio, Montoya, Ortiz, & Peláez, 2016). Para la profundidad de costa, los valores alcanzados para aguas poco profundas son entre 7 y 10 metros (Vega-Sequeda, Polo-Silva, & Herrera, 2019).

### **5.2 Escala del oleaje**

La separación de las cámaras implementada por Miguel Sandoval en el WEC OWC se determinó a partir de la longitud de onda de 1.56 m correspondiente a un periodo de 1 s y una profundidad de 0.70 m. Para que la separación de la cámara de oscilación este justo en la cresta de

la onda y en ese mismo momento la de resonancia en el valle, fueron separadas media longitud de onda. Esta separación en el sistema puede ser cambiada para probar nuevas geometrías y condiciones de oleaje. Por otro lado, el conducto de unión tuvo una pulgada de diámetro, por conveniencia del transporte del flujo de aire

Por consiguiente, para que el oleaje Colombia cumpla con la condición del máximo de oscilación y adaptarlo al WEC, se debe dividir la longitud de onda a condición real entre la teórica garantizando que el factor de escala sea el adecuado. Se determina la longitud de onda real (ver Ecuación 3) a condiciones costeras de mar colombiano:

Los cálculos obtenidos para la longitud de onda a condiciones reales de costa colombiana ( $T = 8$  segundos,  $d = 7$  metros) fue de 61,41 m. Para el canal de oleaje empleado en el modelo de experimentos de Sandoval, se debe escalar las condiciones de esta ola usando un factor de escala  $K$  que permita adecuar el periodo y altura de la ola al WEC OWC MDS.

Para determinar este factor de escala se debe dividir la longitud de onda a condiciones de costa colombiana ( $L = 61,41$  metros) entre la teórica determinada por Sandoval en su modelo de experimentos ( $L = 1,56$  metros), esto con el fin de que se cumpla la condición del máximo de oscilación en las cámaras del WEC. El factor de escala calculado fue de  $K = 40$  aproximadamente.

Con este factor de escala se determinó el periodo y la altura significativa de ola para el canal, utilizando las siguientes fórmulas:

*Ecuación 7.*

*Fórmula para escalar el periodo*

$$T_E = \frac{T}{\sqrt{K}}$$

*Ecuación 8.*

*Fórmula para escalar la altura*

$$H_{SE} = \frac{H_S}{K}$$

Donde  $T_E$  es el periodo de la ola escalado y K un factor de escala, que fue calculado y nos dio un valor de K = 40.

$H_{SE}$  Es la altura significativa de ola escalada al mismo factor. Los valores de periodo y altura significativa de ola obtenidos para el canal de oleaje fueron de  $T_E = 1,2649$  s y  $H_{SE} = 0,045$  m.

### **5.3 Simulación a condiciones de la costa Caribe Colombiana**

En esta etapa se explica cada una de las medidas y datos tomados para la ejecución de la simulación. Los datos iniciales son a condiciones de mar colombiano escalados:

$$T_E = 1,2649 \text{ s}; \quad H_{SE} = 0,045 \text{ m}; \quad d = 0,7 \text{ m}$$

Con estos datos se determinó la longitud de ola utilizando la ecuación de Airy (ver Ecuación 3), la cual fue de  $L=2,377$  metros. Los datos obtenidos mediante la escala se usan como parámetros de entrada a la hora de establecer los parámetros de las condiciones de frontera, más específicamente en "inlet".

Ecuación 3.

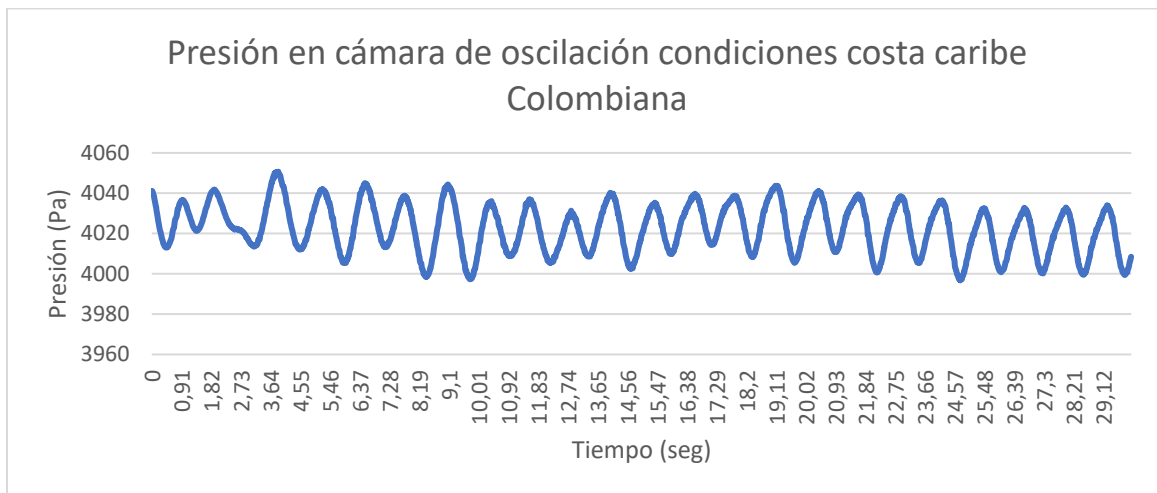
Ecuación de longitud de onda para aguas intermedias.

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right)$$

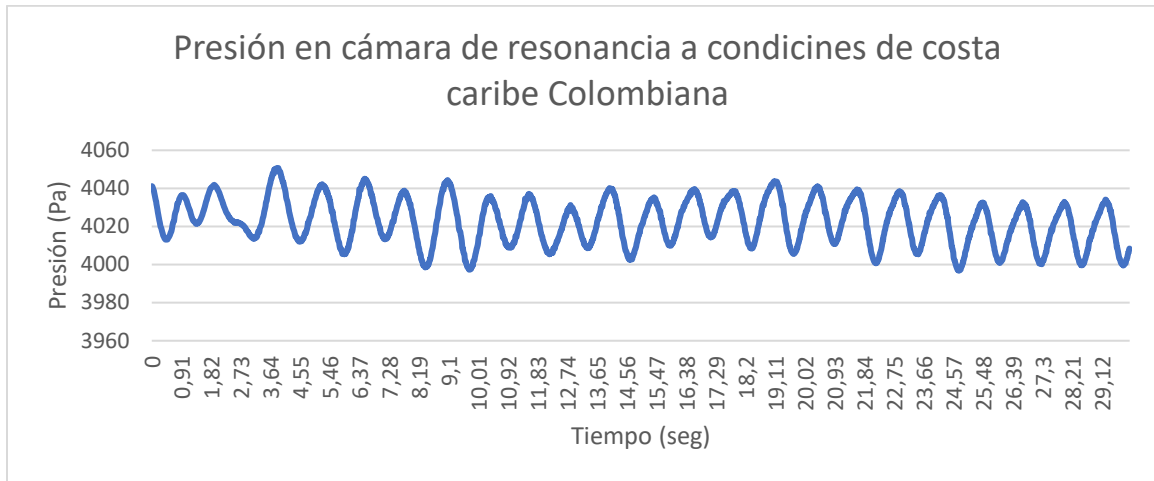
Los resultados obtenidos para cada una de las cámaras se muestran en la Figura 50 y Figura 51.

*Figura 50.*

*Presión total en la cámara de oscilación a condiciones de la costa Caribe Colombiana.*



Como se aprecia en la Figura 50, se alcanza una presión de 4050 Pascales aproximadamente y se tiene una presión mínima de 4000 Pascales logrando un diferencial de presión de 50 Pascales.

*Figura 51.**Presión total en la cámara de resonancia a condiciones de la costa Caribe Colombiana.*

De la Figura 51, se observa que la presión máxima alcanzada es de 4060 Pascales y la menor es de 3990 pascales, logrando un diferencial de presión de 70 Pascales.

### Potencial extraído de las cámaras

Después de realizar la simulación, se menciona la ecuación de Betz que se utilizará para determinar la energía potencial del flujo de aire que se puede extraer de las cámaras del WEC OWC MDS con la Ecuación 2:

Ecuación 2.

Ecuación potencial energético de Betz

$$Ep = CP * \left(\frac{1}{2}\right) * \rho * S * V^3$$

En la Ecuación 2 se aprecia que la energía potencial del aire está dada por un coeficiente de potencia  $C_p$  (para el caso de estudio se optó por usar un coeficiente del 60%) multiplicado por la densidad del aire ( $\rho$ , en  $\text{Kg/m}^3$ ), por la superficie por la cual se desplaza el fluido ( $S$ , en  $\text{m}^2$ ) y la velocidad del aire al cubo ( $V^3$  en  $\text{m}^3/\text{s}$ ). ver Ecuación 3.

En donde:

*Ecuación 9.*

*Formula de la velocidad dentro de los ductos.*

$$V = \sqrt{\frac{2 * P}{Cd * \rho}}$$

P= Presión en pascales

Cd= constante de 1,17

Rho= densidad

La energía potencial extraída fue de 11,84 watts en cámara de oscilación y 4,141 watts en cámara de resonancia.

## 6. Conclusiones

- Se redujo el gasto computacional de la simulación haciendo simetría en el canal y el WEC, por lo que se obtuvo un tamaño de malla final de  $0.4 \times 1.2 \times 10.146$  y 253816 elementos, en donde no se generó reflexión de la ola para ninguno de los escenarios estudiados, con una oblicuidad de 0,35577, un aspecto de radio de 40 y una ortogonalidad de 0,87983 que

permitió una buena convergencia y aproximación de los datos arrojados en las simulaciones.

- Las simulaciones realizadas en FLUENT ANSYS, a pesar de tener un error cercano al 18% en comparación a los datos de laboratorio de Miguel Sandoval, que para el alcance del proyecto es aceptable, permitieron replicar los experimentos realizados por Miguel Sandoval T1,5-H15 y T2-H20, dando como resultado un modelo numérico funcional, el cual puede ser utilizado para realizar diferentes simulaciones que permitan estudiar diferentes escenarios que mejoren el rendimiento del WEC.
- Se comprobó en función de los datos adquiridos que utilizando la oscilación de la columna de agua o el flujo de aire generado por la oscilación es posible la extracción de energía del oleaje por medio del dispositivo OWC-MDS en el modelo numérico encontrado. Los experimentos realizados por Miguel Sandoval T1,5-H15 y T2-H20 fueron replicados usando un modelo de turbulencia K-Omega logrando un error alto en comparación al modelo laminar, por lo que se calculó el número de Reynolds el cual fue de 2622 y basado en este valor se realizó las simulaciones en régimen laminar.
- Se comprobó que el error de altura de ola entre los datos obtenidos por Miguel Sandoval y los de la simulación en CFD disminuyeron de 10% a 0%, al simular en régimen laminar debido a que hubo una menor caída de la ola logrando una altura de ola exacta de 20 cm mientras que en régimen turbulento fue de 18 cm. Esto ocasionó una mayor oscilación de

la masa de aire en el interior del WEC y un mayor diferencial de presión. Contrario a cuando se simuló usando el modelo de turbulencia, ya que este modelo es uno de los factores que hace que la ola pierda altura.

- El análisis de sensibilidad permite observar la influencia que tiene la altura de la cámara, en la oscilación de superficie libre y el delta de presión dentro de las cámaras. Obteniendo la mejor configuración, la geometría con pestaña en la cámara de oscilación y pestaña en la cámara de resonancia, donde se tiene mayor oscilación de superficie libre siendo de 4,5 cm en cámara de oscilación y de 13,34 cm en cámara de resonancia y diferencial de presión dentro de las cámaras del WEC de 926 Pa en cámara de oscilación y de 1021 Pa en cámara de resonancia.
- Se determinó de manera exitosa la sensibilidad de parámetros como la presión y la oscilación de la masa de flujo de aire incompresible en las cámaras del dispositivo, para distintas geometrías del WEC OWC MDS, como se muestra en la Tabla 10.
- Los resultados de las simulaciones demostraron que la configuración de malla para el dispositivo y el WEC sirve como herramienta para el estudiar el potencial energético para diferentes condiciones de oleaje. En este caso, para condiciones específicas de costa colombiana.

- Los resultados experimentales demostraron que la configuración de malla para el canal y el WEC puede servir como herramienta para la conversión de la energía para diferentes condiciones de oleaje. En este caso, para condiciones específicas de costa colombiana.
- Para la oscilación de la masa de flujo de aire dentro de las cámaras y el ducto, se notó que el oleaje con periodo de 1,2649 s y altura efectiva de ola de 0.045 m, mostraron un cambio de aproximadamente 50 pascales en la presión en cámara de oscilación y 70 pascales en cámara de resonancia. Para este tipo de oleaje (1.2649 segundos) la variación de la presión del aire, así como la velocidad de oscilación dentro la cámara de resonancia nos permitió determinar la velocidad del flujo en el conducto y con ello el potencial energético teórico, el cual fue de 11,84 watts en cámara de oscilación y 4,141 watts en cámara de resonancia.

### **Futuros trabajos y líneas de investigación**

Hacer un estudio de viabilidad energética para una futura implementación en la costa Colombiana.

Dimensionar y construir un prototipo a mayor escala para ser probado en condiciones reales en algún lugar de la costa Colombiana tomando en cuenta las condiciones de oleaje del sitio para dimensionar el dispositivo.

**Referencias Bibliográficas**

- Anaya-Durand, A. I., Cauich-Segovia, G. I., Funabazama-Bárcenas, O., & Gracia-Medrano-Bravo, V. A. (2014). Evaluación de ecuaciones de factor de fricción explícito para tuberías. *Educacion Quimica*, 25(2), 128–134. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70535-X](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70535-X)
- Benreguig, P., Vicente, M., Dunne, A., & Murphy, J. (2019). Modelling Approaches of a Closed-Circuit OWC Wave Energy Converter. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(2), 23. <https://doi.org/10.3390/jmse7020023>
- Bern, M., & Eppstein, D. (1995). *Mesh generation and optimal triangulation*. 492.
- Bouali, B., & Larbi, S. (2013). Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter. *Energy Procedia*, 36, 565–573. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.065>
- Conde, J. M. P., & Didier, E. (2011). Numerical Simulation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter : Comparison of two Numerical Codes. *Isop*, 8, 668–674.
- Conghao, X., & Huang, Z. (2019). Three-dimensional CFD simulation of a circular OWC with a nonlinear power-takeoff: Model validation and a discussion on resonant sloshing inside the pneumatic chamber. *Ocean Engineering*, 176(February), 184–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.02.010>
- Dai, S., Day, S., Yuan, Z., & Wang, H. (2019). Investigation on the hydrodynamic scaling effect of an OWC type wave energy device using experiment and CFD simulation. *Renewable Energy*, 142, 184–194. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.066>

- Department of the army. (1984). SHORE PROTECTION MANUAL US Army Corps of Engineers. *Coastal Engineering, I*, 1–337. [http://ft-sipil.unila.ac.id/dbooks/S P M 1984 volume 1-1.pdf](http://ft-sipil.unila.ac.id/dbooks/S_P_M_1984_volume_1-1.pdf)
- Elhanafi, A., Fleming, A., Macfarlane, G., & Leong, Z. (2017). Underwater geometrical impact on the hydrodynamic performance of an offshore oscillating water column–wave energy converter. *Renewable Energy, 105*, 209–231. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.039>
- Elhanafi, A., Macfarlane, G., Fleming, A., & Leong, Z. (2017). Scaling and air compressibility effects on a three-dimensional offshore stationary OWC wave energy converter. *Applied Energy, 189*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.11.095>
- Elhanafi, A., Macfarlane, G., & Ning, D. (2018). Hydrodynamic performance of single–chamber and dual–chamber offshore–stationary Oscillating Water Column devices using CFD. *Applied Energy, 228*(March), 82–96. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.069>
- Euse, A. C. (2018). *MODELAMIENTO DE OLEAJE A ESCALA DE LABORATORIO ENFOQUE NUMÉRICO* Alejandro Cáceres Euse Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas , Escuela de Geociencias y Medio Ambiente Medellín , Colombia. April.
- Falcão, A. F. d. O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14*(3), 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Filianoti, P. G. F., Gurnari, L., Torresi, M., & Camporeale, S. M. (2018). CFD analysis of the energy conversion process in a fixed oscillating water column (OWC) device with a Wells turbine. *Energy Procedia, 148*(Ati), 1026–1033. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.058>

- Finnegan, W., & Goggins, J. (2012). Numerical simulation of linear water waves and wavestructure interaction. *Ocean Engineering*, 43, 23–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.01.002>
- Fluent Ansys Help. (2020). Fluent theory guide. *Fluent Ansys Help, 2020 R1*(Open Channel Wave Boundary Conditions), 1–18.  
[https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v201/en/flu\\_th/x1-76300017.21.1.html?printer\\_friendly=true?printer\\_friendly=true](https://ansyshelp.ansys.com/Views/Secured/corp/v201/en/flu_th/x1-76300017.21.1.html?printer_friendly=true?printer_friendly=true)
- Garcia Diaz, M. (2016). Análisis de un sistema OWC twin turbines con turbinas radiales. *Universidad de Oviedo, Recuperado de:*  
[http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/38365/3/TFM\\_Manuel%20Garc%C3%ADa%20D%C3%ADaz.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/38365/3/TFM_Manuel%20Garc%C3%ADa%20D%C3%ADaz.pdf).
- Garcia, K. (2016). *Creación de una herramienta informática para el cálculo de la profundidad normal y crítica como parámetros de diseño de canales abiertos* [Universidad de la Costa].  
<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstream/handle/11323/797/1.140.864.617.pdf?sequence=1>
- Gijón Mancheño, A. (2014). *Ampliación del Dique Exterior del Puerto de la Almadraba Anejo 6. Propagación* [Universidad de Sevilla].  
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90060/fichero/Documento+Nº1.+Memoria+y+Anejos%252FAnejos%252F6.+Anejo+de+Propagación%252F6.+Anejo+de+propagación.pdf>
- Gomes, M. N., Nascimento, C. D., Bonafini, B. L., Santos, E. D., Isoldi, L. A., & Rocha, L. A. O. (2012). Two-Dimensional Geometric Optimization of an Oscillating Water Column Converter in Laboratory Scale. *Revista de Engenharia Térmica*, 11(1–2), 30.

<https://doi.org/10.5380/reterm.v11i1-2.61996>

Hidrográficas, C. de I. O. e, & Aquaterra, C. A. (2005). *Anexo 2. Estudio y evaluación de alternativas de solución para la protección costera de unos sectores de la Costa Caribe Colombiana fase II*. <https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/handle/20.500.11762/20731>

Horko, M. (2007). CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. *M.Sc Thesis. THE UNIVERSITY OF WESTERN AUSTRALIA*, 1–159. [https://research-repository.uwa.edu.au/files/3236079/Horko\\_Michael\\_2007.pdf](https://research-repository.uwa.edu.au/files/3236079/Horko_Michael_2007.pdf)

Isoldi, L. A., Grimmler, J. D. A. M., Letzow, M., Souza, J. A., Gomes, M. D. N., Rocha, L. A. O., & Dos Santos, E. D. (2015). 3D Numerical Analysis About the Shape Influence of the Hydro-Pneumatic Chamber in an Oscillating Water Column (Owc). *Revista de Engenharia Térmica*, 14(1), 03. <https://doi.org/10.5380/reterm.v14i1.62106>

Kamath, A., Bihs, H., & Arntsen, Ø. A. (2015). Numerical modeling of power take-off damping in an oscillating water column device. *International Journal of Marine Energy*, 10, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2015.01.001>

Kim, S. Y., Kim, K. M., Park, J. C., Jeon, G. M., & Chun, H. H. (2016). Numerical simulation of wave and current interaction with a fixed offshore substructure. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(2), 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2016.02.002>

Lee, K. H., & Kim, T. G. (2018). Three-dimensional Numerical Simulation of Airflow in Oscillating Water Column Device. *Journal of Coastal Research*, 85, 1346–1350. <https://doi.org/10.2112/si85-270.1>

- Marques Machado, F. M., Gameiro Lopes, A. M., & Ferreira, A. D. (2018). Numerical simulation of regular waves: Optimization of a numerical wave tank. *Ocean Engineering*, 170(September), 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.002>
- Osses, J. (2016). *El método de volúmenes finitos*. Blog ESSS. <https://www.esss.co/es/blog/el-metodo-de-volumenes-finitos/>
- Park, H., Do, T., Tomiczek, T., Cox, D. T., & van de Lindt, J. W. (2018). Numerical modeling of non-breaking, impulsive breaking, and broken wave interaction with elevated coastal structures: Laboratory validation and inter-model comparisons. *Ocean Engineering*, 158(January), 78–98. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.088>
- Ribeiro E Silva, S., Gomes, R. P. F., & Falcaõ, A. F. O. (2016). Hydrodynamic optimization of the UGEN: Wave energy converter with U-shaped interior oscillating water column. *International Journal of Marine Energy*, 15, 112–126. <https://doi.org/10.1016/j.ijome.2016.04.013>
- Russo, V., Nicolini, D., & Crescenzi, T. (2015). Cfd Analysis of Devices in Oscillating Water Column - Owc. *VI International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, January*. <https://www.researchgate.net/publication/283132212>
- Sandoval, M. D. (2018). *Análisis de desempeño de un dispositivo para la conversión de la energía del oleaje por oscilación de columna de agua (OWC)*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Scarpetta, F., Gurnari, L., Torresi, M., Filianoti, P., & Camporeale, S. (2017). A CFD simulation of a full scale U-OWC breakwater. *Proceedings of the Twelfth European Wave and Tidal*

*Energy Conference, August.*

- Scarpetta, F., Torresi, M., Camporeale, S., & Filianoti, P. (2017). CFD simulation of the unsteady flow in an Oscillating Water Column: comparison between numerical and experimental results for a small scale experimental device. *Proceedings of the Twelfth European Wave and Tidal Energy Conference, January 2018*, (988-1)-(988-7).
- Shalby, M., Elhanafi, A., Walker, P., & Dorrell, D. G. (2019). CFD modelling of a small-scale fixed multi-chamber OWC device. *Applied Ocean Research*, 88(April), 37–47. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2019.04.003>
- Simonetti, I., Cappiotti, L., Elsafti, H., & Oumeraci, H. (2018). Evaluation of air compressibility effects on the performance of fixed OWC wave energy converters using CFD modelling. *Renewable Energy*, 119, 741–753. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.027>
- Vega Molero, V. (2011). Simulación CFD de la entrada de aire de un motor a reacción. In *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Vyzikas, T., Deshoulières, S., Giroux, O., Barton, M., & Greaves, D. (2017). Numerical study of fixed Oscillating Water Column with RANS-type two-phase CFD model. *Renewable Energy*, 102, 294–305. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.044>
- Windt, C., Davidson, J., & Ringwood, J. V. (2018). High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93(June), 610–630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.020>

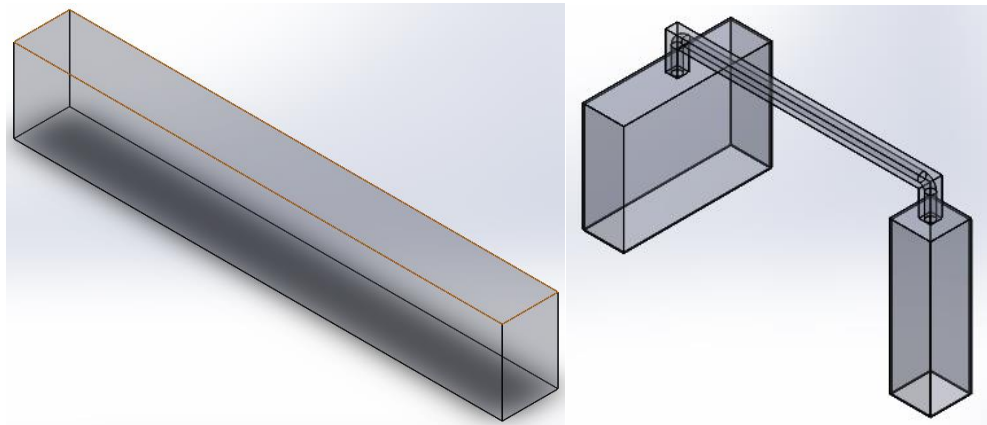
- Zabala, I., Henriques, J. C. C., Blanco, J. M., Gomez, A., Gato, L. M. C., Bidaguren, I., Falcão, A. F. O., Amezaga, A., & Gomes, R. P. F. (2019). Wave-induced real-fluid effects in marine energy converters: Review and application to OWC devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *111*(January), 535–549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.025>
- Zabihi, M., Mazaheri, S., & Mazyak, A. R. (2015). Wave Generation in a Numerical Wave Tank. *The 17th Marine Industries Conference (MIC2015) 22-25 December 2015 – Kish Island, 2017*(2), 11. <https://www.researchgate.net/publication/288280408>
- Zaouf, L., Bouali, B., Larbi, S., & Benchattp, A. (2014). Performance analysis of a 3D axisymmetric oscillating water column. *Energy Procedia*, *50*, 246–254. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.030>

## Apéndice

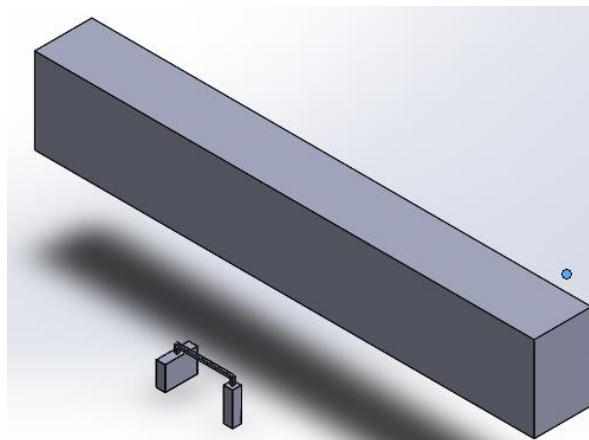
### Apéndice A. Paso a paso de la simulación en el software Ansys Fluent.

#### 1. Creación del Canal y el WEC en SolidWorks

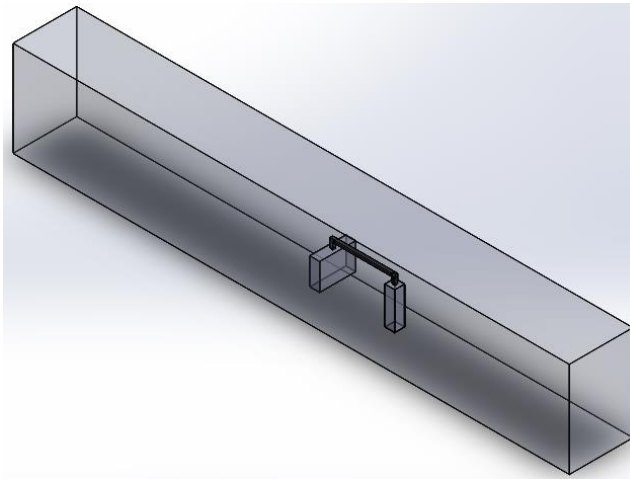
1.1 Se realiza el modelo CAD del convertidor OWC y el canal de oleaje.



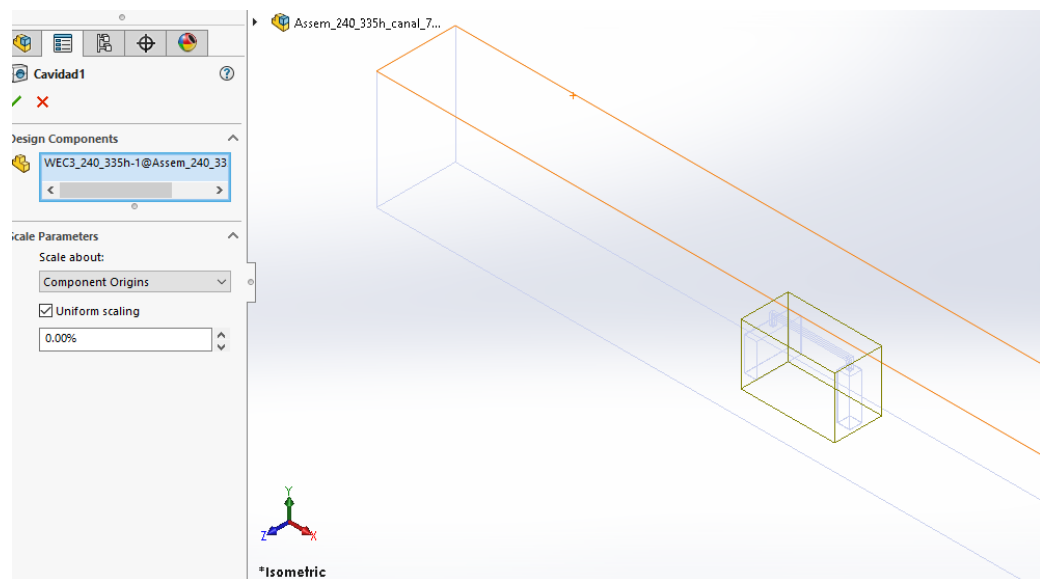
1.2 Se fija el origen de coordenadas a la pared que se escogió como la entrada del canal (inlet) y a 700 mm del fondo del canal (bottom), esto con el fin de establecer un criterio de coordenadas.



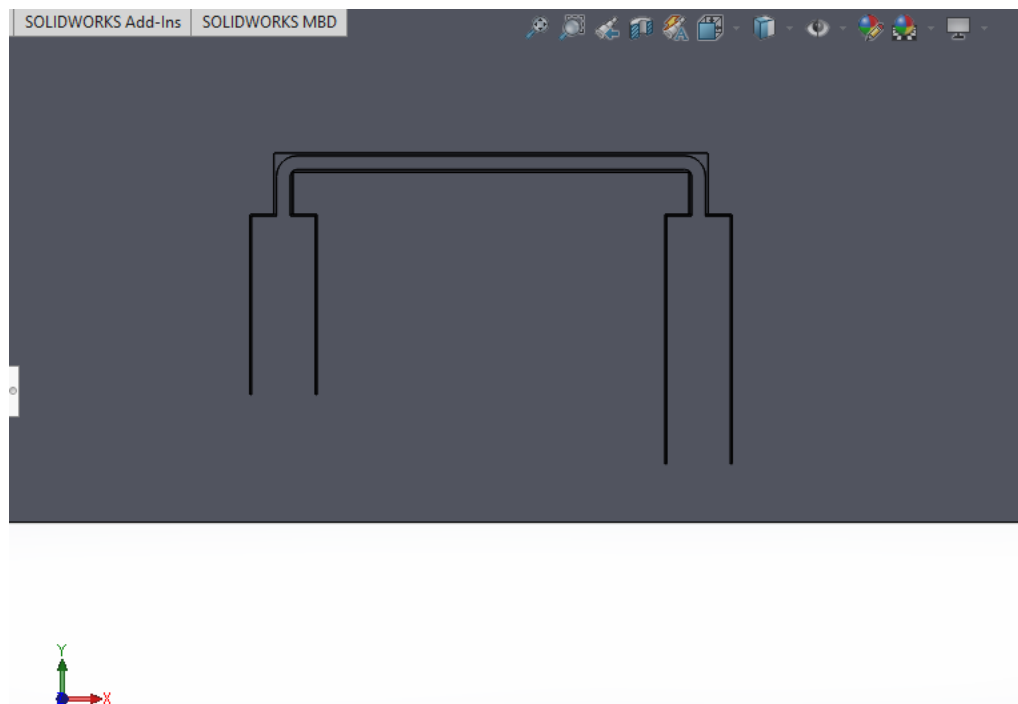
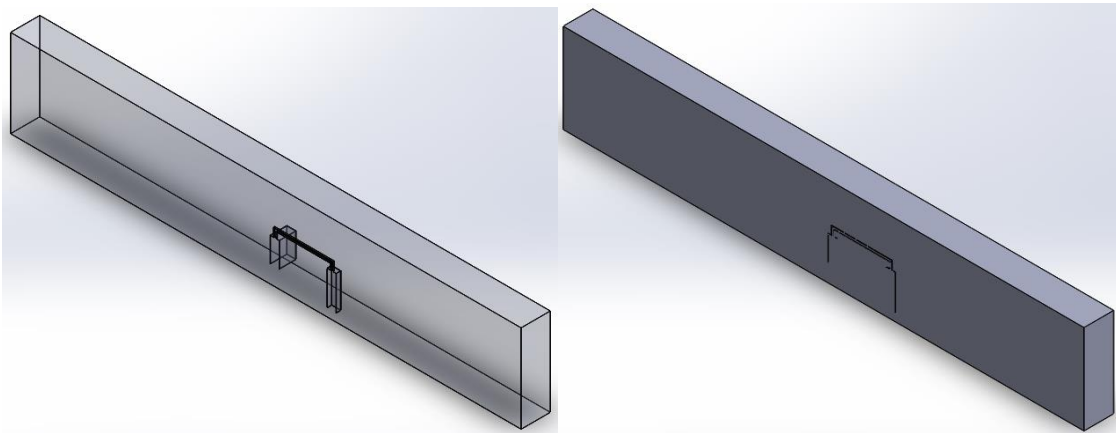
- 1.3 Se realiza el ensamble del convertidor y el canal teniendo en cuenta que la ubicación del origen se hace en el inlet sobre la superficie libre del agua, es decir, a 0,7 m con respecto al fondo del canal.



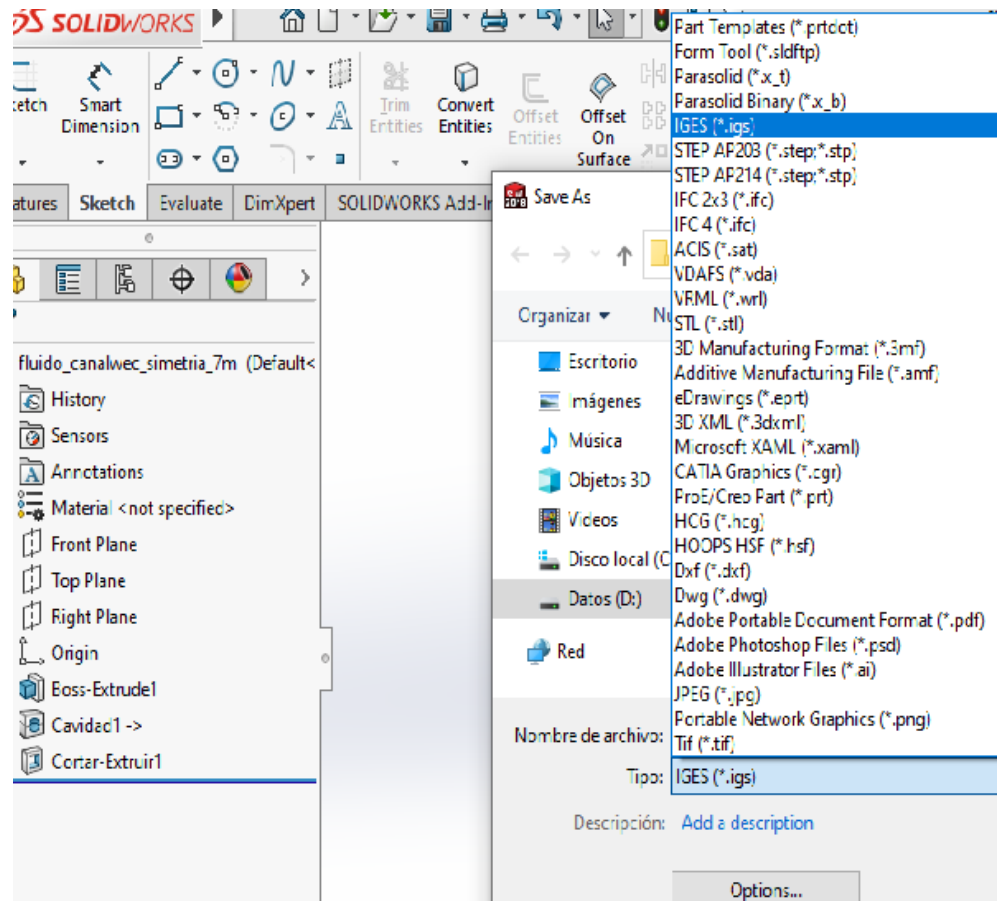
- 1.4 Posteriormente se realiza la cavidad en el canal de oleaje tomando como referencia la pieza de la geometría del convertidor de energía. El canal es una pieza maciza que posteriormente se va a tomar como fluido en la simulación, por lo tanto, es necesario crear la cavidad con la forma del WEC para dejar como fluido todo su interior excepto las paredes de este convertidor.



- 1.5 Una vez creada la cavidad se crea un corte simétrico en la cara frontal del canal usando la operación cortar-extruir en el canal de oleaje de manera simétrica con el fin de reducir costos computacionales a la hora del mallado y la simulación.



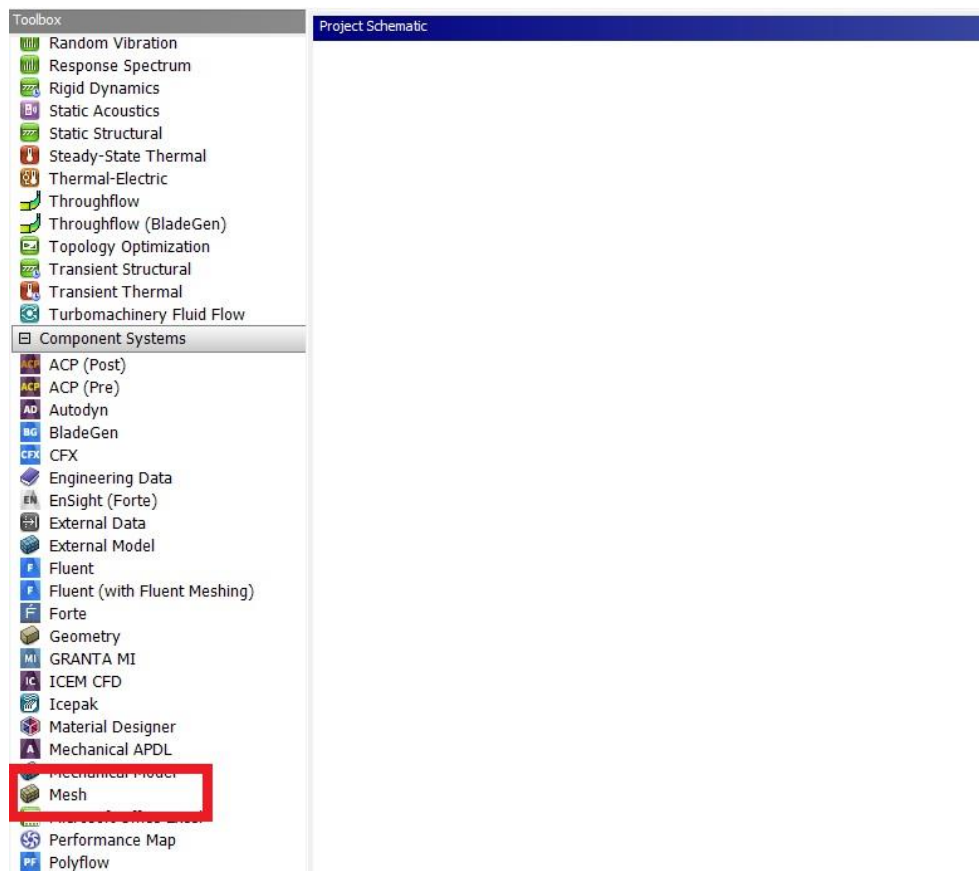
- 1.6 Una vez realizado el corte de simetría se procede a guardar la pieza en FILES- SAVE AS- en formato IGES (\*.igs). Esto con el fin de poder efectuar sin ningún problema el mallado en ANSYS Workbench.



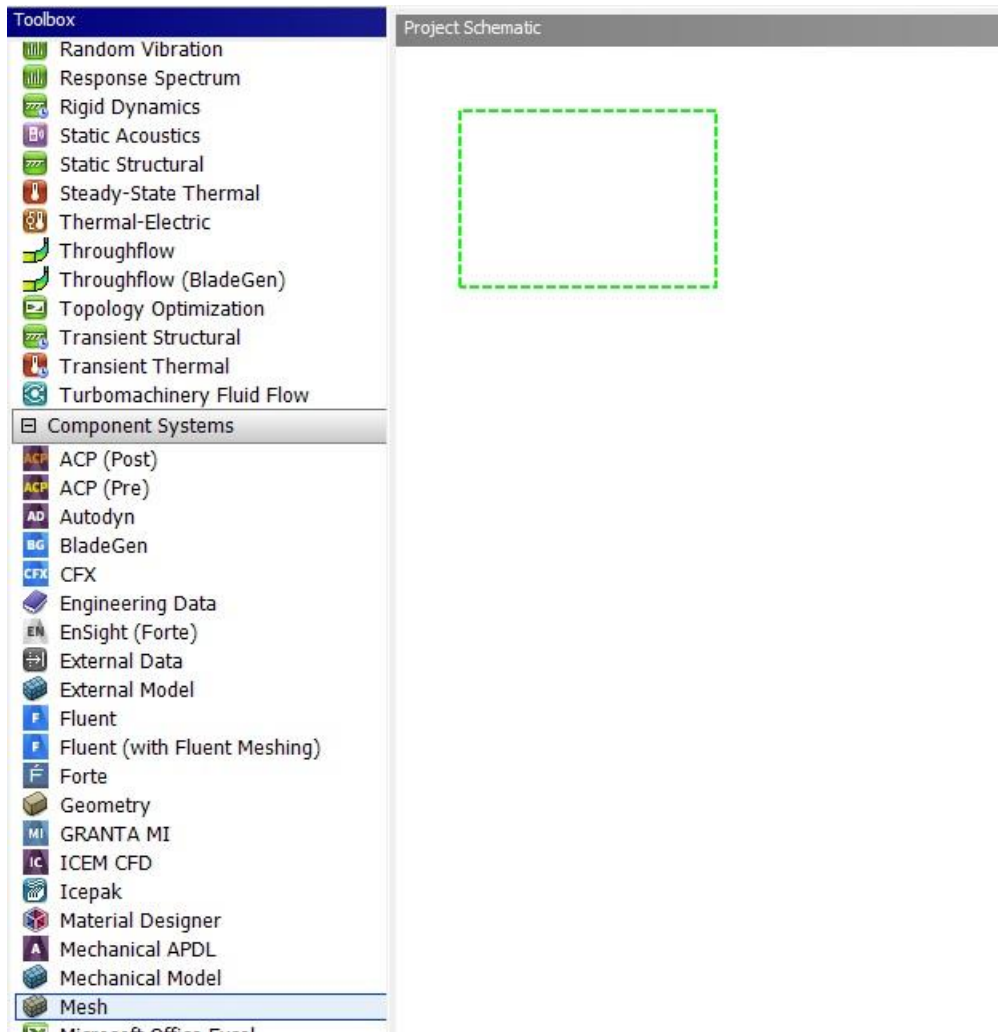
## 2. Preparación de la geometría

### 2.1 Se abre el Workbench de ANSYS

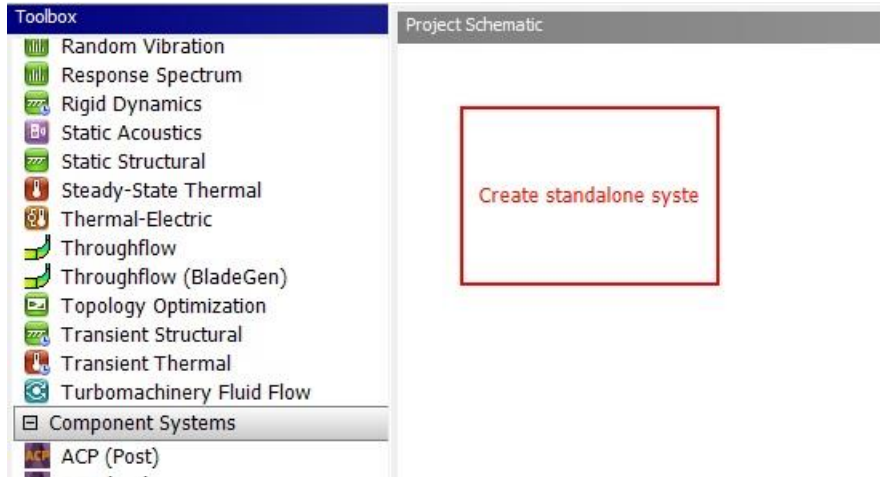
### 2.2 Se busca en “component system” la opción “mesh” y se arrastra a Project Schematic



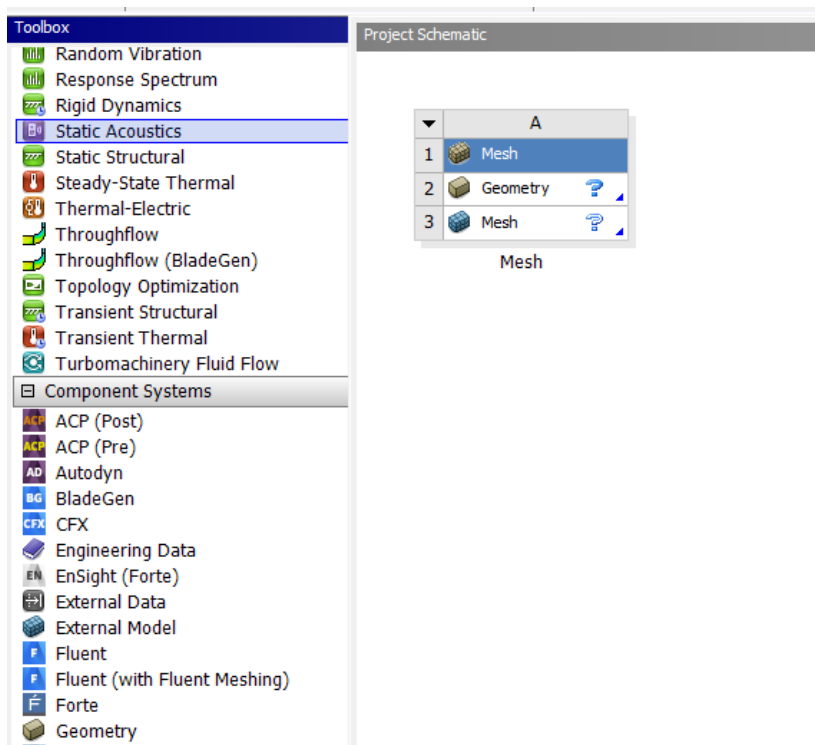
2.3 Se arrastra la opción mesh al recuadro verde que aparece en Project Schematic



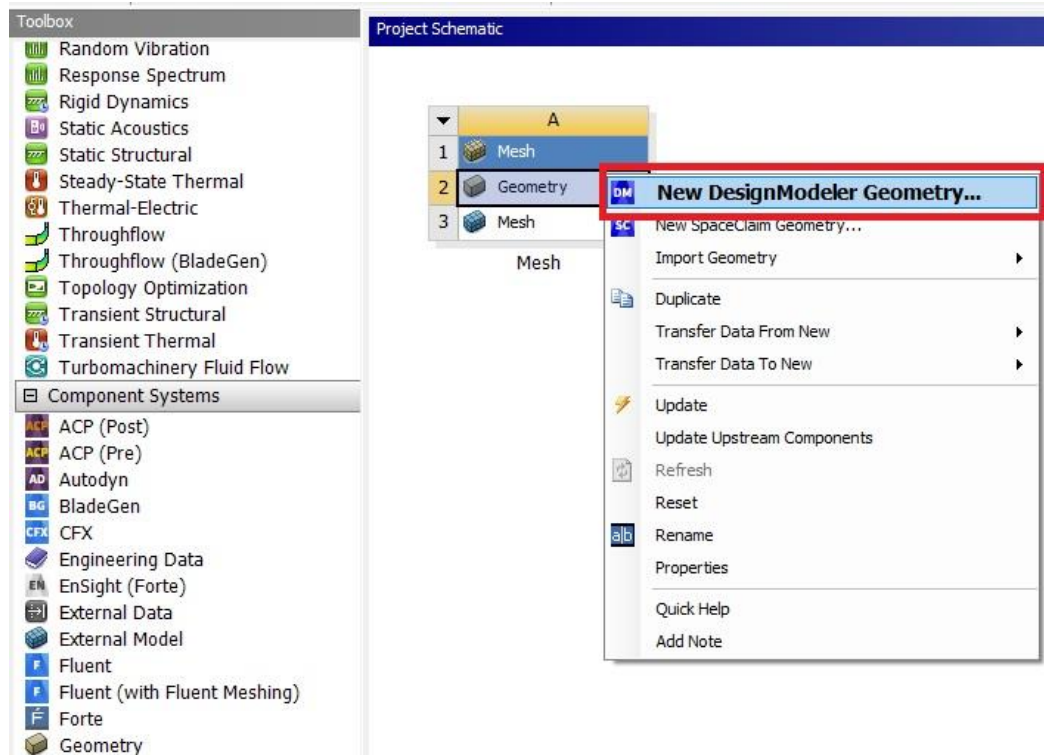
Cuando recuadro cambia de color a rojo y aparece el mensaje “Create standalone syste”, indica que se puede soltar.



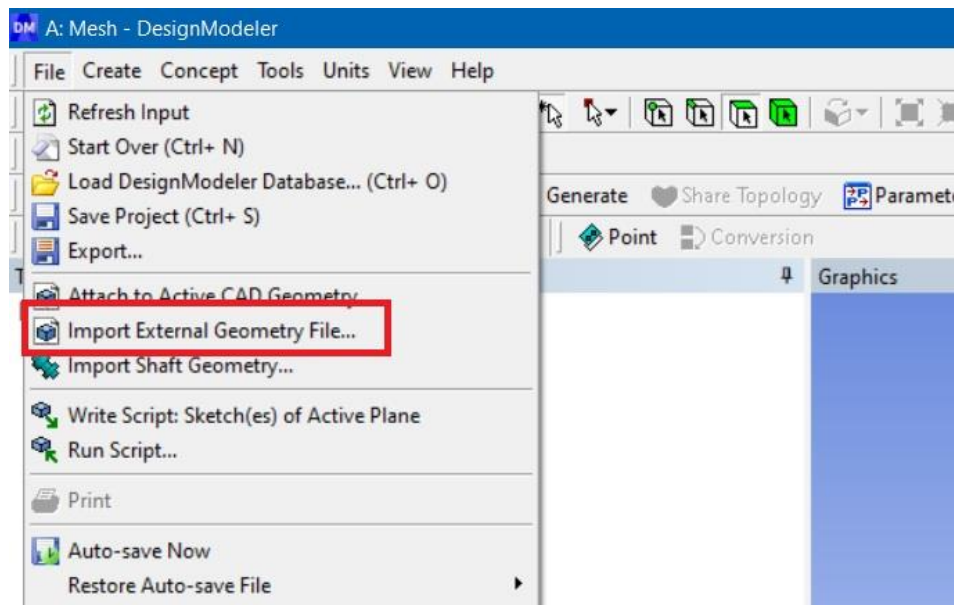
Al soltar aparece la ventana “Mesh”



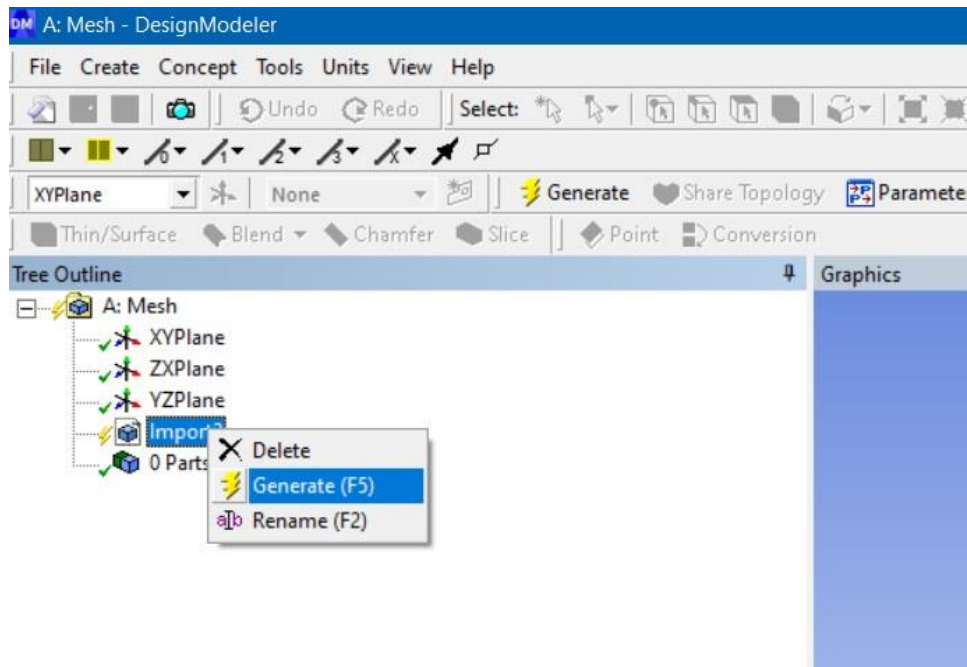
2.4 Para empezar con el mallado se debe abrir la herramienta DesingModeler. Se debe dar click derecho sobre Geometry, y posteriormente clicar en la opción “DesingModeler”.

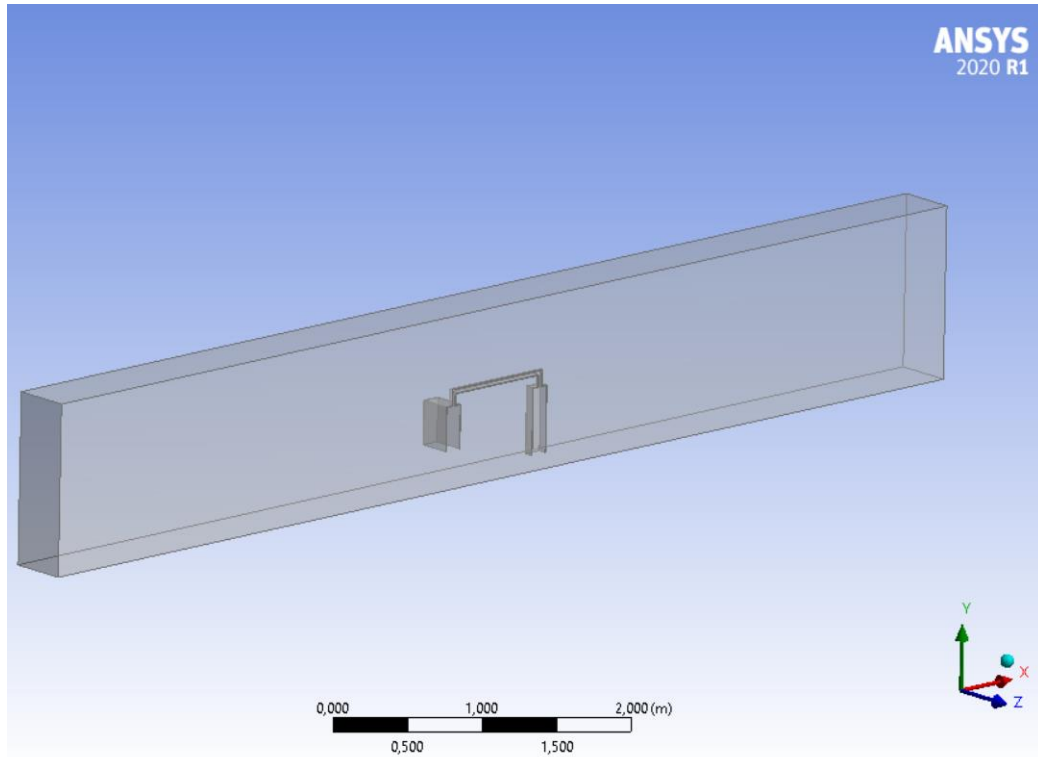


2.5 Se debe importar la geometría que debe estar en formato igs. Se da click en file y se despliega una barra de opciones, se debe dar click en “Import External Geometry File...” y se procede a buscar el archivo.

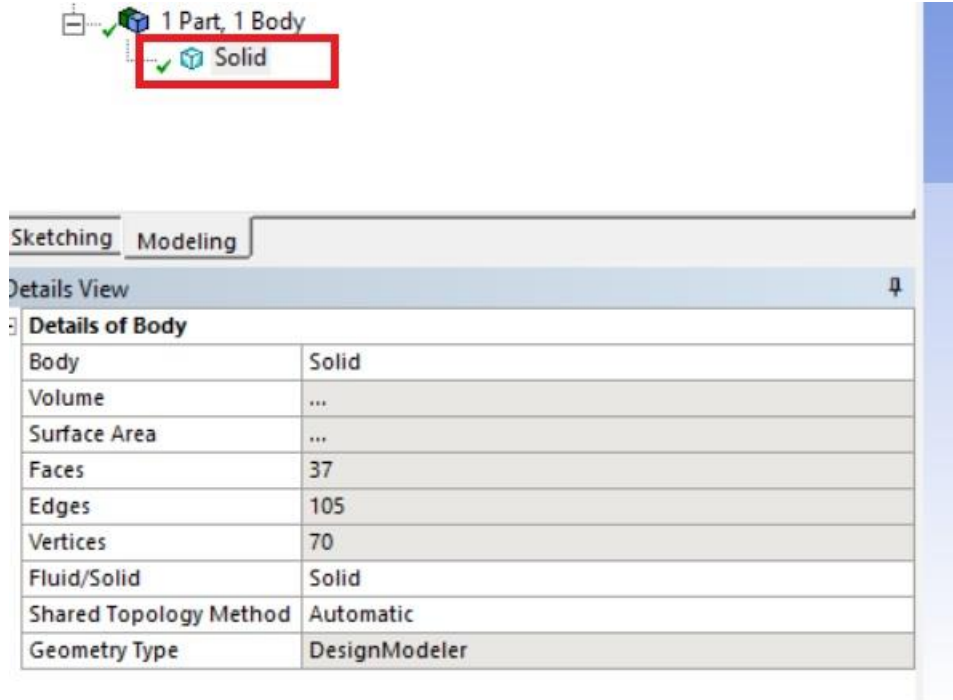


2.6 Después de buscar el archivo se da aceptar y aparece la opción “Import” se le da click derecho y luego click en “Generate” para que se genere la geometría.

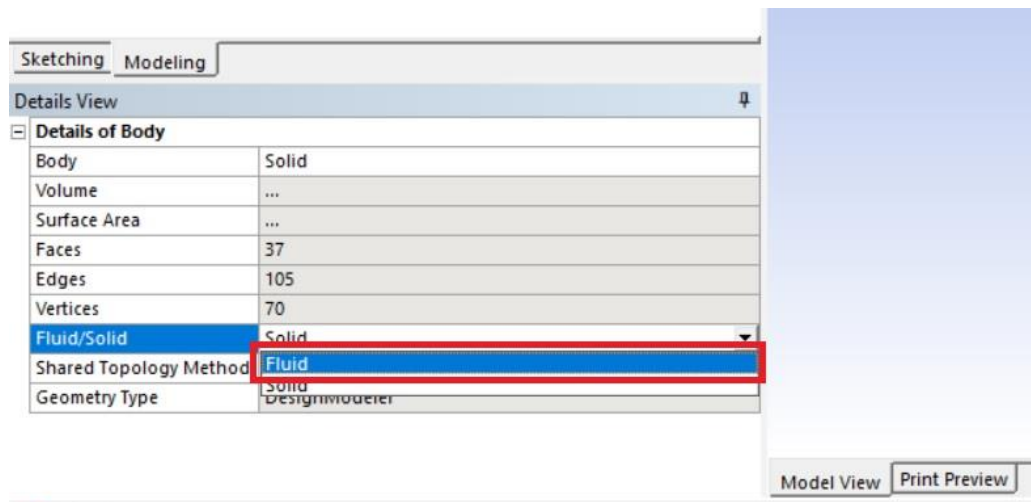




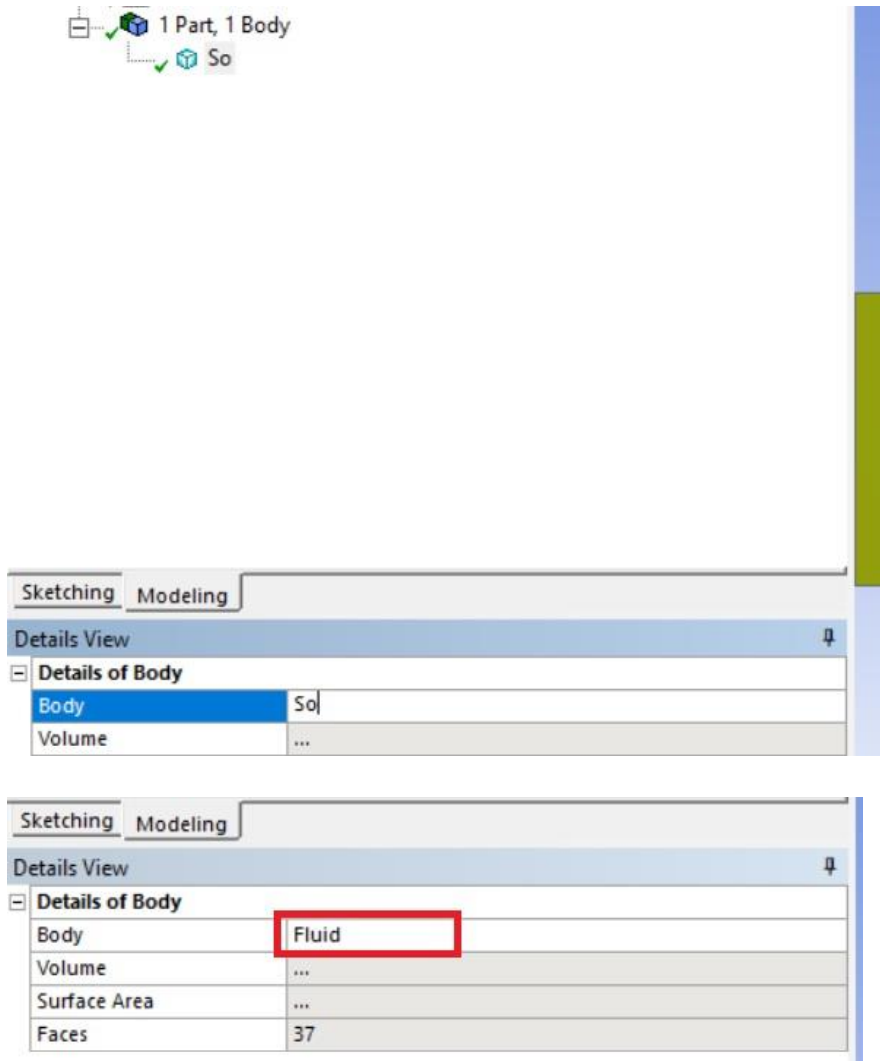
2.7 Por defecto se genera “1 part, 1 body” solido, por lo que es necesario cambiar a fluido. Para cambiar es necesario dar click en solid.



En la ventana “Details View” se selecciona la opción “Fluid/Solid”, se da click en la flecha y se despliegan dos opciones y se selecciona “Fluid”.

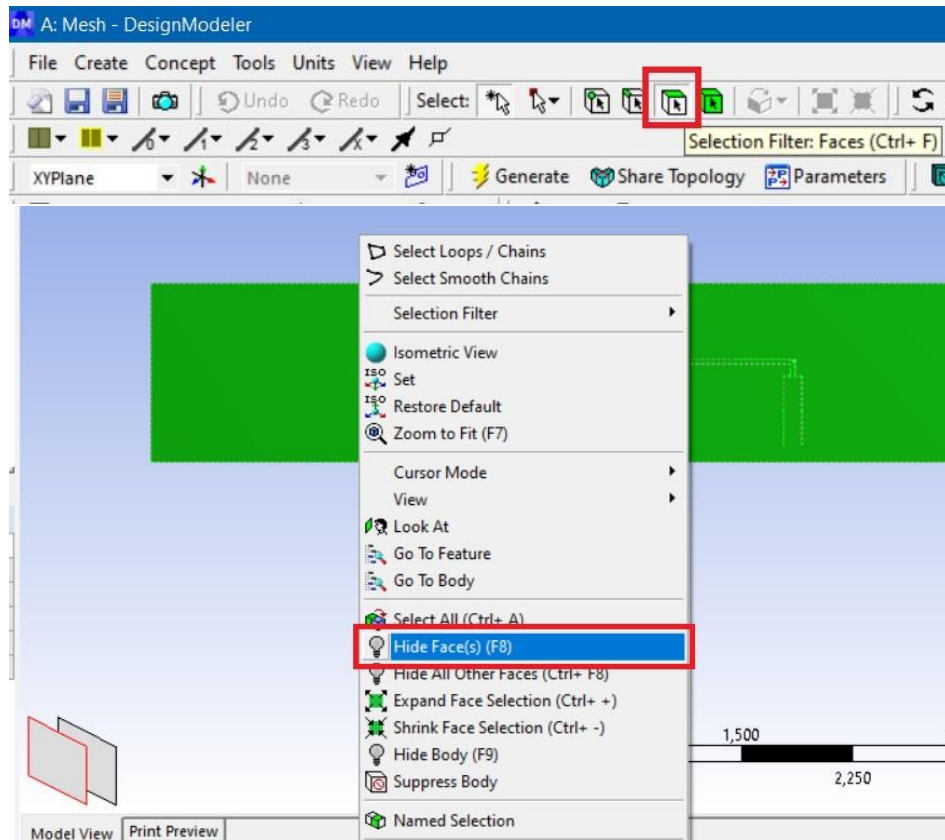


Después de cambiar a “Fluid” se cambia el nombre dando click en “Body”, lo que da la opción de escribir.

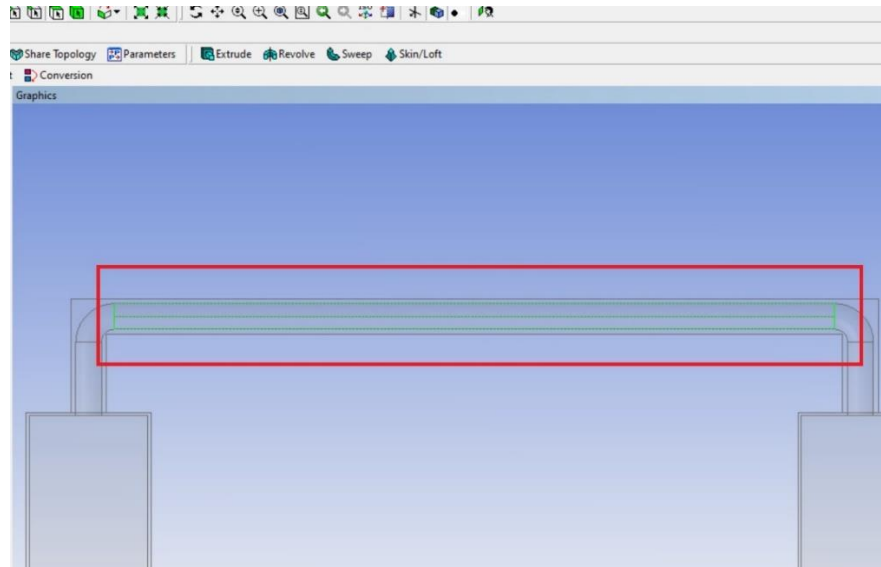


- 2.8 Al importar la geometría la tubería que conecta las dos cámaras del wec queda dividida en dos caras, por lo que se debe utilizar la función “Mesh” para unir las.

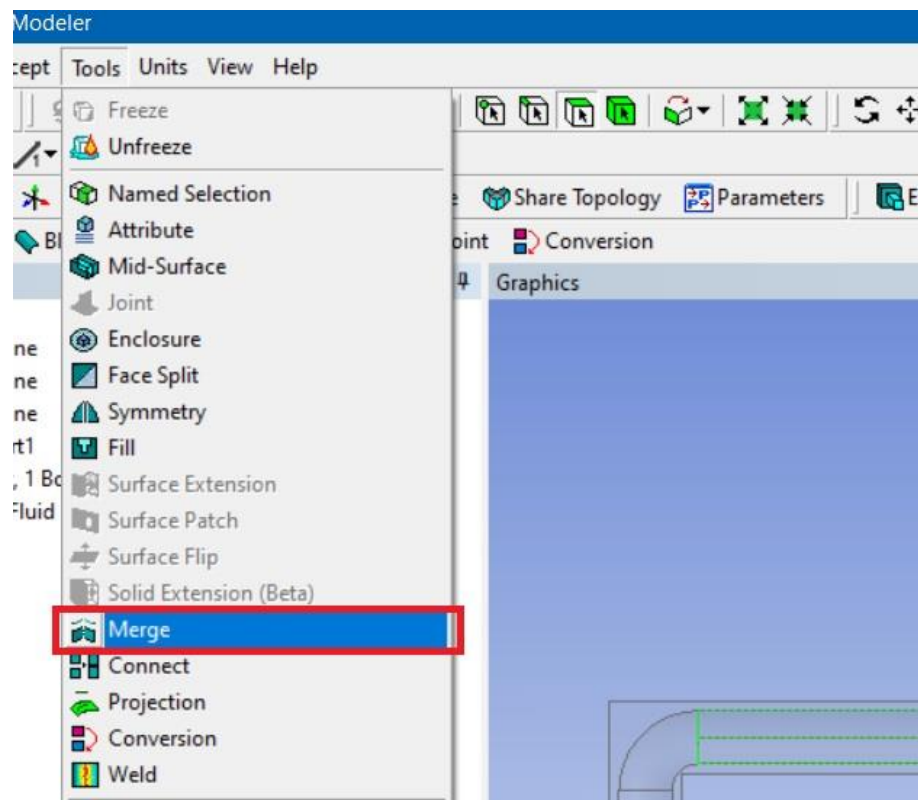
Para seleccionar las dos caras primero se debe ocultar la cara frontal de la geometría, se debe dar click en la opción “Faces” que aparece en el menú de herramientas a continuación se selecciona la cara frontal del canal, luego click derecho y en la ventana que se despliega se selecciona la opción “Hide Face(s)”.



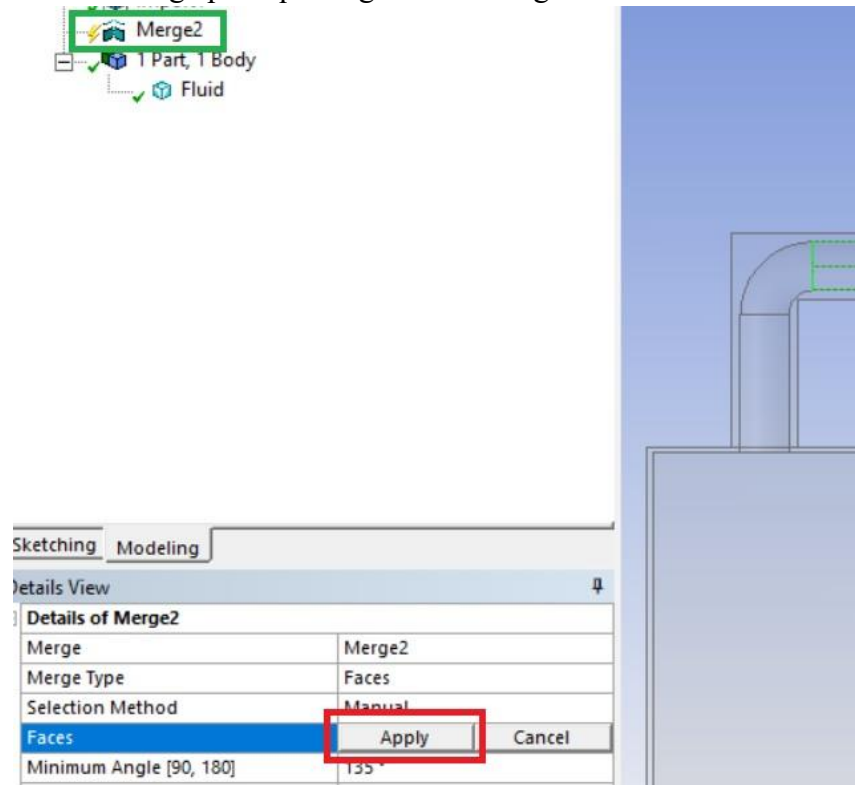
- 1.9 Como ya se encuentra activa la opción “Faces” se seleccionan las dos caras, presionando la tecla control y dando click.



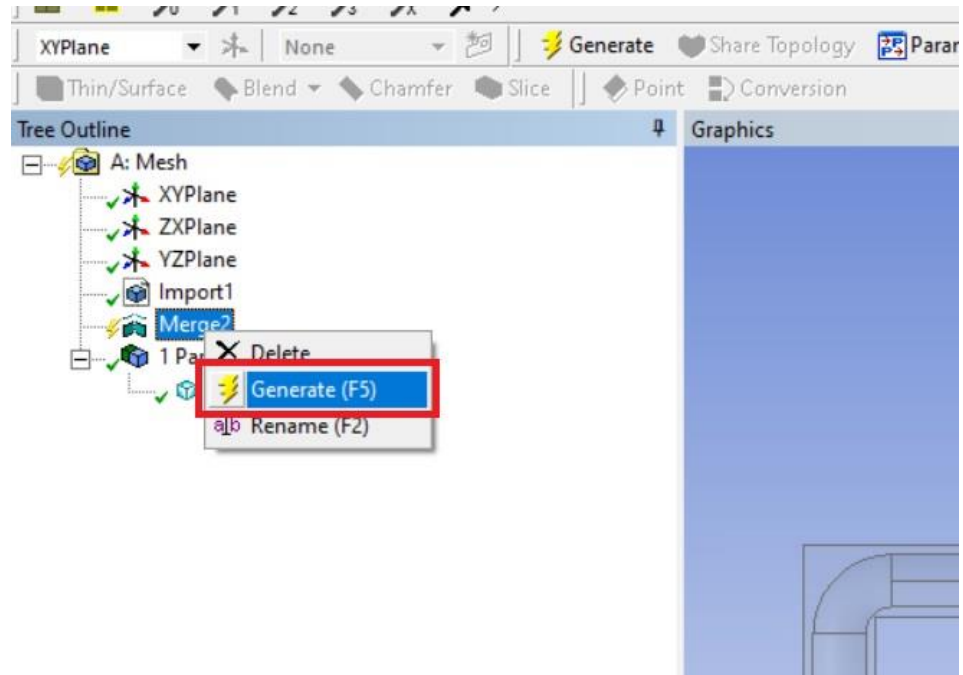
Después de seleccionar las caras se procede a presionar la pestaña “Tools” desplegando una ventana luego se hace click “Merge”.



Después de hacer click en “Merge”, se debe hacer click en “Apply” que aparece en la pestaña “Modeling” para que se genere el merge.

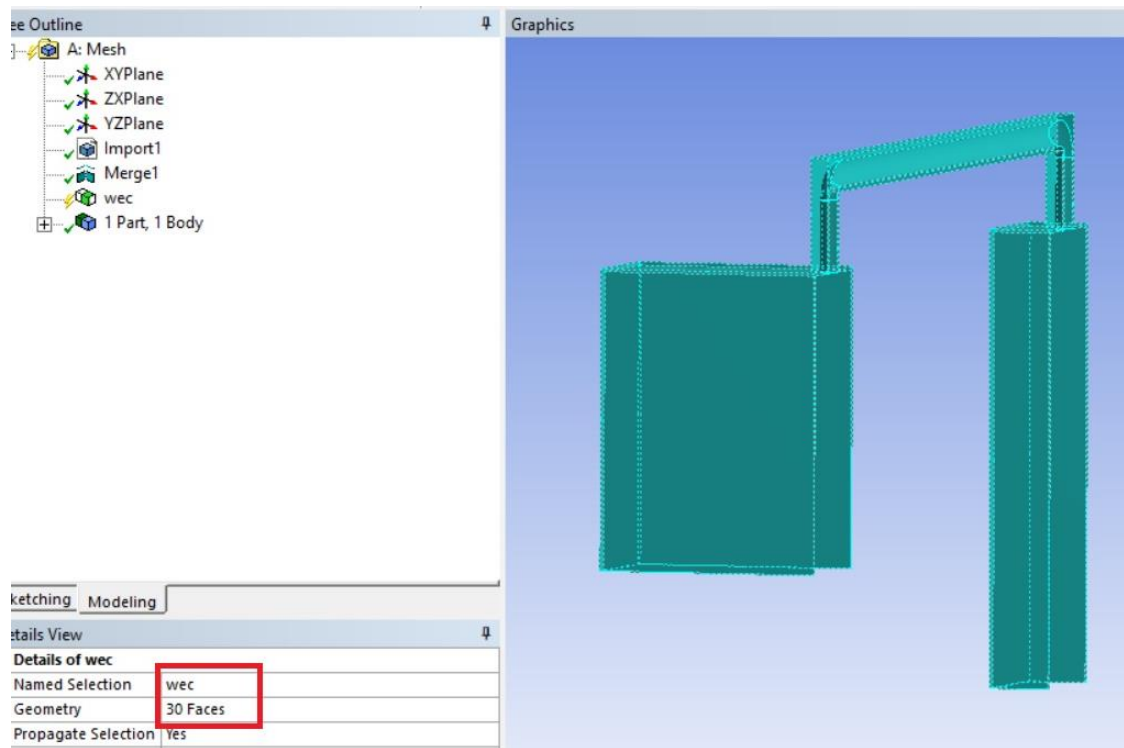


Para que apliquen los cambios y se unan las caras se deben dar click derecho y seleccionar la opción “Generate”.

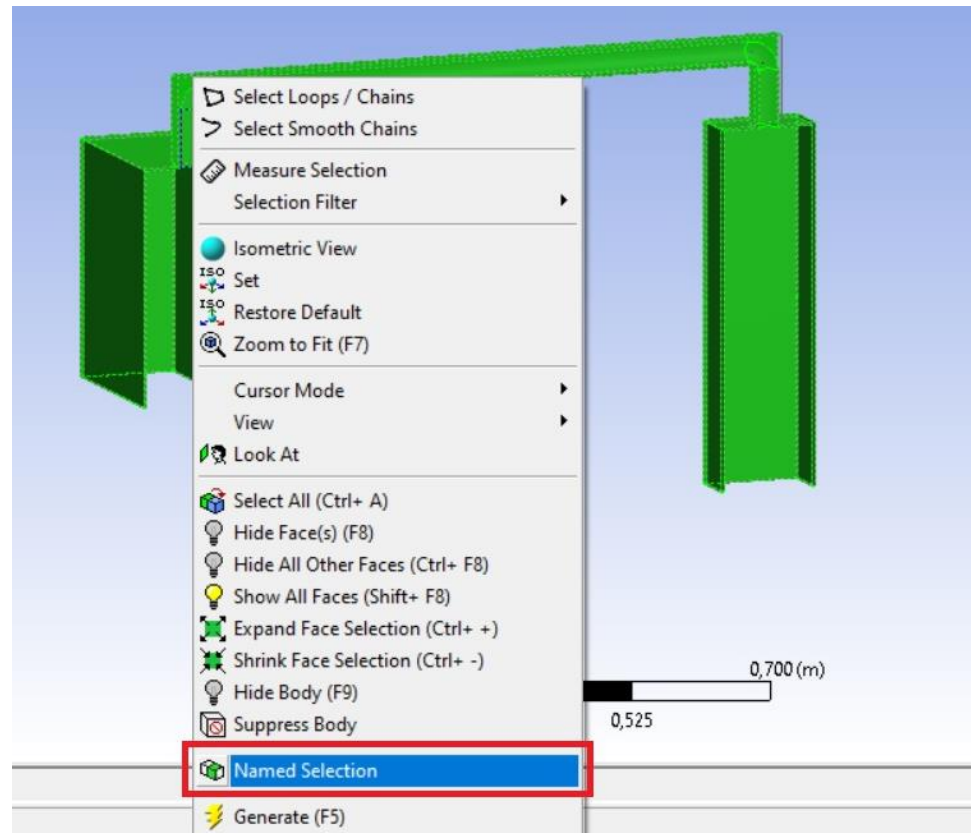


1.10 A continuación, se deben definir las fronteras del wec y del canal, para ello se usa la herramienta “Named Selection”.

Primero se ocultan las caras del canal para poder seleccionar las caras del wec. Son 30 caras las que se deben seleccionar.

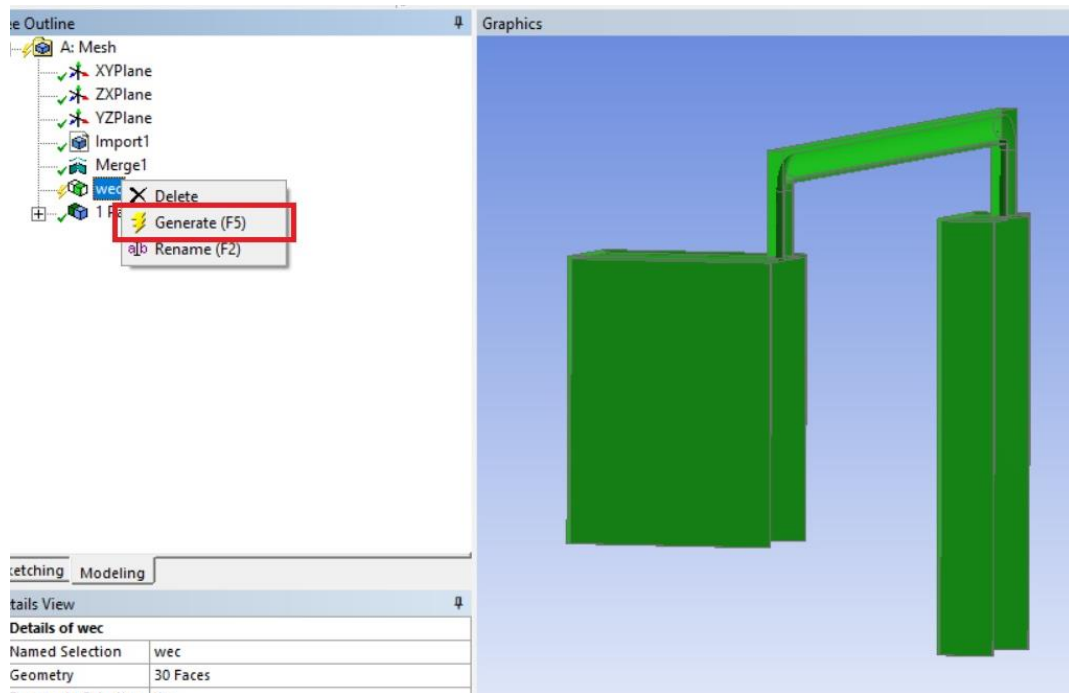


Después de seleccionar todas las caras del wec, se debe hacer click derecho y seleccionar la opción “Named Selection”.

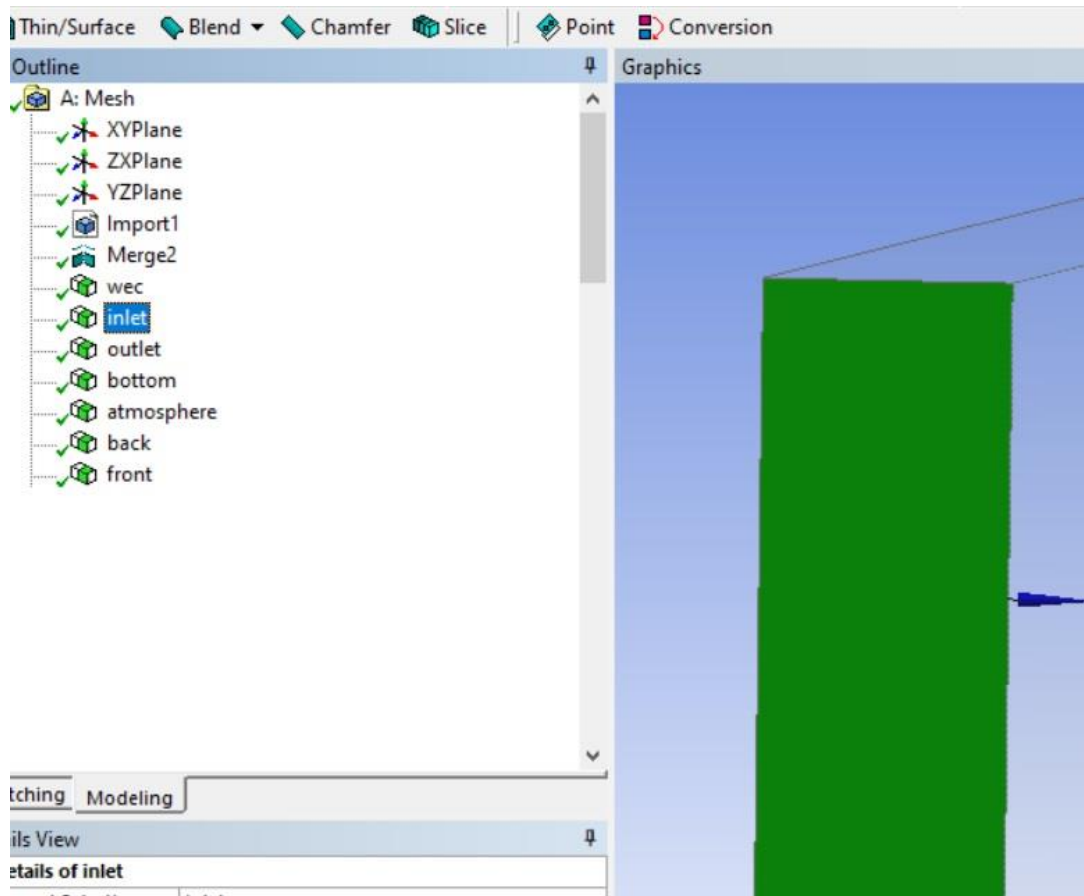


A continuación, se procede a dar click en “Apply” para confirmar el número de caras y posteriormente se cambia el nombre del “Named Selection” a “wec”.

Para que se termine de generar se hace click derecho sobre el nombre “wec” y se selecciona “Generate”.



Estos pasos se deben seguir para seleccionar las demás fronteras de la geometría.

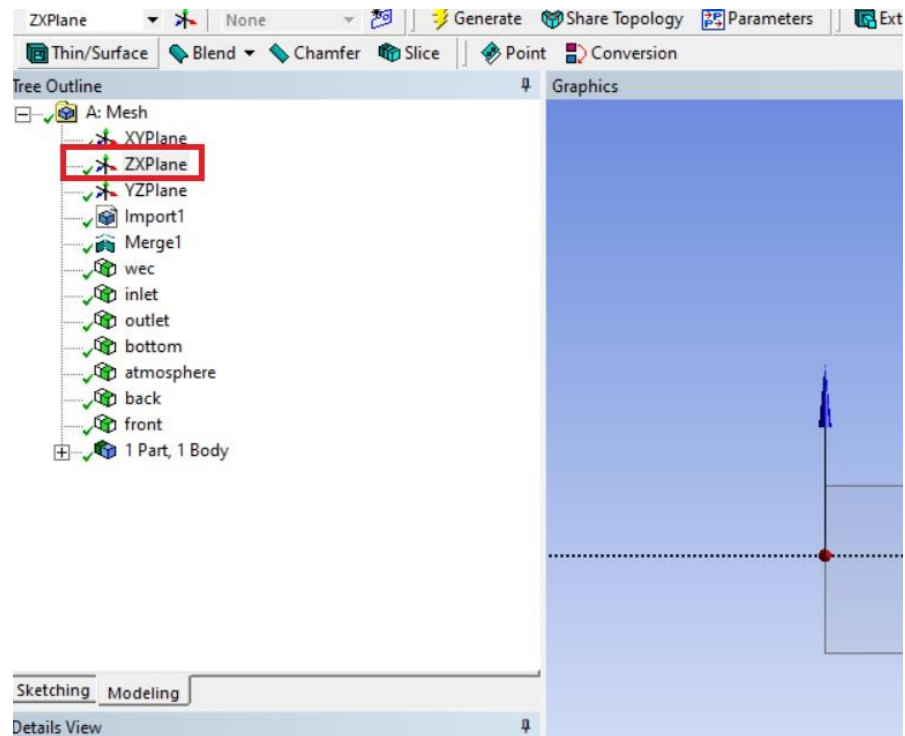


Las fronteras que deben quedar al final de la operación son “wec”, “inlet”, “outlet”, “bottom”, “atmosphere”, “back” y “front”.

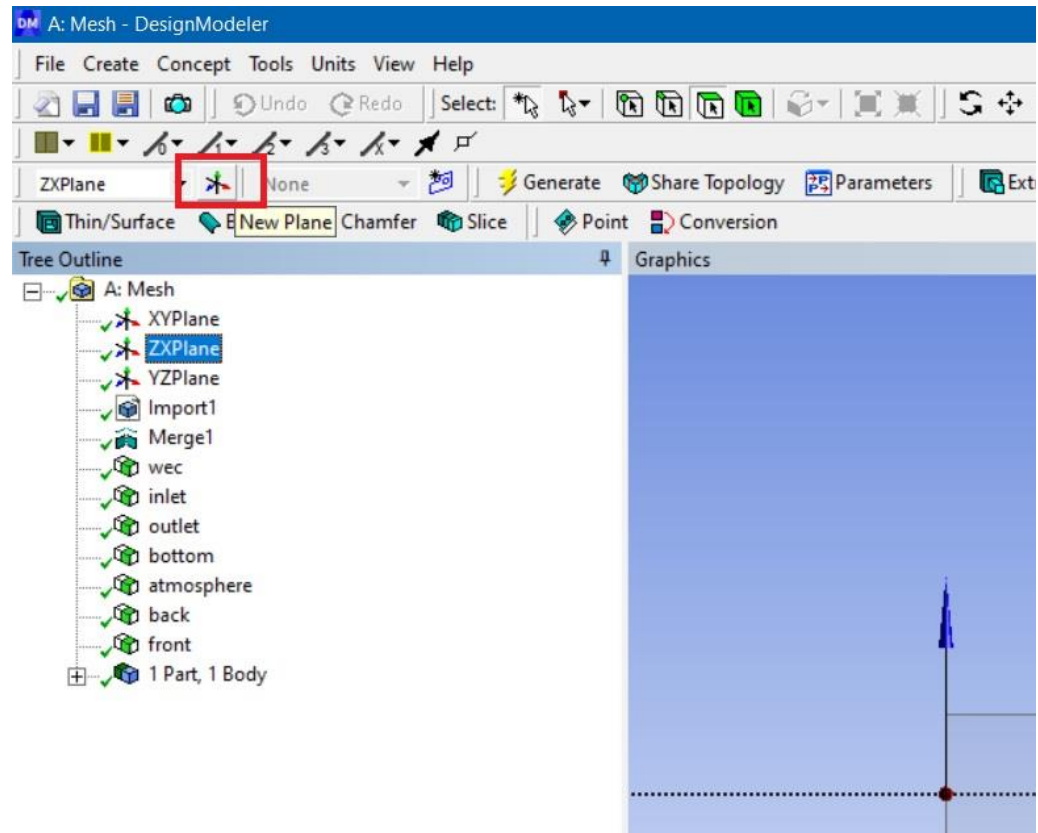
- 1.11 Al terminar de establecer las fronteras se deben realizar los cortes correspondientes a la geometría, ya que de esta manera podremos separar zonas que necesiten ser refinada o requieran atención especial a la hora de mallar.

Para realizar los cortes se sigue el mismo procedimiento, primero se debe seleccionar el plano paralelo al cual se va hacer el corte. Como ejemplo se hará el corte de la superficie libre.

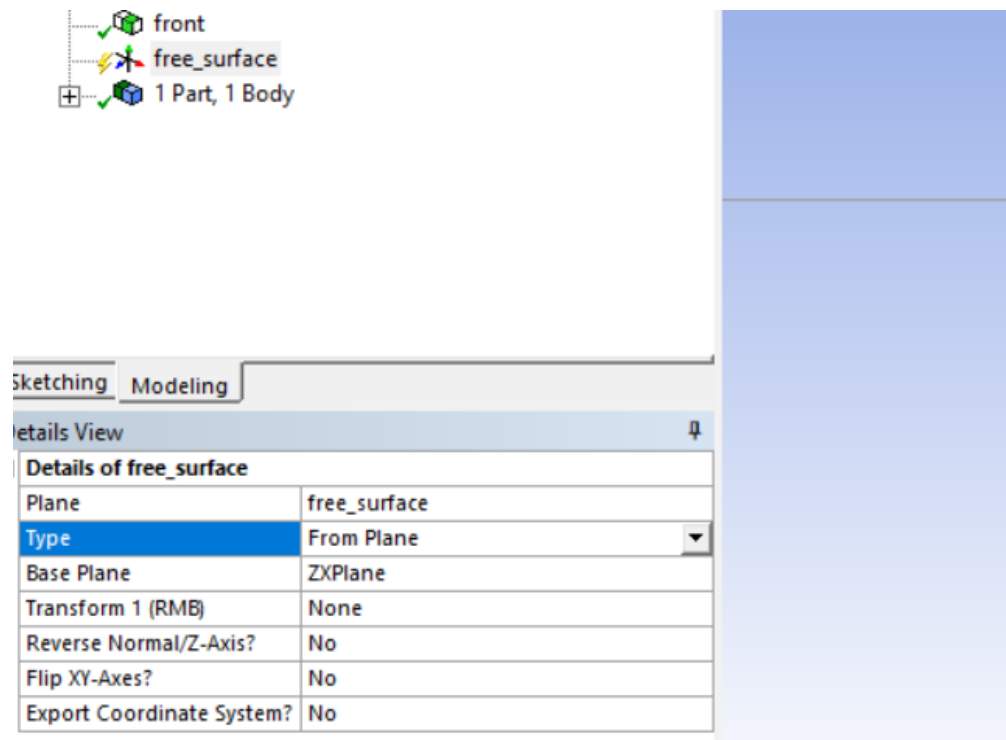
Primero se debe seleccionar el plano que es paralelo la superficie libre, en este caso sería el plano “ZX”.



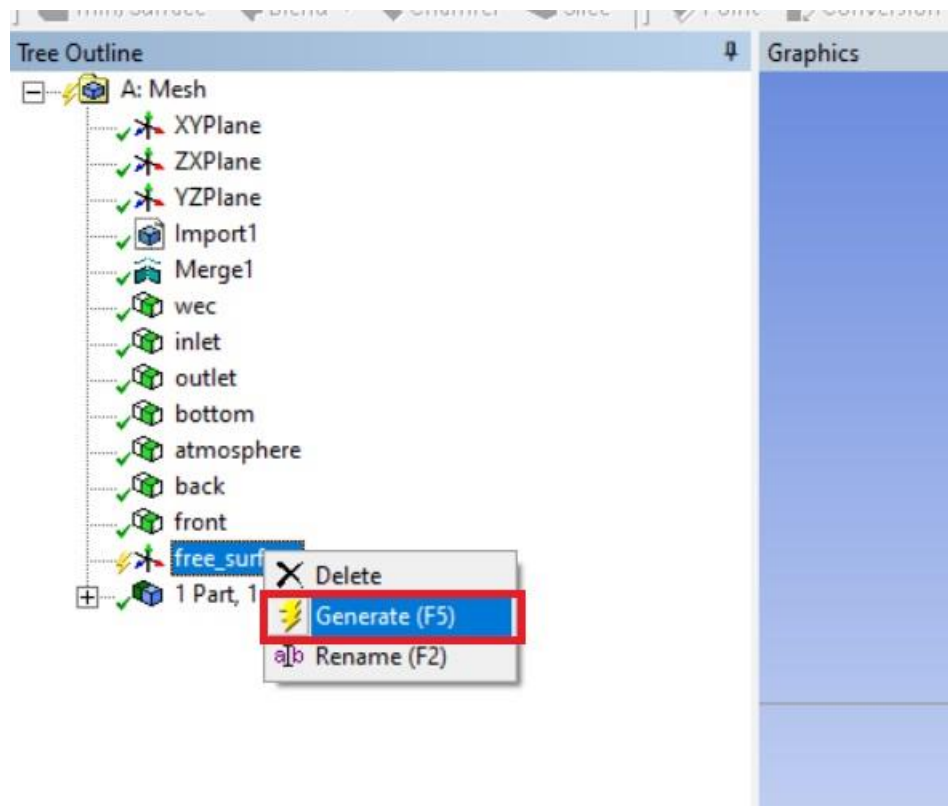
Después de seleccionar el plano se debe hacer click en la opción del menú de herramientas “New Plane”



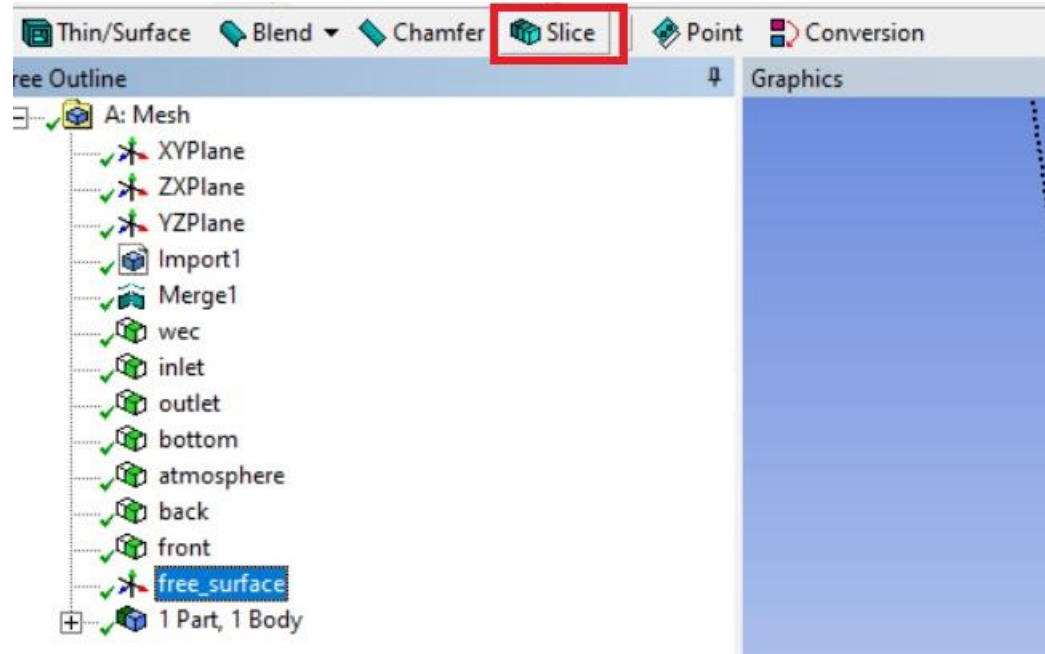
Esto hará que se cree un plano al cual se daremos el nombre de “free surface”



Como el plano que se genera para hacer el corte está a 0mm del plano “ZX” se puede generar sin hacer otra modificación, para esto se procede haciendo click derecho sobre el plano creado “free surface” y en las opciones que se despliegan seleccionamos “Generate”.

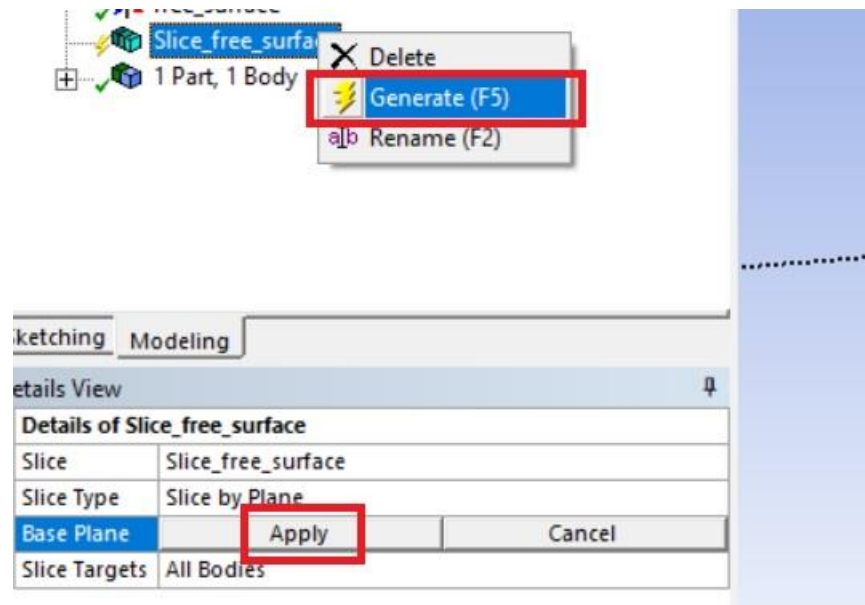


- 1.12 Para realizar el corte se debe seleccionar el plano en el cual estará el corte, en el caso del ejemplo sería el plano “free surface”, luego hacemos click en la pestaña “Slice”.

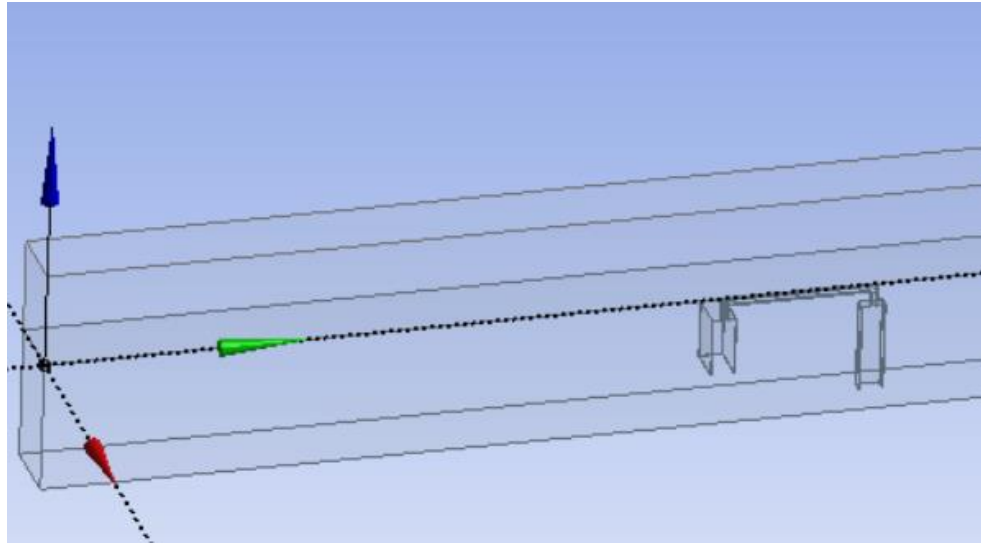


Al hacer click en “Slice” se crea un corte al cual le daremos el nombre de “Slice\_free\_surface”, y en la opción “Slice Targets” seleccionamos los cuerpos que va a cortar el plano, en este caso cortara todos los cuerpos.

Para generar el corte se debe hacer click en “Apply” y posteriormente click derecho en el corte creado y seleccionar la opción “Generate”.

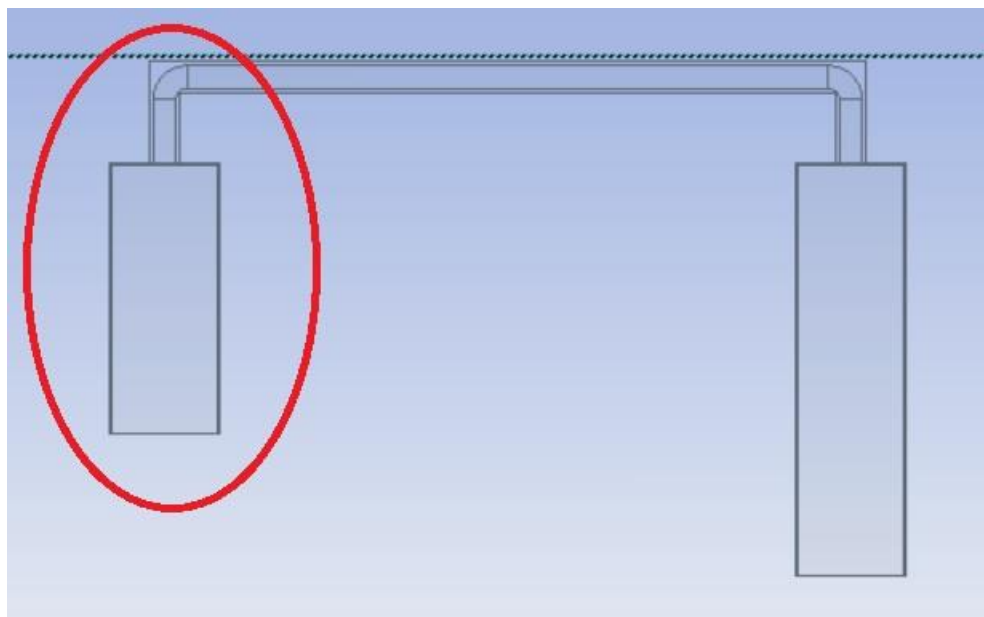


En la figura se puede apreciar el corte generado en la superficie libre.

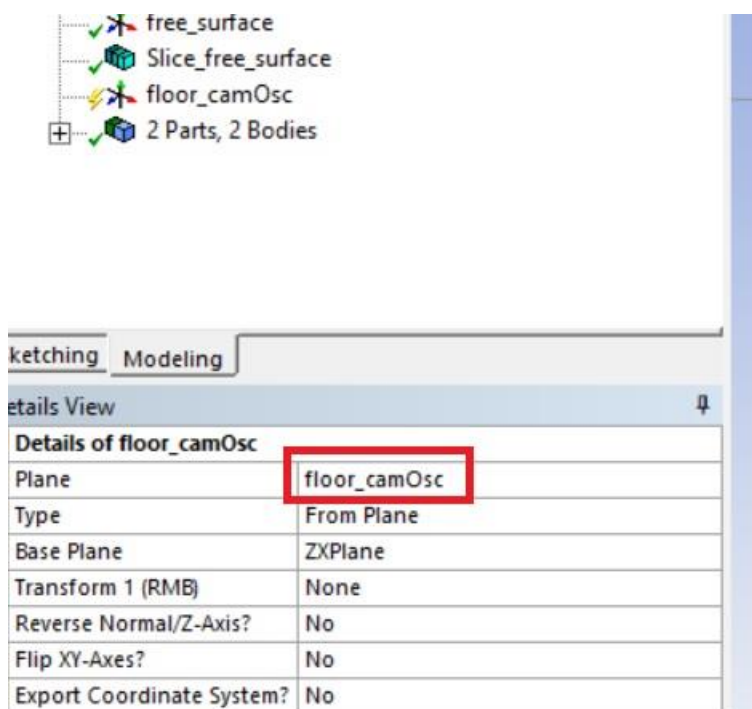


- 1.13 En el caso de cortes que se hagan en planos que no estén sobre el plano de referencia, se debe seguir el procedimiento mencionado anteriormente pero adicional se debe especificar la dirección y la distancia a la cual va estar del plano de referencia.

Como se ejemplo se mostrará el procedimiento que se debe seguir para hacer el corte en el piso de la cama de oscilación.

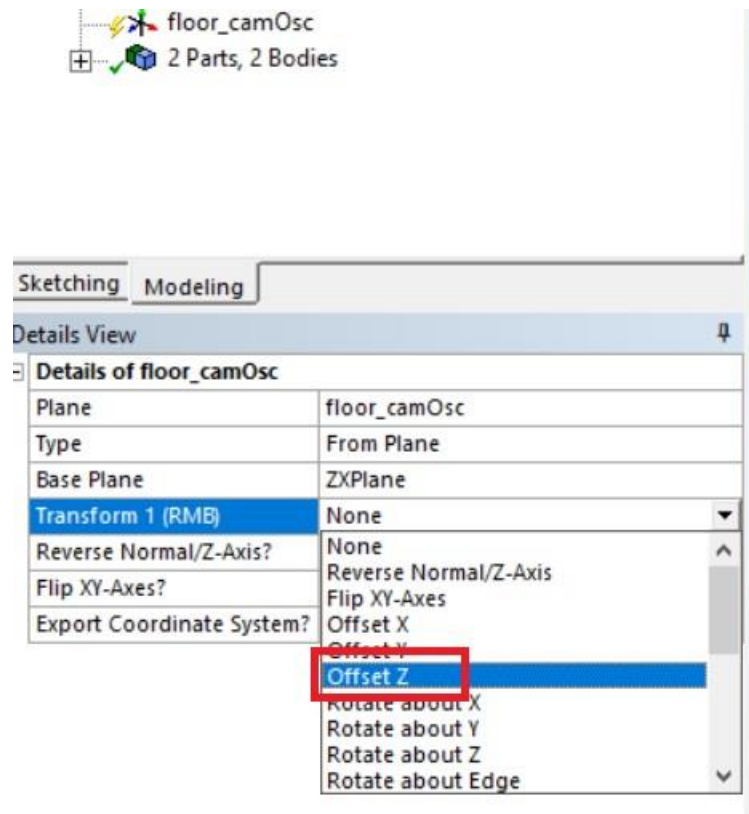


Primero se debe seleccionar el plano de referencia que es el plano “XZ”, luego se debe dar click en “New Plane”. Se cambia el nombre del plano a “floor\_cam\_Osc”.

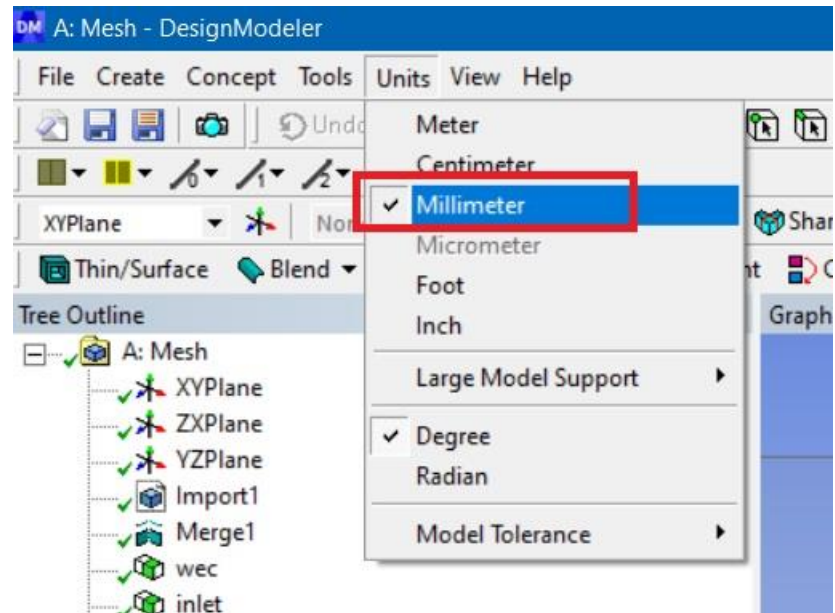


Antes de generar el plano se debe especificar la distancia a la que se quiere generar el plano, para garantizar que sea paralelo al plano de referencia de debe elegir un

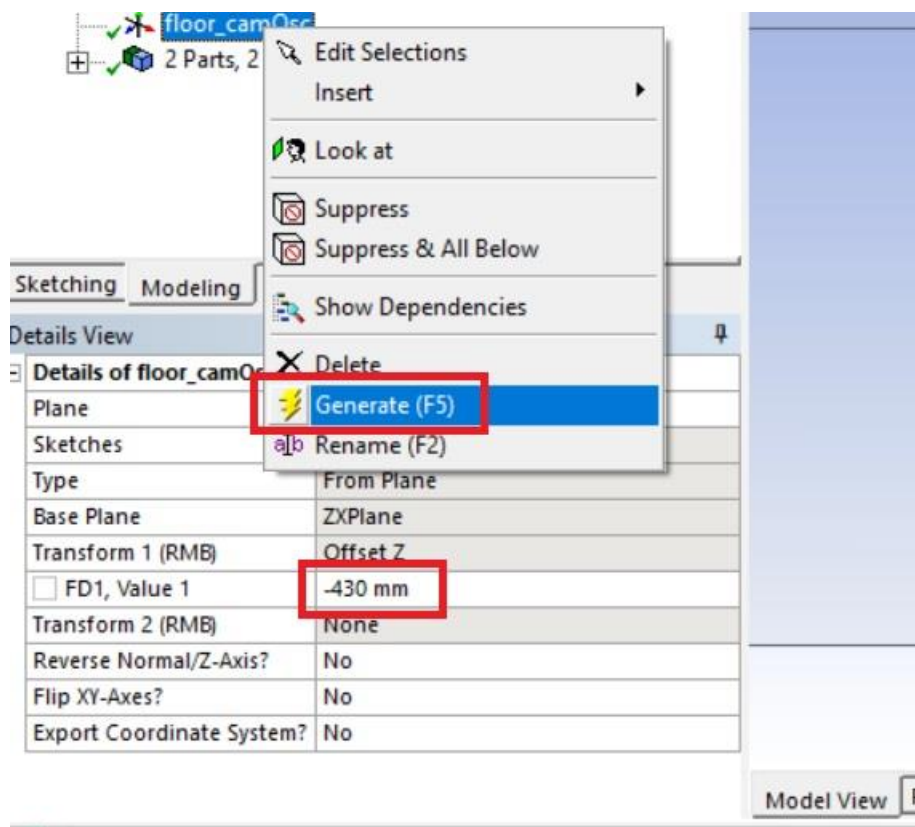
eje que sea vertical al plano, esto se logra desplegando las opciones de la fila “Transform 1(RMB)” y seleccionando “Offset Z”.



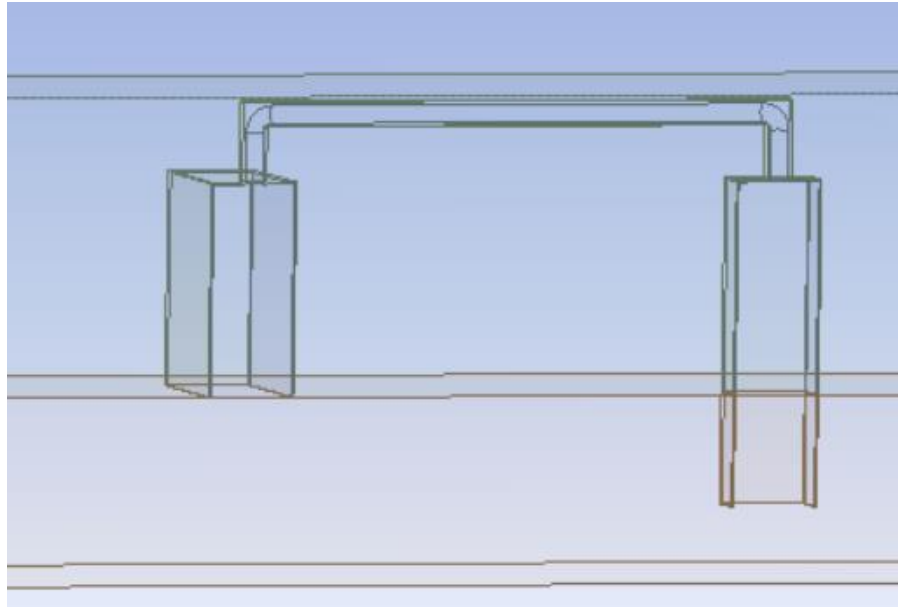
Se prosigue cambiando las unidades de distancia, dando click en units y seleccionando “Millimeter”.



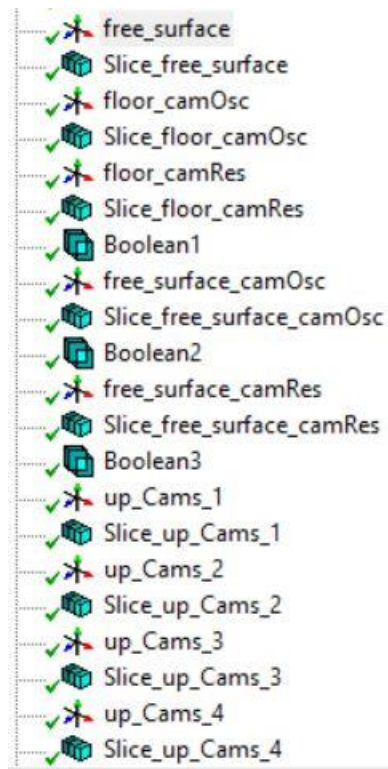
Después de cambiar las unidades se procede a escribir el valor de la distancia a la cual se encontrará el plano y se genera. La distancia a la cual estará este plano es -430mm ya que está en dirección opuesta al eje Y.

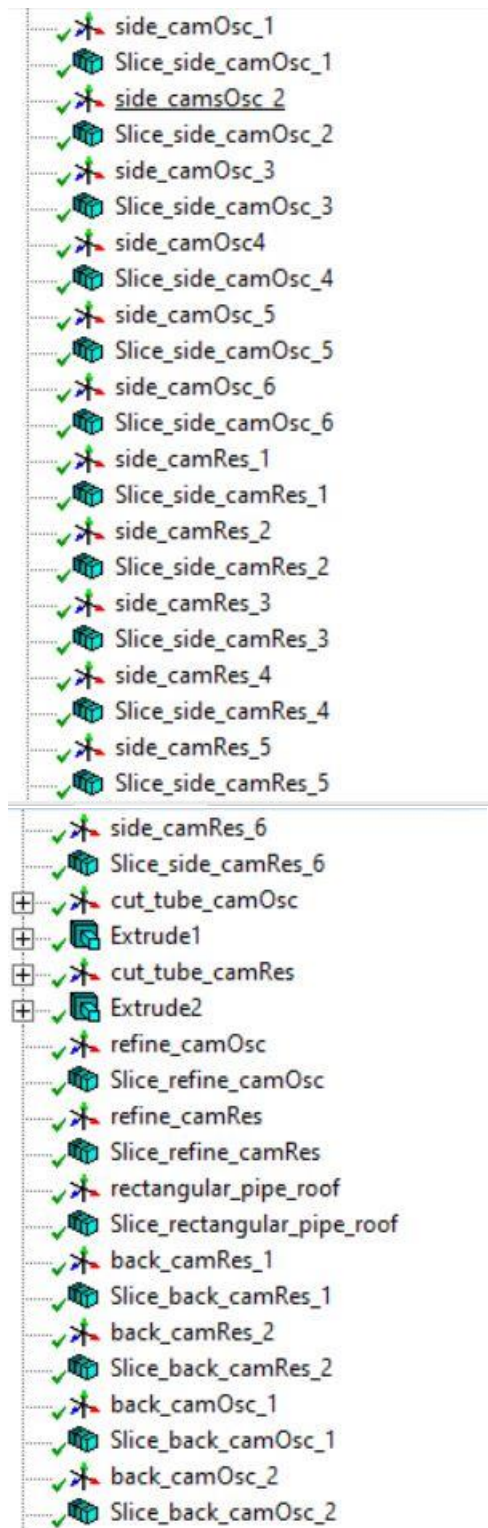


Para realizar el corte se siguen los pasos mencionados en el numeral 1.12, se le dará el nombre "Slice\_floor\_camOsc", el resultado se podrá observar en la imagen que se muestra a continuación.



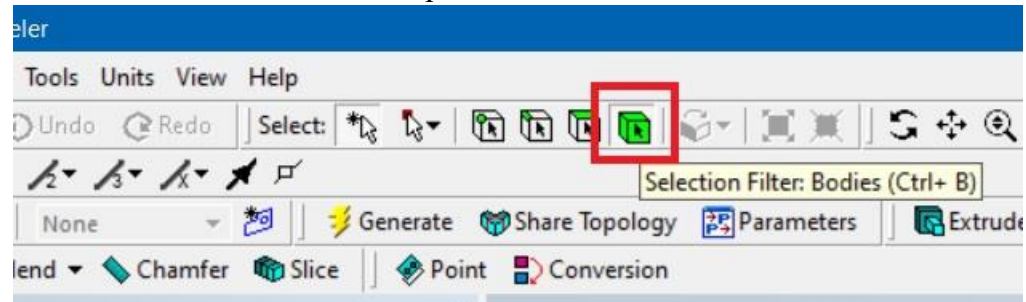
1.14 Con los demás cortes se sigue el mismo procedimiento y se sigue el siguiente orden.



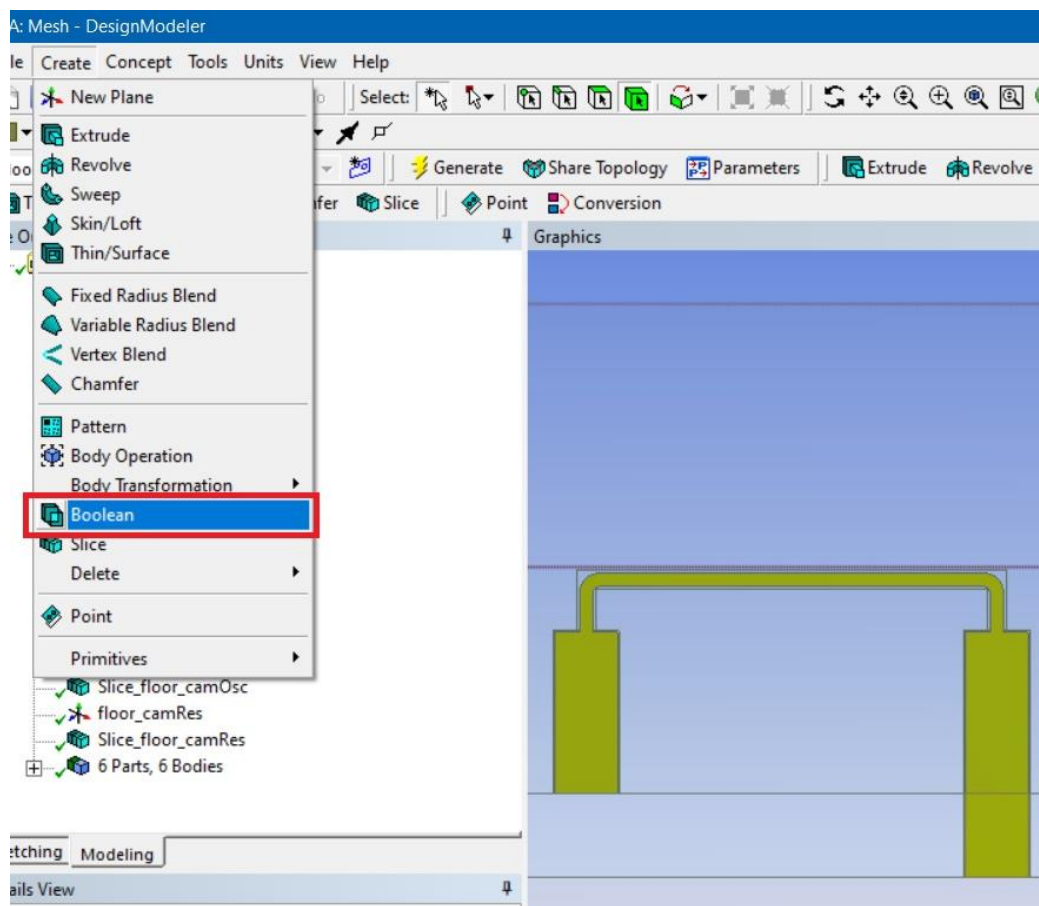


- 1.15 En el proceso de preparar la geometría se deben usar la herramienta “Boolean” para unir dos cuerpos.

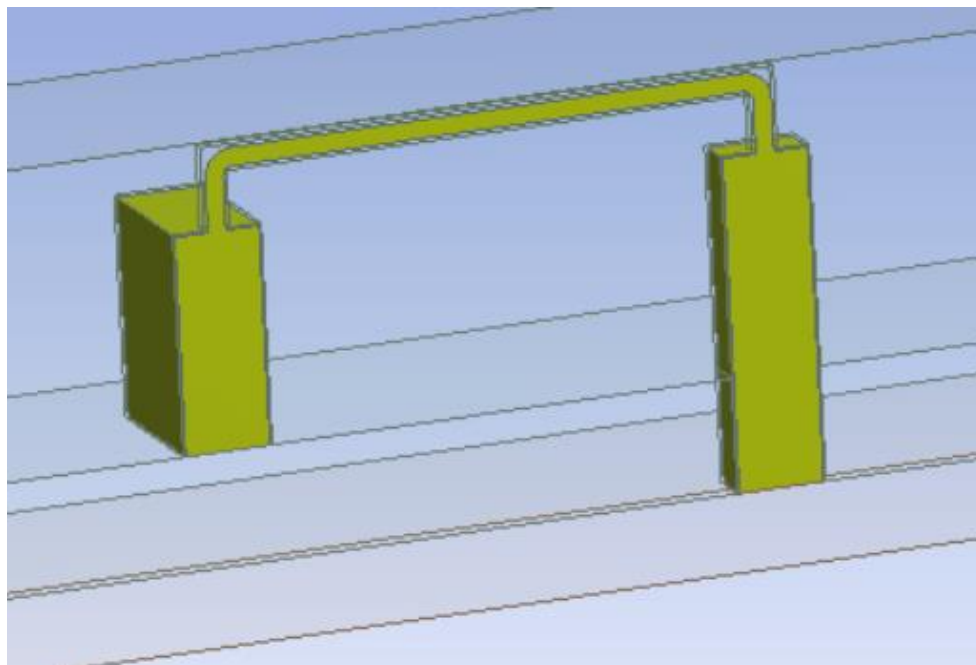
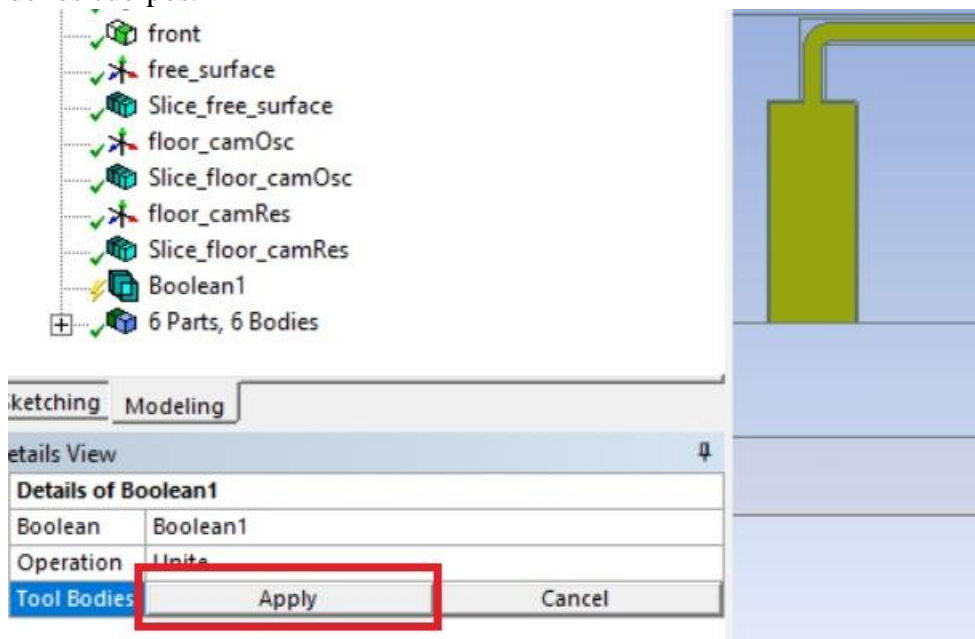
Primero se debe seleccionar la opción de “Bodies”



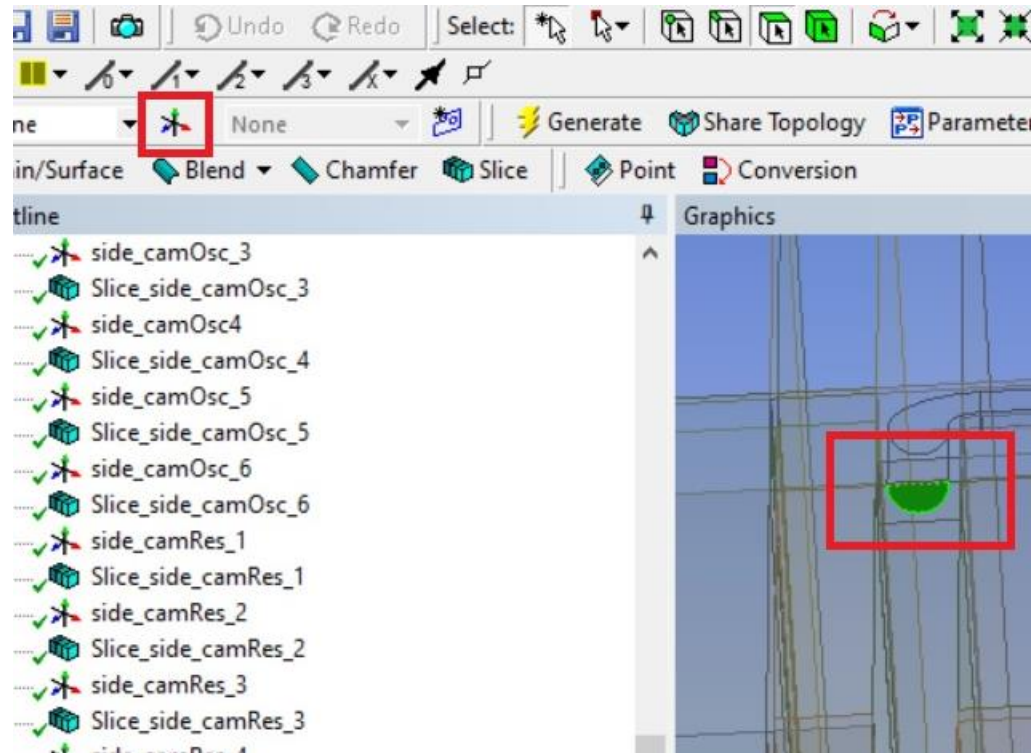
Después se seleccionan los cuerpos que se van a unir. Posteriormente se da click en “Create” y damos click “Boolean”.



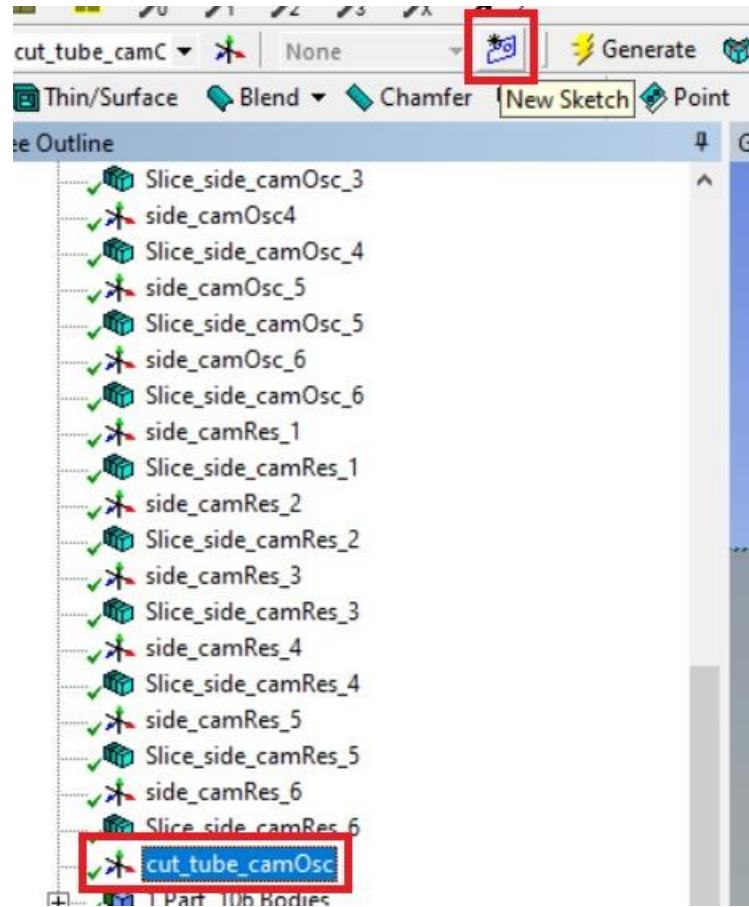
Se crea el “Boolean1” y después se hace click en “Apply”, a continuación, se hace click derecho en “Boolean1” y se selecciona “Generate” para que se genere la unión de los cuerpos.



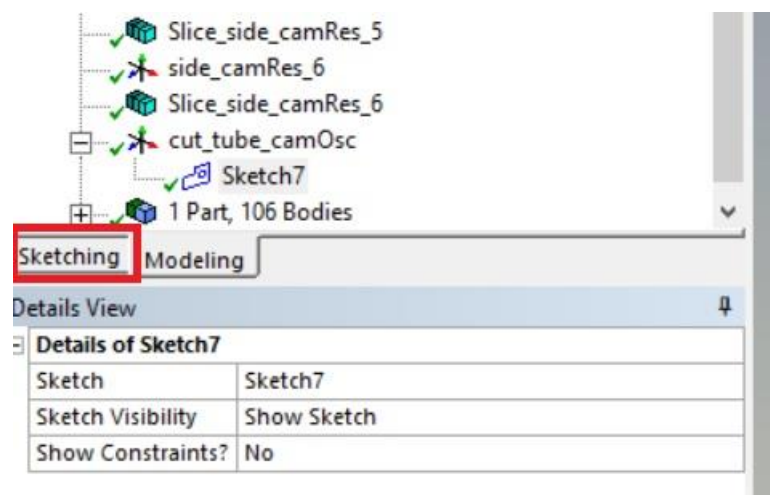
- 1.16 Para realizar el corte de la tubería, por ser circular, se debe hacer un proceso diferente. Se deben ocultar los cuerpos y las caras alrededor de la tubería, para seleccionar la cara semicircular y generar un plano en este caso se le dará el nombre “cut\_tube\_camOsc”.



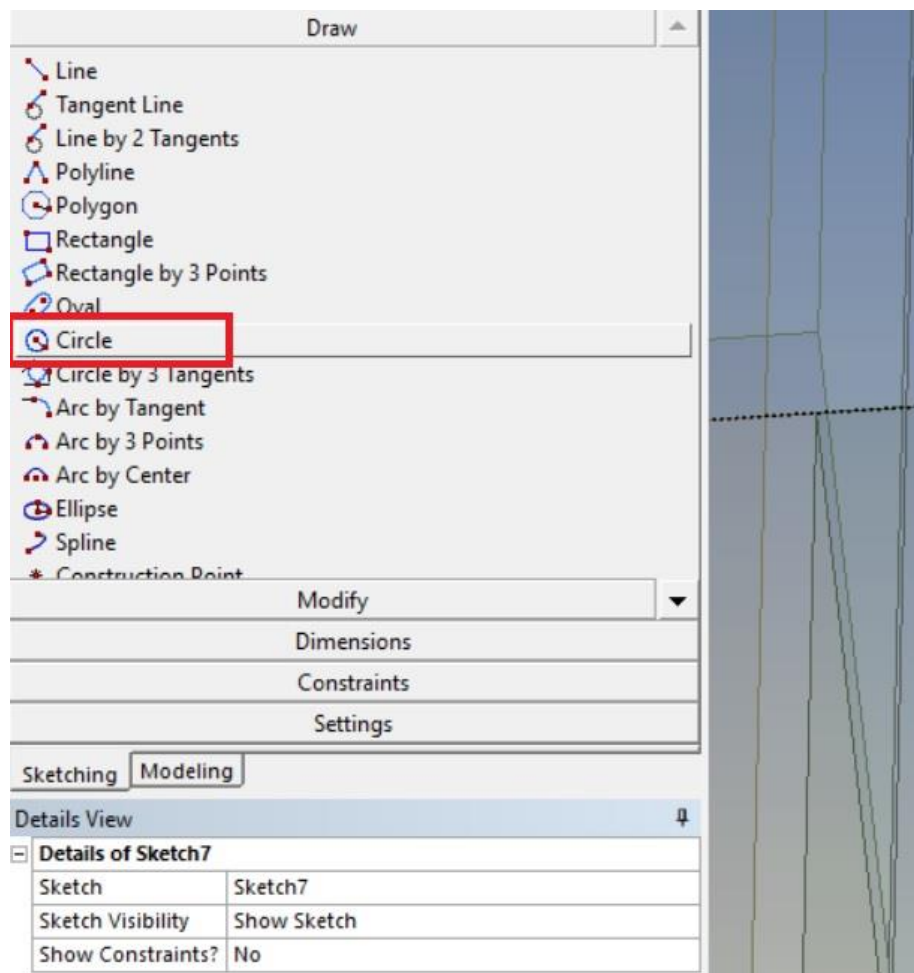
Después de generar el plano se hace click sobre el plano para crear un “Sketch” sobre el plano.



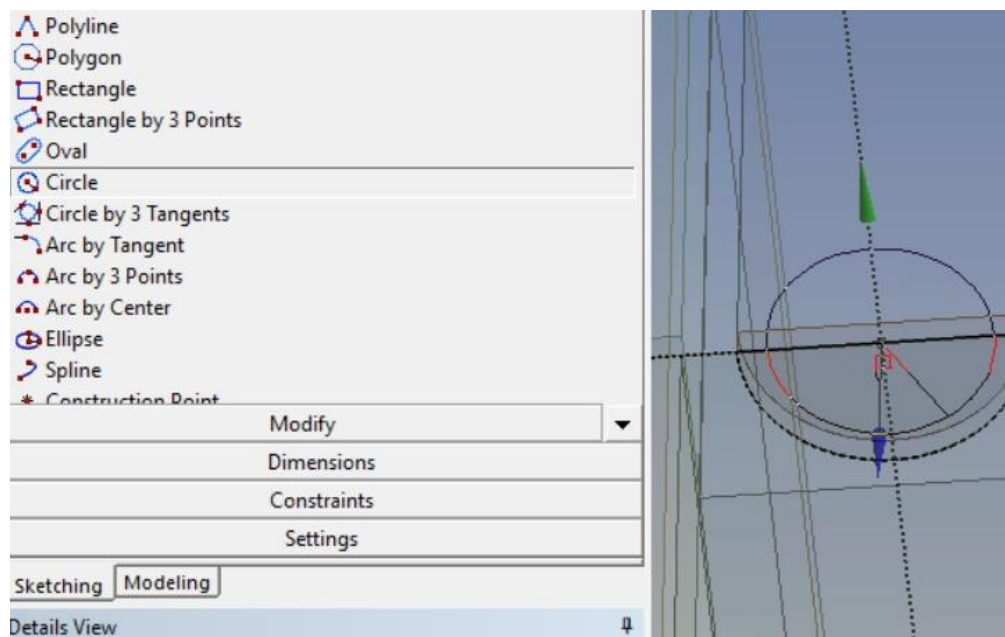
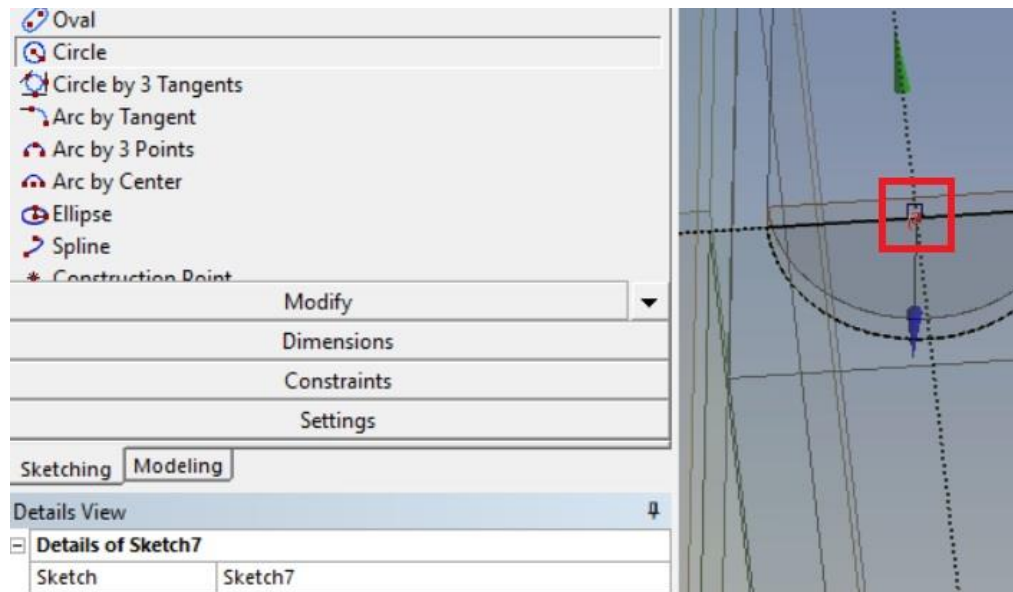
El paso a seguir después de crear el Sketch es diseñar el semicírculo que es la geometría que se usara para hacer el corte.

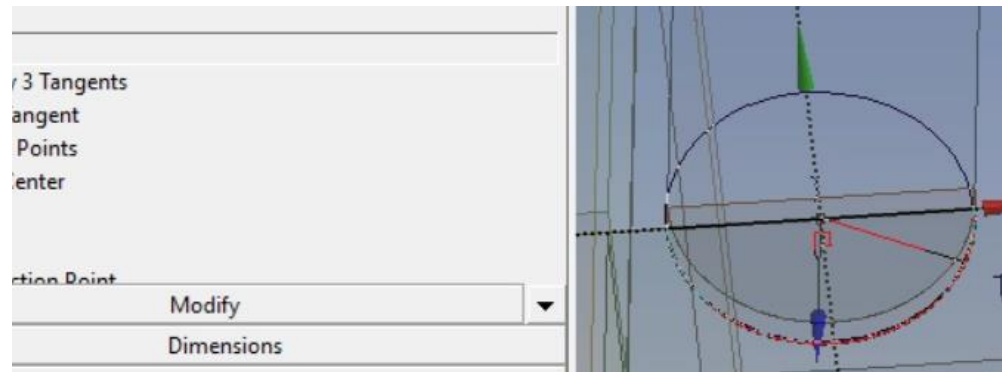


Y hacemos click en “Circle”, para así poder dibujar la geometría.

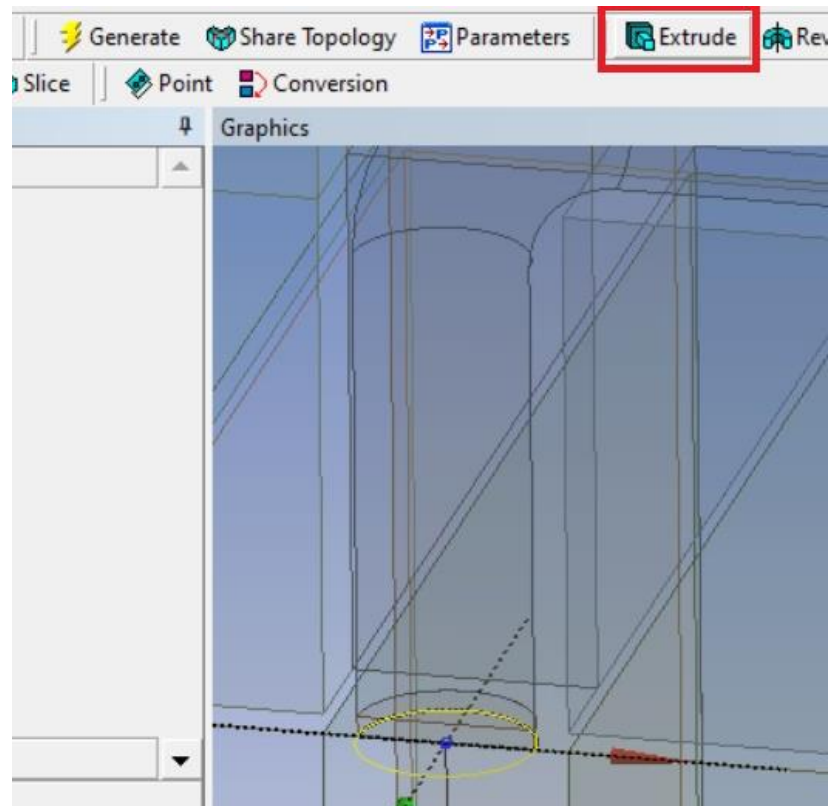


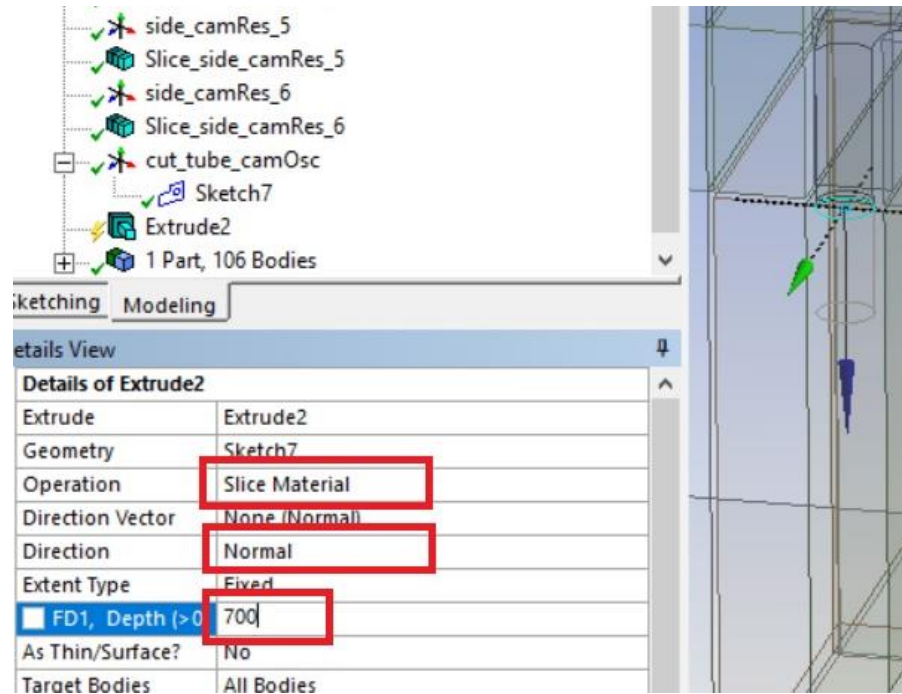
Al hacer click en “Circle” aparecerá un lápiz y tenemos que buscar el centro de referencia para dibujar el círculo. Se hace en el centro y se arrastra el círculo hasta llegar al perímetro del plano y se hace click nuevamente para que se cree.





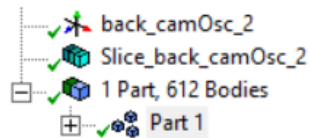
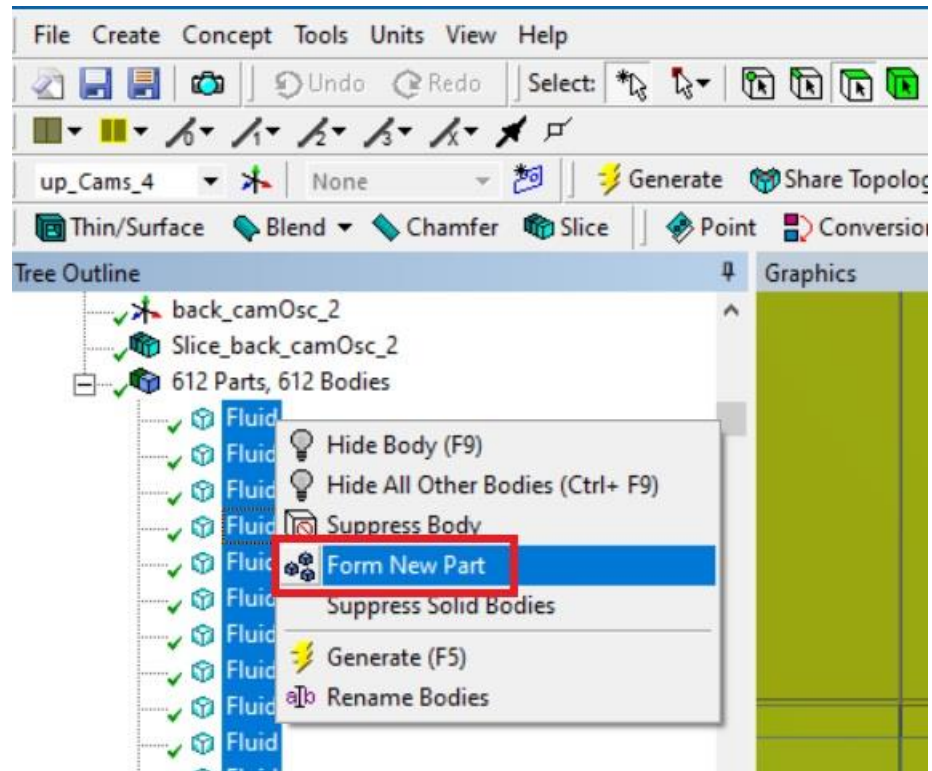
Después de creado el círculo se selecciona y se busca la herramienta “Extrude” y se hace click. Se debe verificar que en las condiciones del “Extrude” en “Operation” este activa “Slice Material” para se genere un corte, en “Direction” debe estar normal al plano y la distancia debe ser de 700mm.





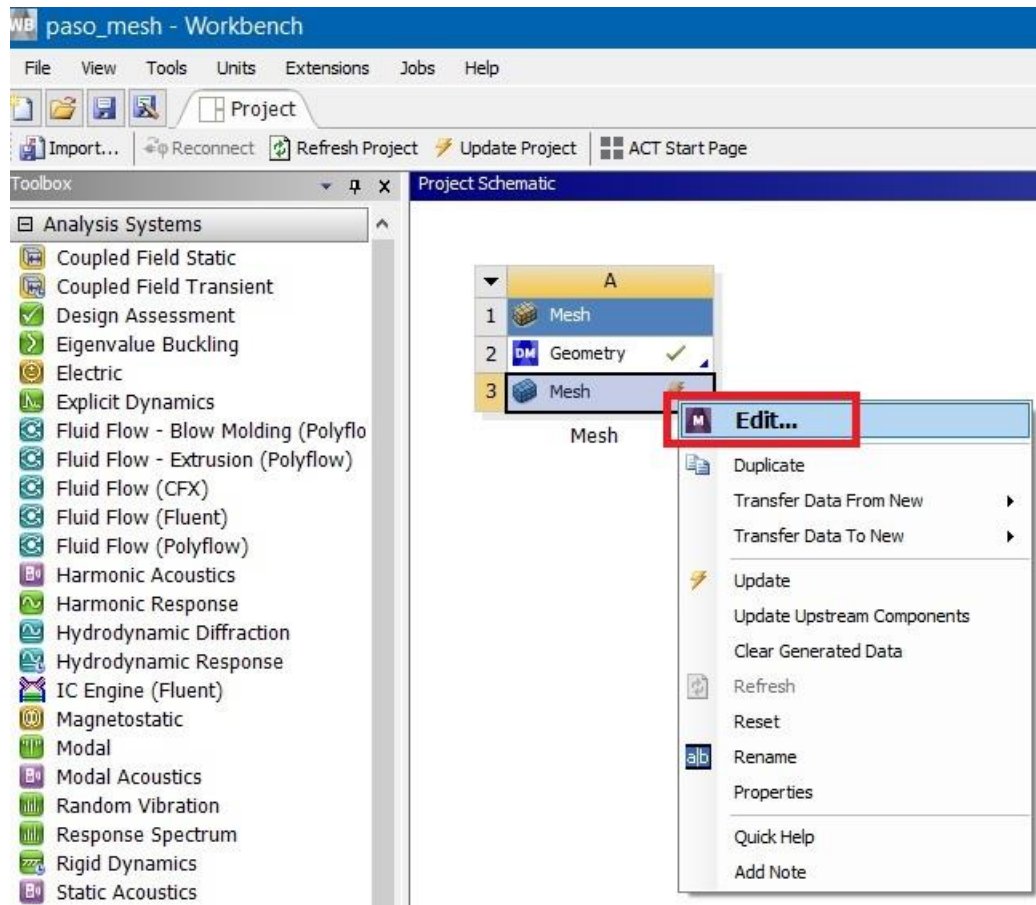
Posteriormente se da click derecho en el “Extrude” y se selecciona “Generate”. Para la otra parte de la tubería se realiza el mismo procedimiento.

- 1.17 Al terminar de hacer los cortes se generan 612 Partes y 612 Cuerpos, el número correcto de Partes debe ser 1, para esto se deben seleccionar todas las partes hacer click derecho y dar click en “Form New Part”. Como resultado habrá 1 Parte con 612 cuerpos.

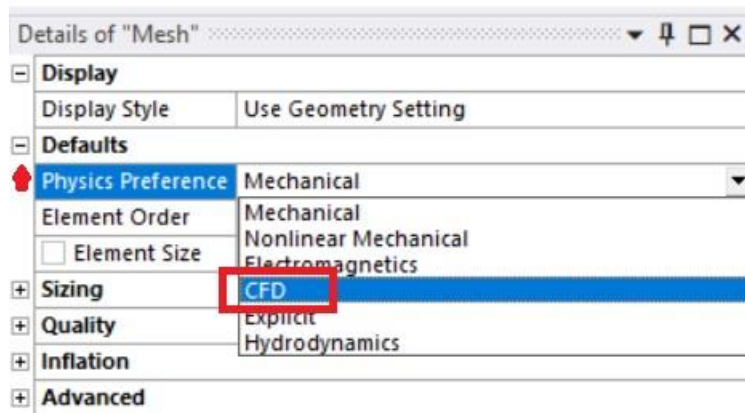


### 3. Mallado

Después de preparar la geometría cerremos y volvemos al Workbench y para mallar hacemos click derecho en “Mesh” y posteriormente click en “Edit” para abrir el mallador de Workbench.



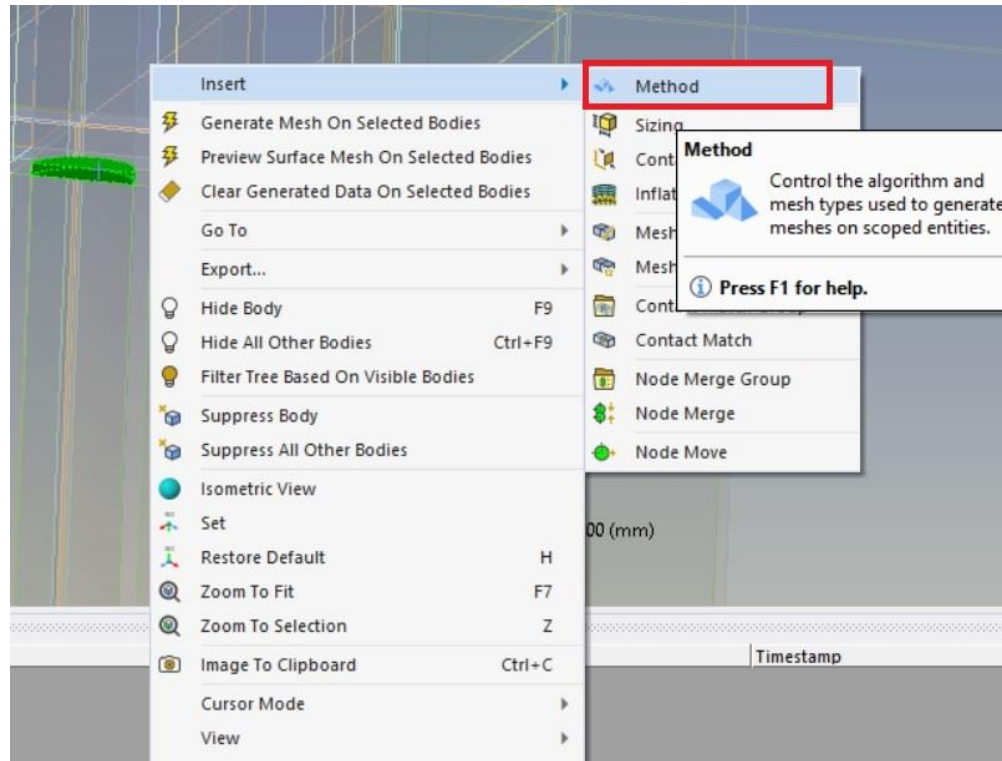
3.1 Se debe garantizar que las preferencias físicas de la geometría es en CFD ya que es un fluido lo que se va a analizar. Para esto se hace click en “Mesh”, para que aparezca en la parte inferior detalles de la malla (“Details of Mesh”), se despliegan las opciones de “Defaults” y en “Physics Preference” se selecciona la opción “CFD”.



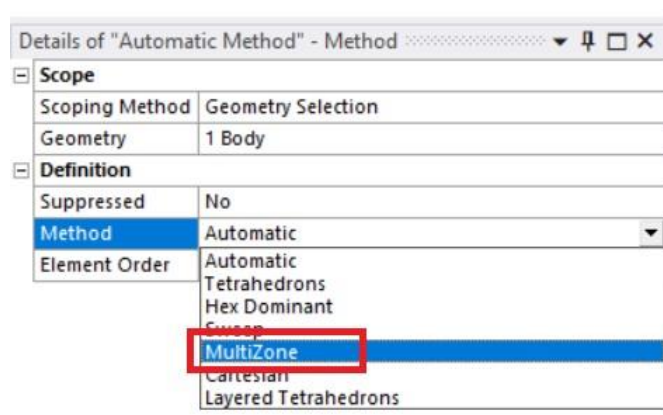
3.2 Habiendo seleccionado la opción CFD se procede a mallar, para ello se debe seleccionar el cuerpo que se quiere mallar. Para obtener una malla homogénea y óptima para simular se debe tener orden en el proceso de mallado, en el caso de la malla de estudio se empieza a mallar la geometría de mayor complejidad que es el semicírculo de la tubería del WEC y a partir de esta se empiezan a mallar los cuerpos adyacentes.

Como ejemplo se realiza el mallado para el cuerpo semicircular de la tubería del WEC. Se debe seleccionar el cuerpo teniendo la opción "Body" activa, a continuación, se pica con el click derecho, deslizamos el cursor en la opción "Insert" y seleccionamos "Method".

Nota: Este es cuerpo es el primero en mallarse porque toda la parte de la tubería es crítica, ya que por ser semicircular es difícil encontrar una distribución y un tamaño de malla que se cumpla con las condiciones de una malla que sea aceptable.

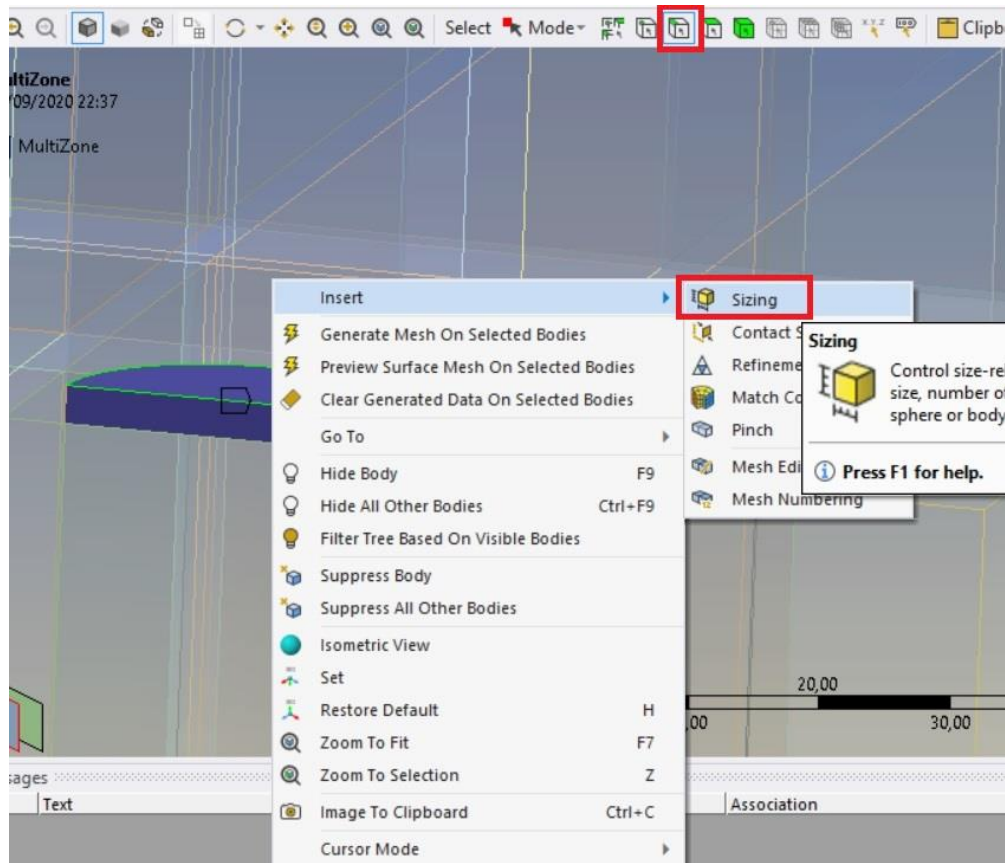


En los detalles del Method se debe elegir “MultiZone” para garantizar que la malla sea Hexaédrica.

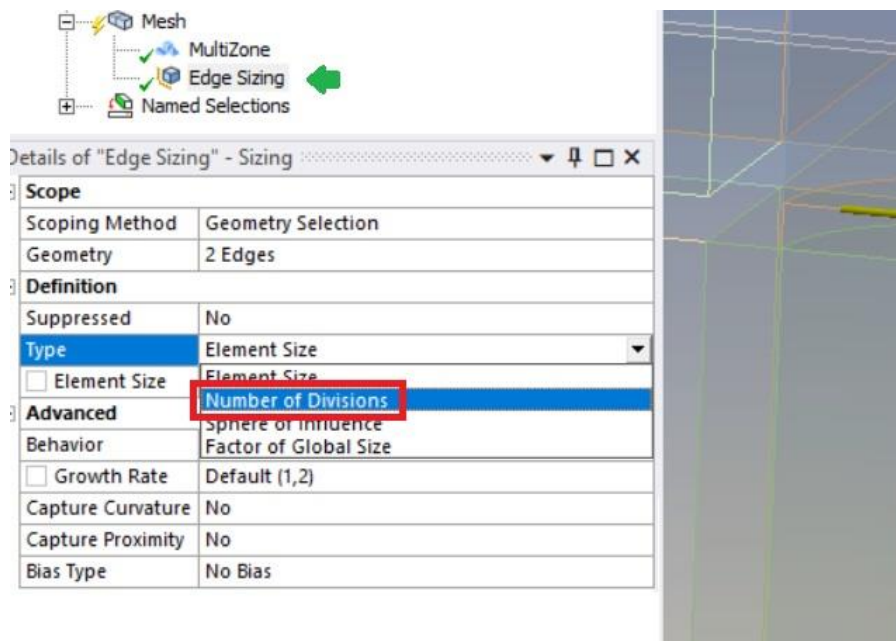


3.3 Después de escoger el método se debe definir el tamaño y la distribución de las celdas de la malla.

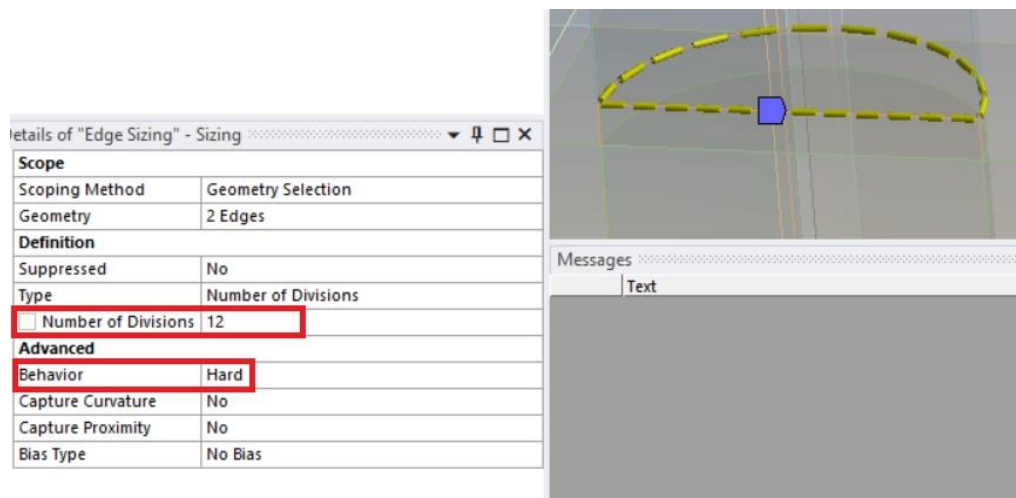
Teniendo activada la herramienta “Edge” se seleccionan los bordes superiores del semicírculo como se aprecia en la imagen. Después se da click derecho y selecciona la opción “Sizing”.



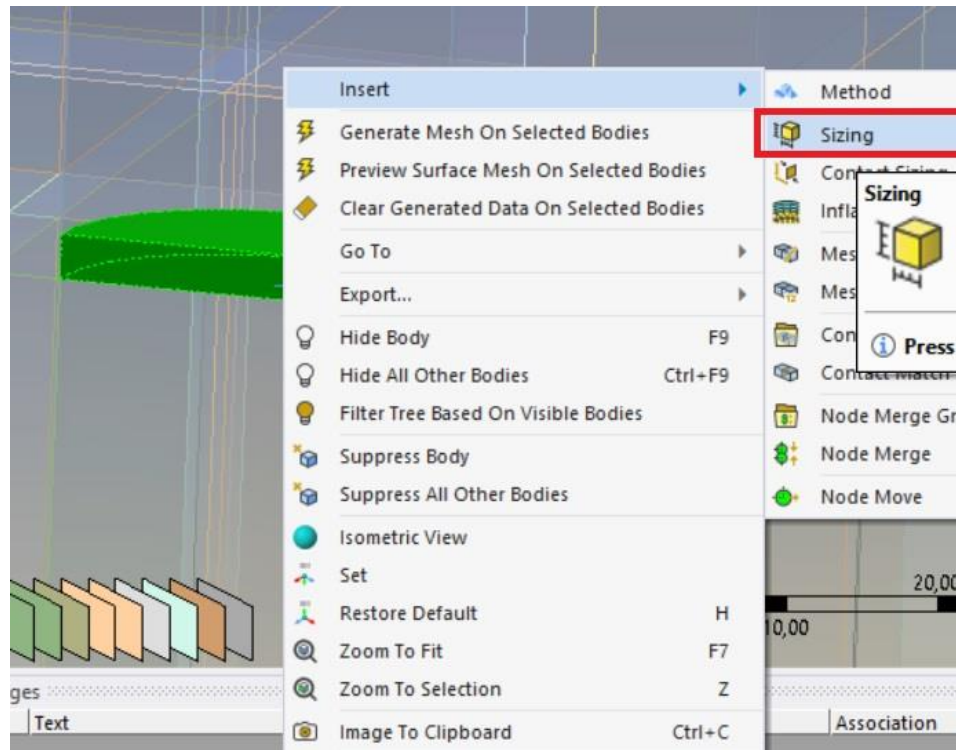
Se crea un “Edge Sizing”, luego se procede a seleccionar el tipo de división, para ello en “Type” que aparece en los detalles del “Edge Sizing” se selecciona la opción “Number of Divisions”.



El número de divisiones que debe tener este cuerpo es de 12.



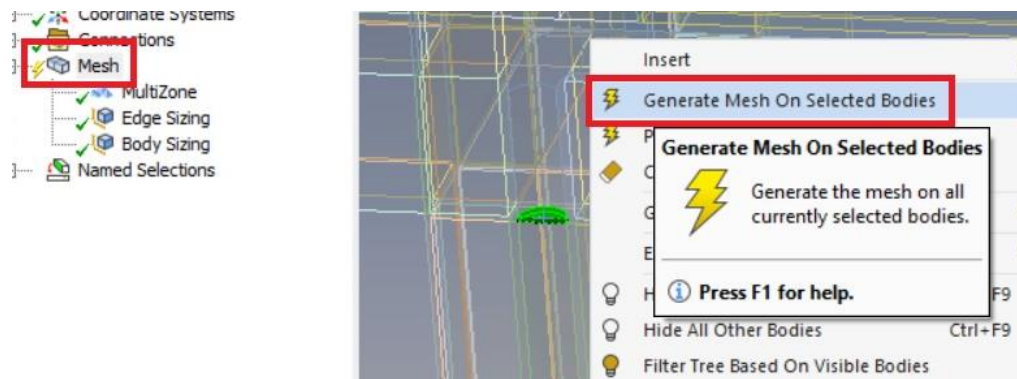
Con esta condición se define el tamaño de las celdas de forma horizontal, pero también se debe definir tamaño de las celdas en forma vertical. Con la opción “Body” activa se selecciona el cuerpo, hacemos click derecho y seleccionamos la opción “Sizing” y se genera un “Body Sizing”.



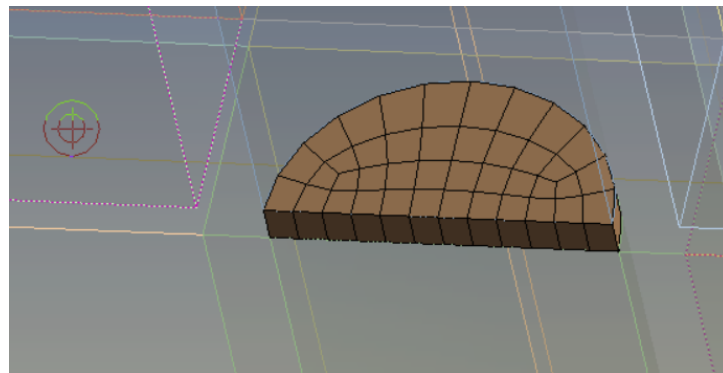
En los detalles del “Body Sizing” se debe seleccionar en “Type” la opción “Element Size” y darle un tamaño de 3 milímetros, luego en “Behavior” se debe seleccionar “Hard”.

<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	3, mm
<b>Advanced</b>	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (1,5 mm)
Behavior	Hard
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

3.4 Una vez se hayan definido las divisiones y el tamaño de la malla se puede proceder a mallar. Para esto se selecciona el cuerpo, se hace se da click en “Mesh”, se da click de derecho y se escoge la opción “Generate Mesh On Selected Bodies”.

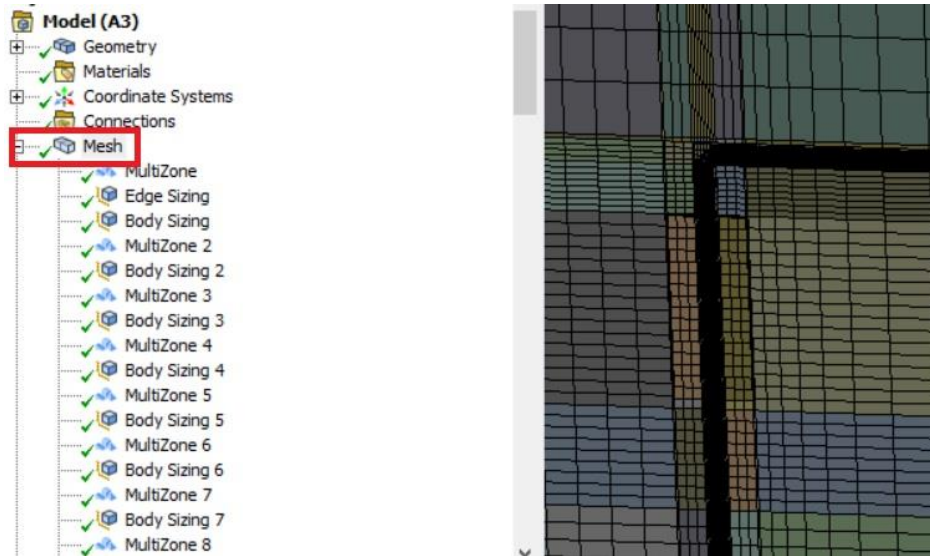


Como resultado se obtiene la siguiente malla, con un parámetro de Skewness de máximo 0.34348, que se encuentra en rango de una malla buena.

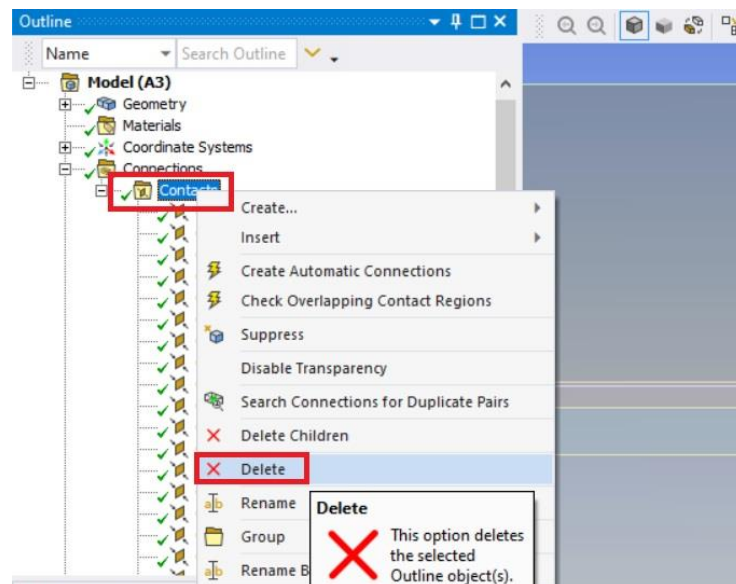


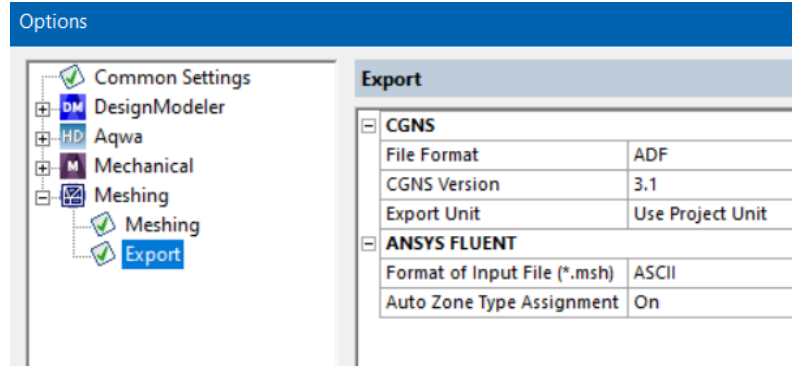
Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2,1257e-002
<input type="checkbox"/> Max	0,34348
<input type="checkbox"/> Average	0,14936
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	9,9104e-002

3.5 Este proceso de debe seguir para todos los cuerpos. Se sabe que la malla esta completa cuando en “Mesh” aparezca un visto de color verde.



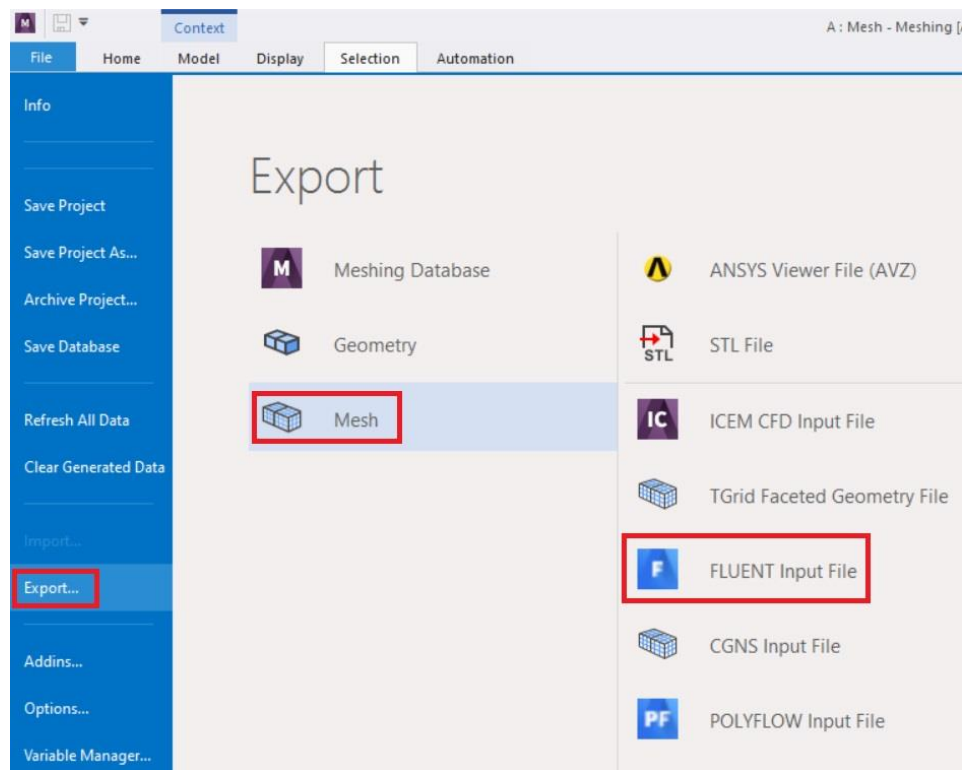
3.6 Después de haber terminado la malla se debe exportar para poder cargarla en Fluent, es importante que antes de exportar la malla se eliminen todas las conexiones que se generen y verificar que el formato de entrada este en ASCII ya que de lo contrario no se podría exportar de forma correcta.





3.7 Para que el FLUENT lea la malla se debe exportar como un archivo. msh.

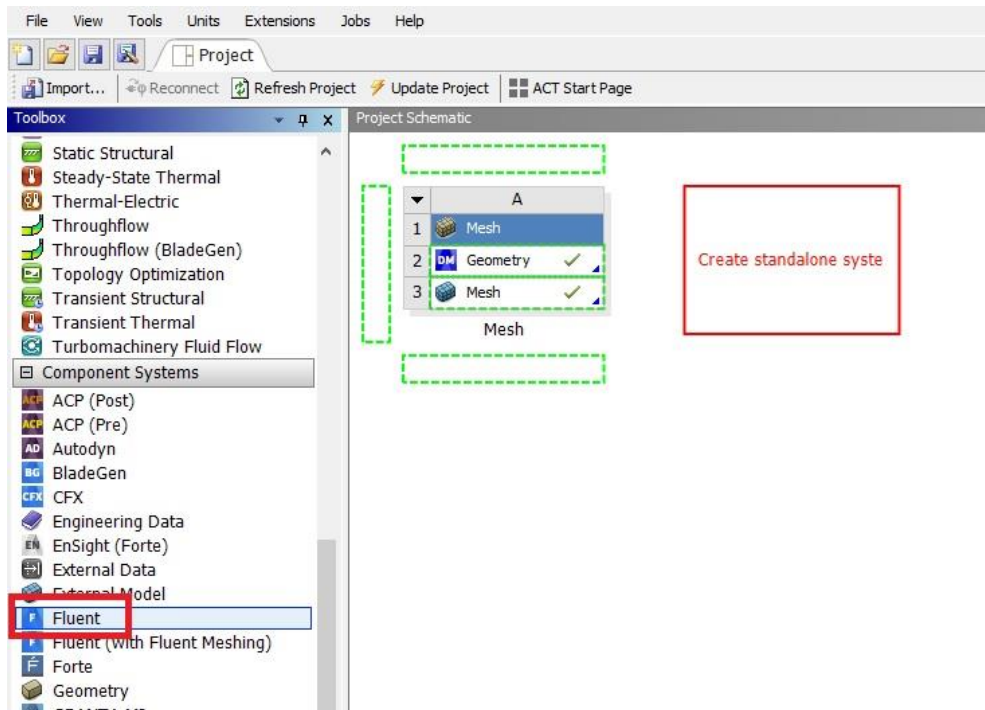
Hacemos click en “File” de despliega la barra y seleccionamos “Export” y posteriormente “Mesh” y en las opciones que se despliegan hacemos click en “FLUENT Input File”, para terminar, nos tiene que salir la opción de “Export” hacemos click y elegimos donde queremos guardar la malla.



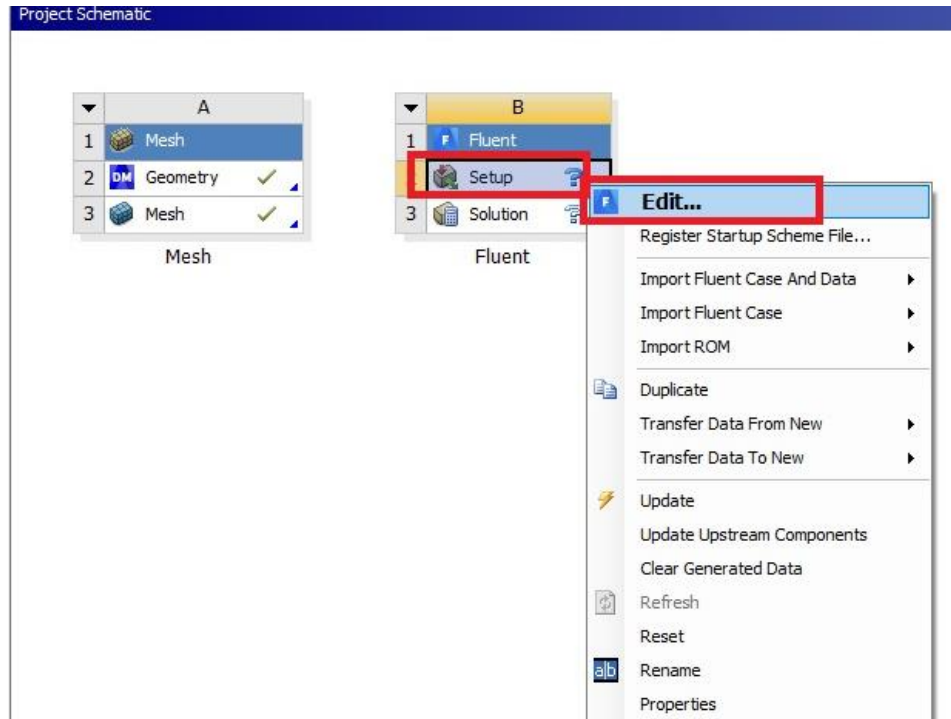


#### 4. Simulación

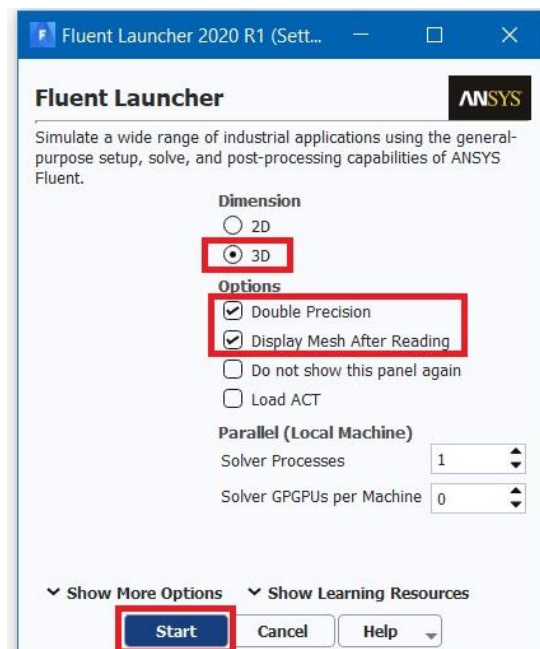
4.1 Del proyecto de Workbench arrastramos la herramienta “Fluent” y la soltamos para que se cree el cuadro y poder ingresar a la herramienta.



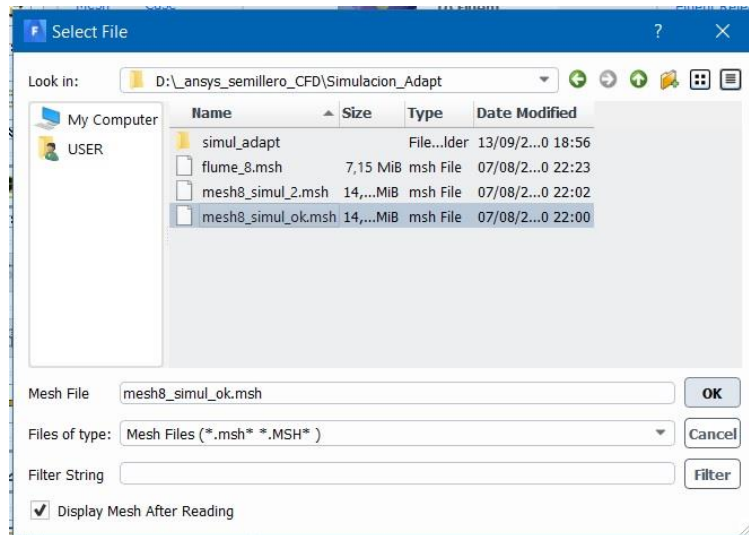
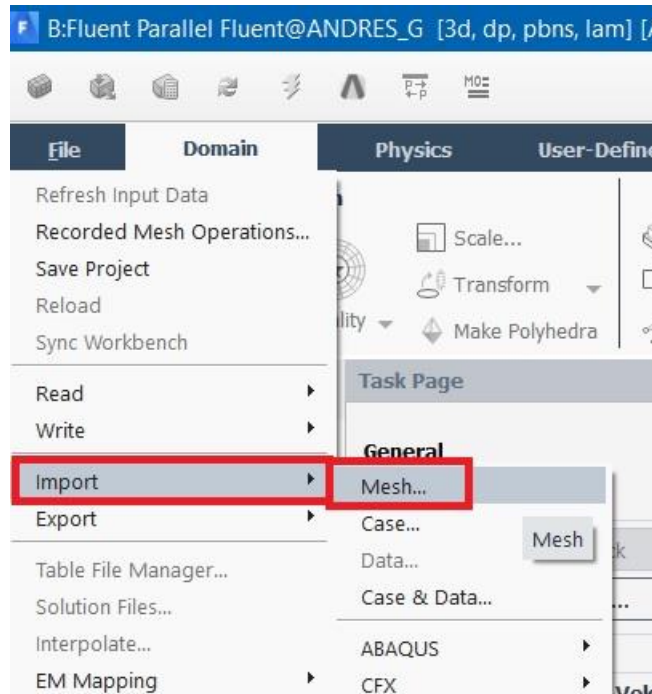
Después de soltar tenemos que pulsar click derecho en “Setup” y seleccionamos “Edit...” para que se abra la herramienta de FLUENT.



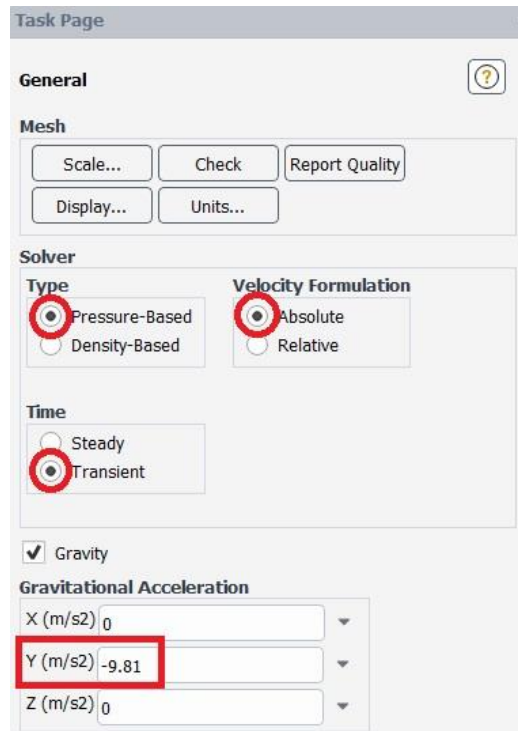
4.2 Antes de que se abra la herramienta FLUENT se abrirá un cuadro donde se especificaran las capacidades de procesamiento.



4.3 Al dar Start se abre la herramienta Fluent. Se importa la malla siguiendo la ruta “File”, “Import” y por último se selecciona “Mesh” y se busca la ubicación donde se encuentra la malla.

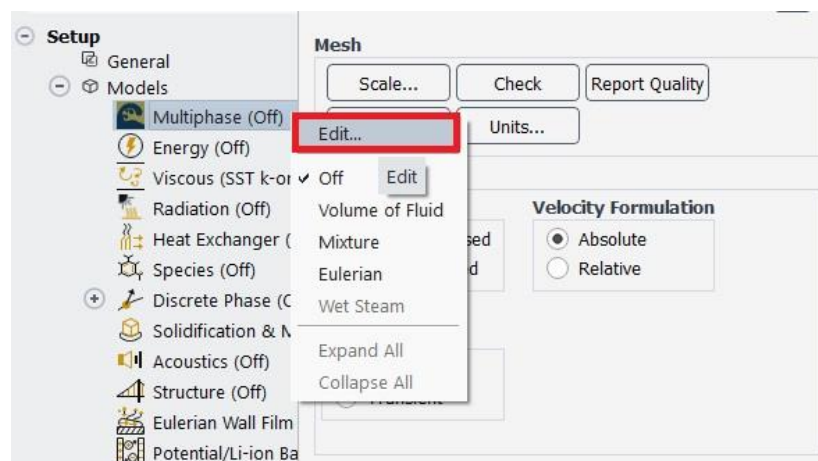


4.4 Después de importar la malla se seleccionan las condiciones de la simulación. En General la configuración que se establece es la que se muestra en la imagen.

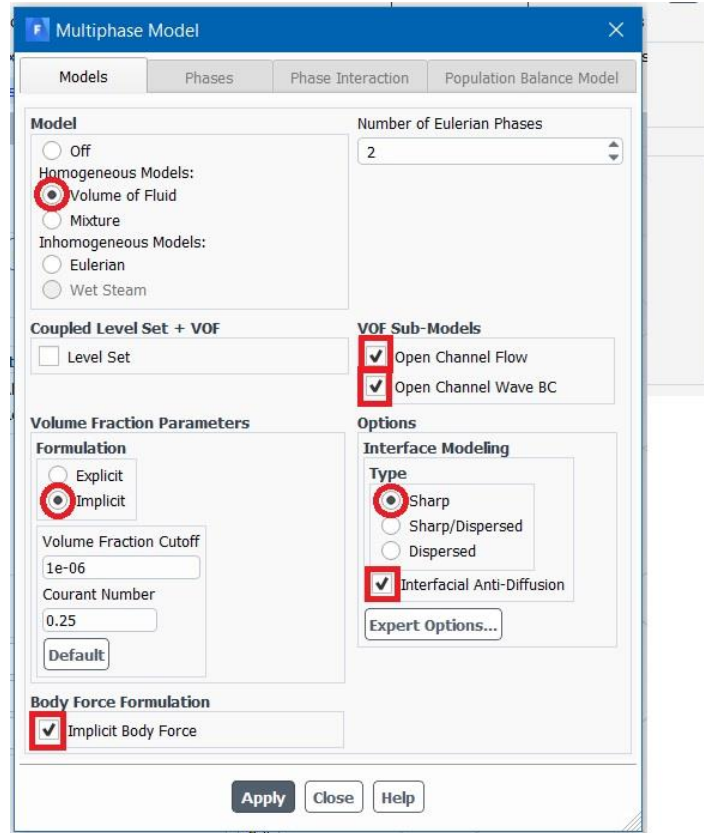


4.5 En “Models” se debe establecer la configuración del modelo que se usará para resolver la simulación.

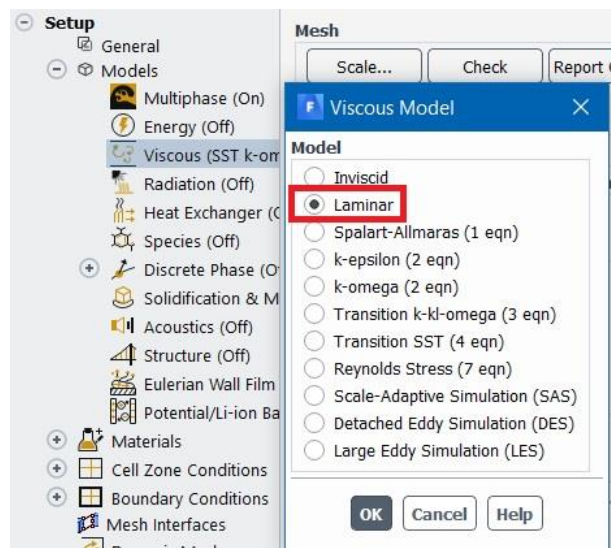
Para editar se hace click derecho en “Multiphase” y luego se selecciona “Edit”.



En el modelo de la Multifase se debe elegir la configuración que se muestra en la siguiente imagen.

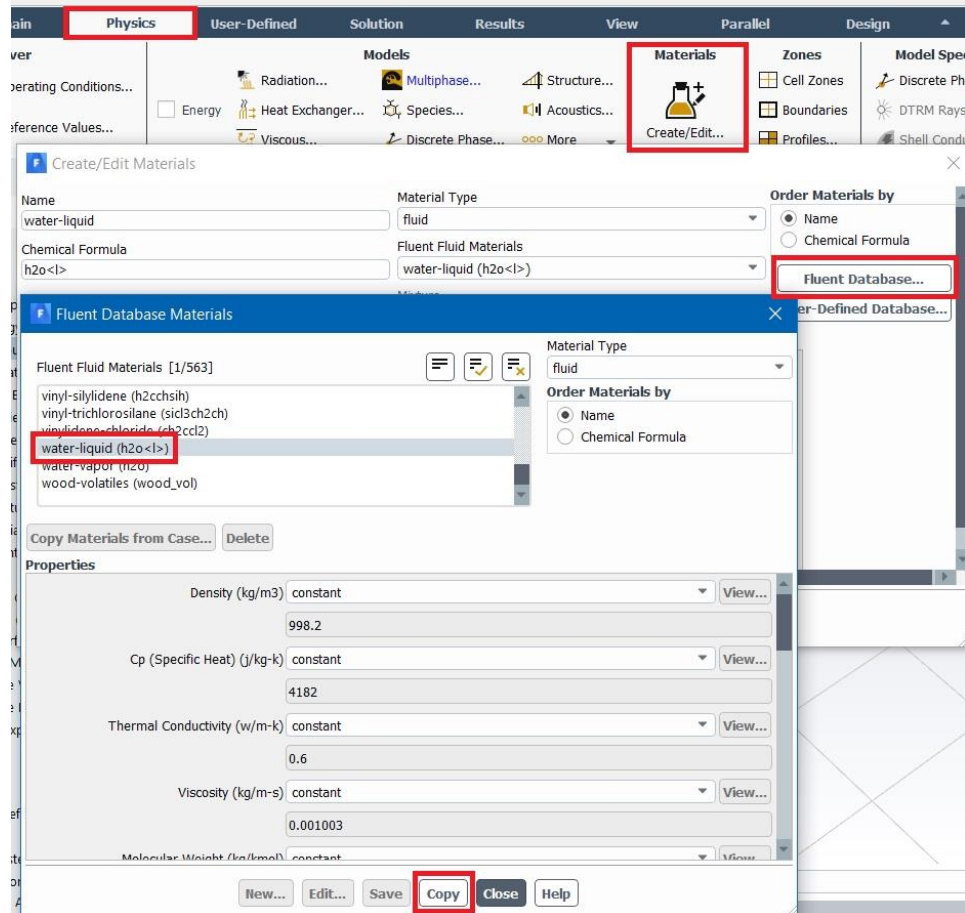


En la configuración del modelo viscoso se debe seleccionar “Laminar”

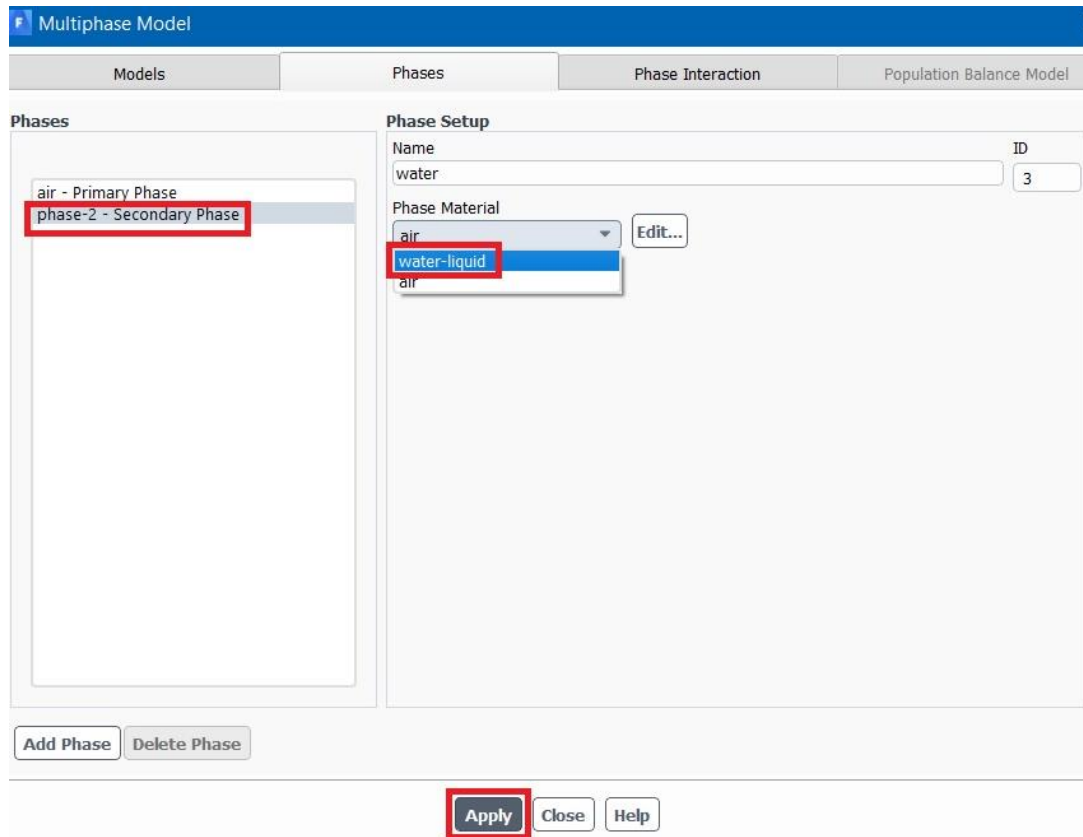


4.6 Antes de seleccionar las fases se debe establecer el agua como un material por lo que antes se debe buscar en “Physics” luego se hace click en “Create/Edit...”. Se abrirá un

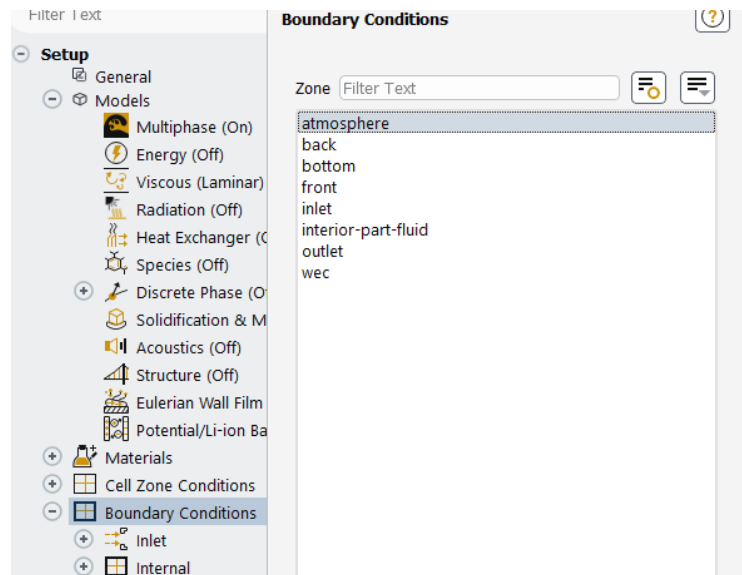
cuadro y se da click en “Fluent Database...” donde se encuentran todos los materiales, para este caso se selecciona “water-liquid (h2o<l>)” y para que aparezca como material se da click en “Copy”.



4.7 Después de haber seleccionado el agua como material, se vuelve a “Multiphase” y en “Phases” se seleccionan los materiales. Como ejemplo se toma la “phase-2 – Secondary Phase”, en “Name” cambia el nombre a wáter y en “Phase Material” se seleccionar “water-liquid”.

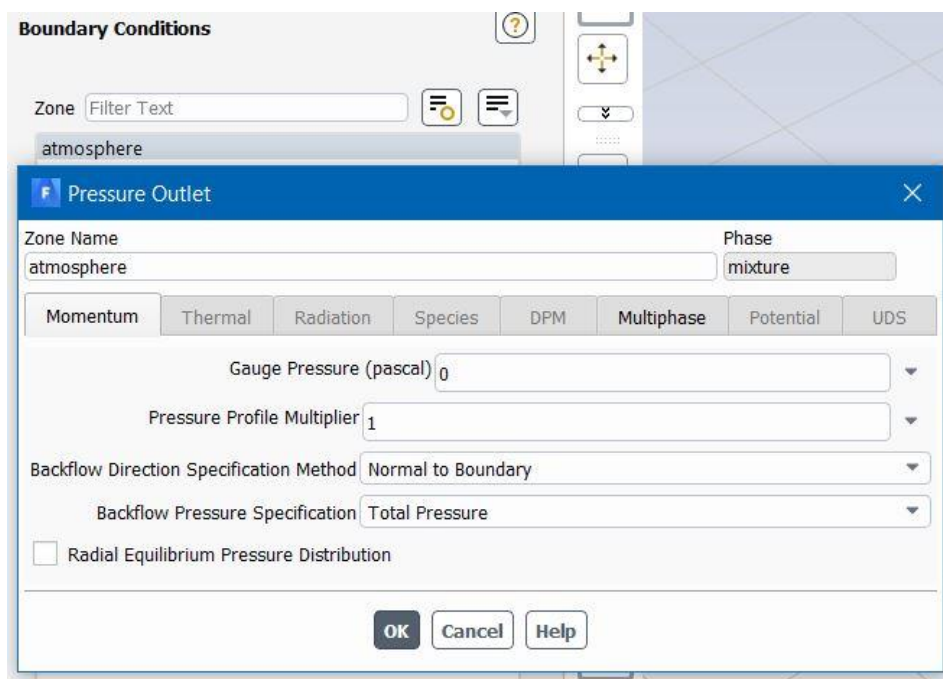


- 4.8 Después de haber seleccionado el modelo y los materiales se deben establecer las condiciones de frontera. Las fronteras aparecen en “Boundary Conditions” y deben aparecer fronteras que se establecieron en la preparación de la geometría como “Named Selection”.

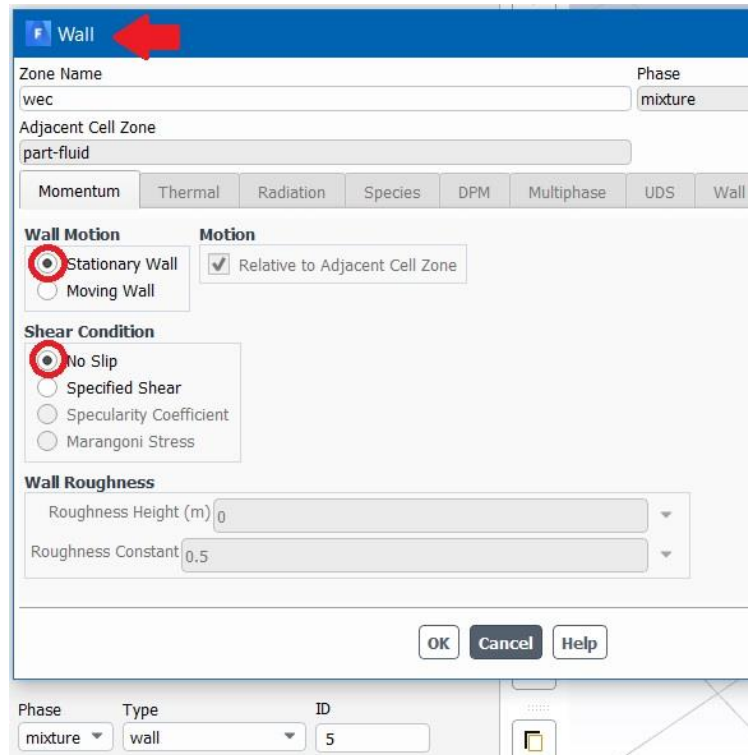


Se adjuntarán las imágenes de la configuración que debe tener cada frontera.

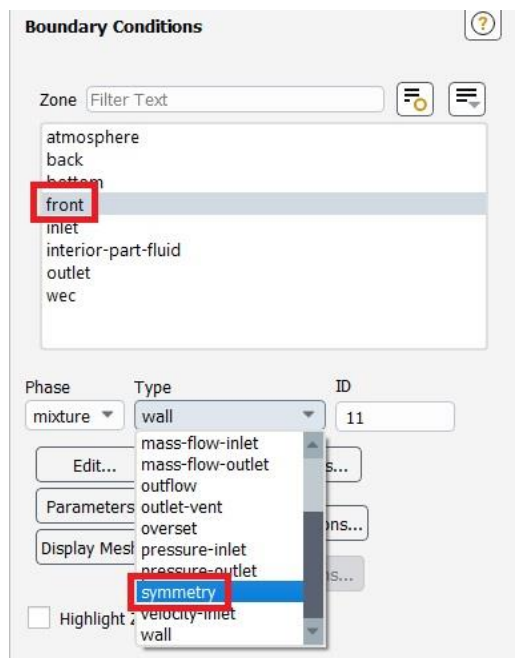
En la frontera “atmosphere” se selecciona “Pressure Outlet”.



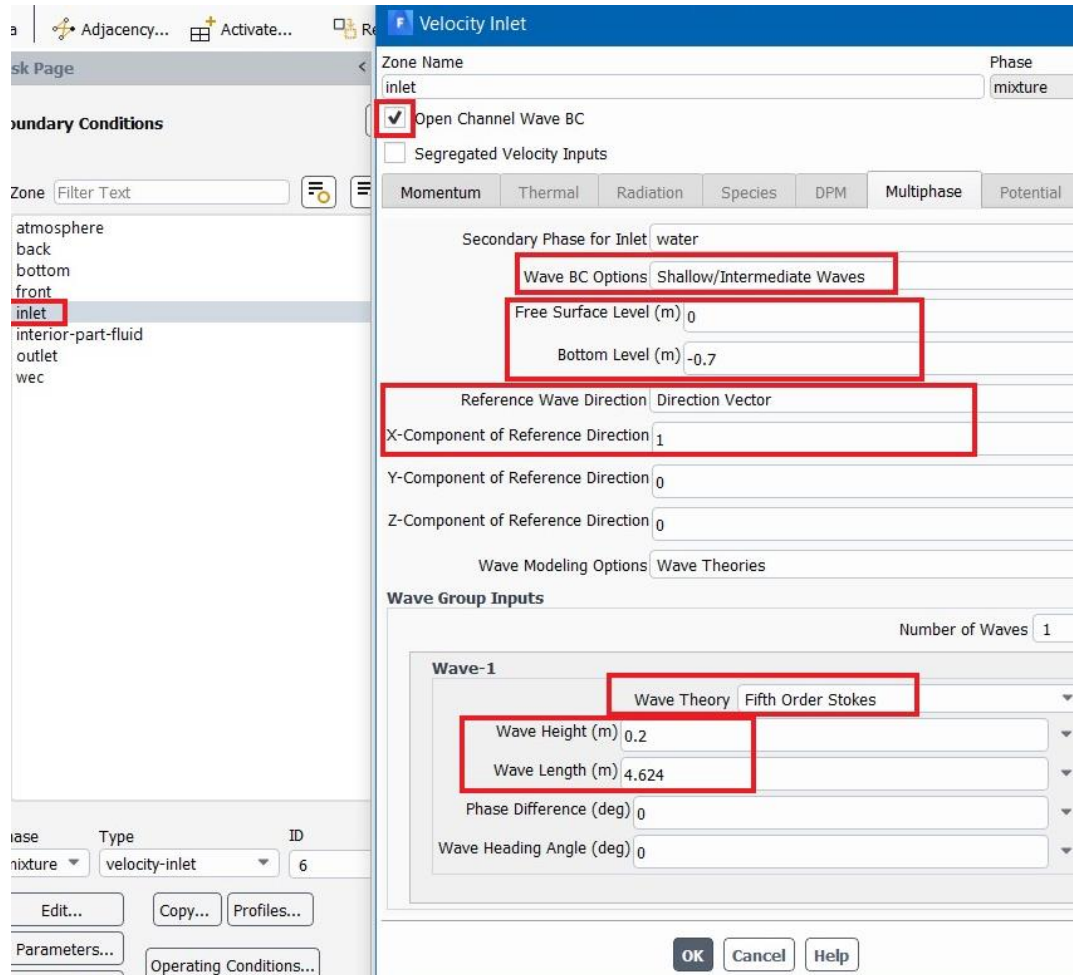
En las fronteras “back”, “bottom” y “wec” se selecciona “Wall”. Es necesario que en la configuración de muro tenga seleccionadas la condición “Stationary Wall” (muro estacionario) y “No Slip” (no deslizamiento).



En la frontera “front” por el canal estar cortado se debe establecer una condición de simetría (“symmetry”)



En la frontera “inlet” se selecciona como “Velocity-Inlet”, y se marca “Open Channel Wave BC”, posteriormente en “Multiphase” se elige la siguiente configuración.



En “Wave Length (m)” se debe poner la longitud de onda siguiendo la siguiente formula que calcula la longitud de onda de acuerdo al periodo y la profundidad del canal.

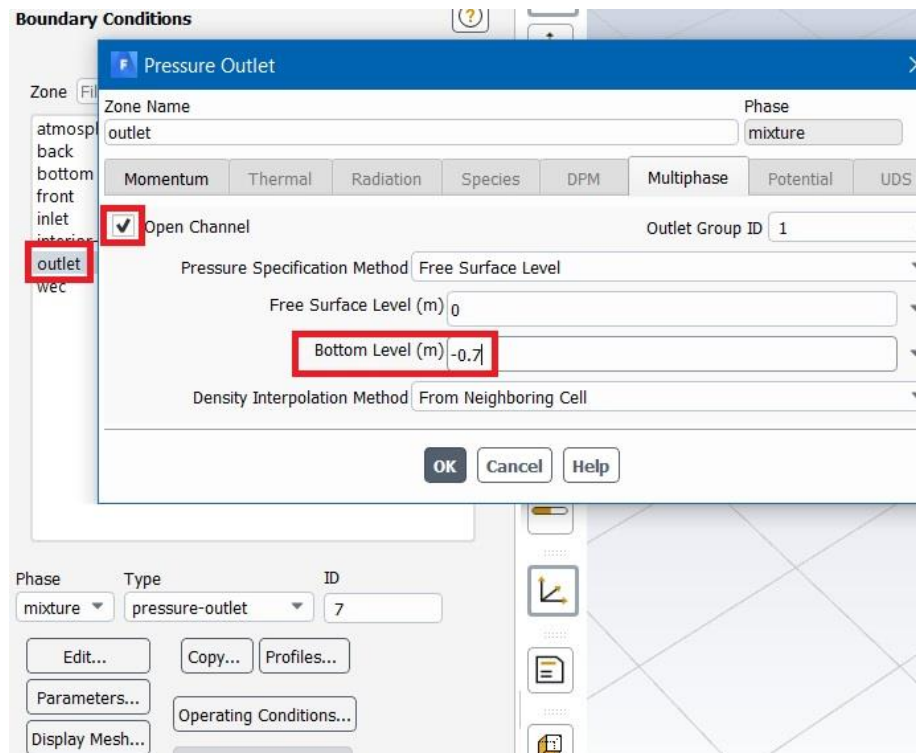
$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda} \right]$$

T = 2 Período en [s]

g = 9,81 Gravedad en [m/s<sup>2</sup>]

d = 0,7 Profundidad en [m]

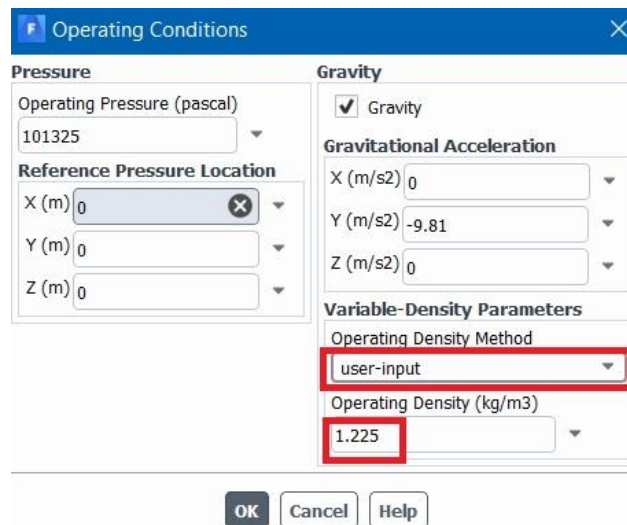
Por último, en la frontera “outlet” se selecciona “Pressure Outlet”, posteriormente se marca “Open Channel” y en “Multiphase” se elige la siguiente configuración.



Por último, se debe hacer click en “Operating Conditions” establecer la densidad de operación.



Se despliega un cuadro y se hace click en la barra desplegable que está debajo de “Operating Density Method” y se selecciona “user-input”. Se deja el valor por defecto que arroja el ANSYS para la densidad de operación que es de 1.225 [kg/m<sup>3</sup>].



Para evitar la refracción de debe incluir una condición playa en el modelo numérico, para esto se “Cell Zone Contiditions” se selecciona la zona “part-fluid” y se clickea “Edit”.

En el cuadro que se despliega nos vamos a “Multiphase” y la casilla “Compute from inlet boundary seleccionamos” “Inlet”.

Zone Name: part-fluid Phase: mixture

Frame Motion  3D Fan Zone  Source Terms  
 Mesh Motion  Fixed Values  
 Porous Zone

Reference Frame Mesh Motion Porous Zone 3D Fan Zone Embedded LES Reaction Source

**Numerical Beach Treatment**

Numerical Beach  
 Multi-Directional Beach

Damping Type: Two Dimensional

Compute From Inlet Boundary: inlet

**Level Inputs**

Free Surface Level (m): 0 Bottom Level (m): -0.7

**Uni-Directional Beach Inputs**

X-Direction: 1 Y-Direction: 0

Damping Length Specification: End Point and Wave Lengths

End Point (m): 10.1460009155 Wave Length (m): 4.624 Number Of Wave Lengths: 2

**Resistance Inputs**

OK Cancel Help

4.9 Después de establecer todas las condiciones de frontera se indica el método de de generación del oleaje, en “Solution Initialization” se selecciona el método “Hybrid Initialization” y que se genere desde la condición de frontera “inlet” por el método de pala “Flat”. Una vez hallamos configurado la generación del oleaje hacemos click en “Initialize”.

**Solution Initialization**

**Initialization Methods**

Hybrid Initialization  
 Standard Initialization

**Open Channel Initialization**

Compute from: inlet

Open channel Initialization Method: Flat

More Settings... Initialize

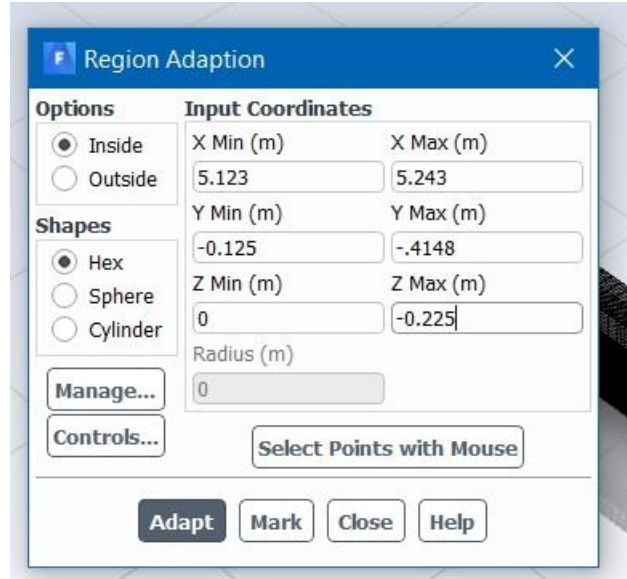
Patch...

Reset DPM Sources Reset LWF Reset Statistics

- 4.10 Posteriormente se procede a seleccionar la región del Wec que estará llena de aire, por lo que se usa la herramienta “Adapt”, en nuestro caso como utilizamos la versión 2020 R1 del software Ansys, tenemos que escribir el siguiente código “” para poder seleccionar la región con la herramienta “Adapt”.  
“mesh/ adapt/ revert-to-R19.2-adaption-user-interface”.



Una vez sea pueda seleccionar la región en “Domain”, en “adapt” se busca la opción “Mark/ Adapt Cells” y se da click para que abra la ventana “Region Adaption” y se escriben las coordenadas de las regiones del wec que estarán llenas de aire.



Una vez escritas hacemos click en Mark para que el software guarde la coordenada.

Las coordenadas de las regiones llenas de aire se pondrán a continuación y servirán siempre y cuando no se cambie la posición del wec.

Para las cámaras debe estar seleccionada la opción “Hex” para los cilindros la opción “Cylinder” y para las esferas la opción “Sphere”. Es importante recalcar que para que la región quede homogénea y no presente errores se debe seguir un orden que recorra la geometría.

cam\_osc

xmin=5.123m xmax=5.243m  
ymin=-0.125m ymax=-0.4148m  
zmin=0m zmax=-0.225m

centro1

x:5.183m y:-0.125m z:0m  
r:0.013

centro2

x:5.183m y:-0.051m z:0m  
r:0.013

centro3

x:5.209m y:-0.025m z:0m

r:0.013

centro4

x:5.937m y:-0.025m z:0m

r:0.013

centro5

x:5.963m y:-0.051m z:0m

r:0.013

centro6

x:5.963m y:-0.125m z:0m

r:0.013

cam\_res

xmin=5.903m xmax=6.023m

ymin=-0.125m ymax=-0.3993m

zmin=0m zmax=-0.06m

Dado que la malla que se uso es refinada quedan algunos espacios sin seleccionar por lo que se usan esferas para completarlos. Se utilizaron 10 esferas con las siguientes coordenadas.

sphere1:

x:5.183m y:-0.051m z:0m

r:0.013

sphere2:

x:5.209m y:-0.025m z:0m

r:0.013

sphere3:

x:5.937m y:-0.025m z:0m

r:0.013

sphere4:

x:5.963m y:-0.051m z:0m

r:0.013

sphere5:

x:5.19062m y:-0.03262m z:0m  
r:0.013

sphere6:  
x:5.95538m y:-0.03262m z:0m  
r:0.013

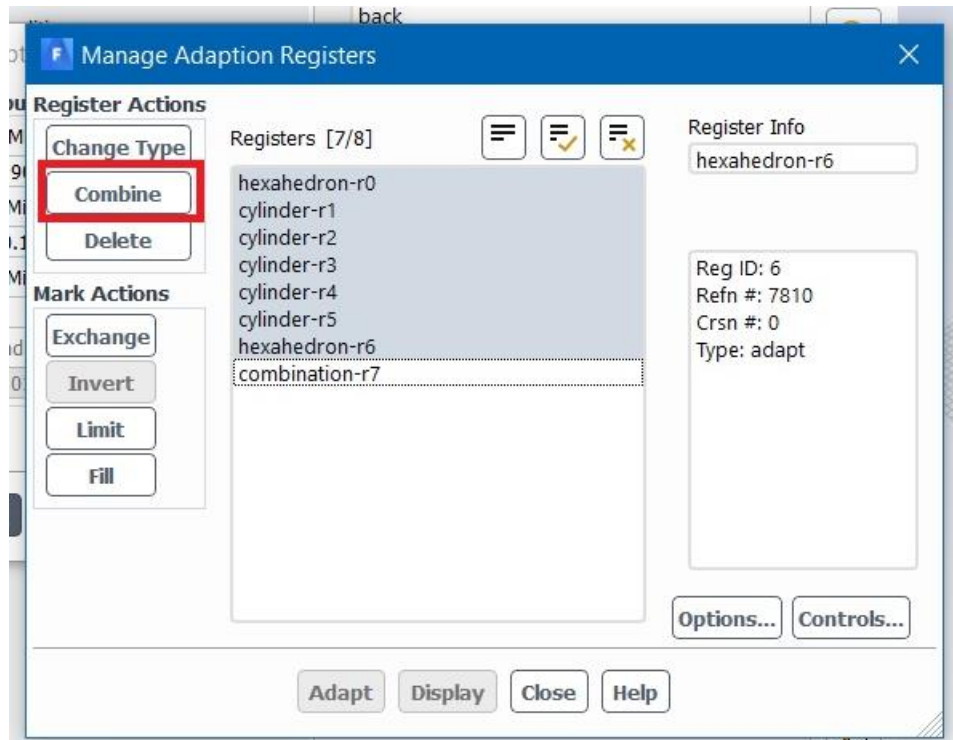
sphere7:  
x:5.18498m y:-0.04105m z:0m  
r:0.013

sphere8:  
x:5.19905m y:-0.02698m z:0m  
r:0.013

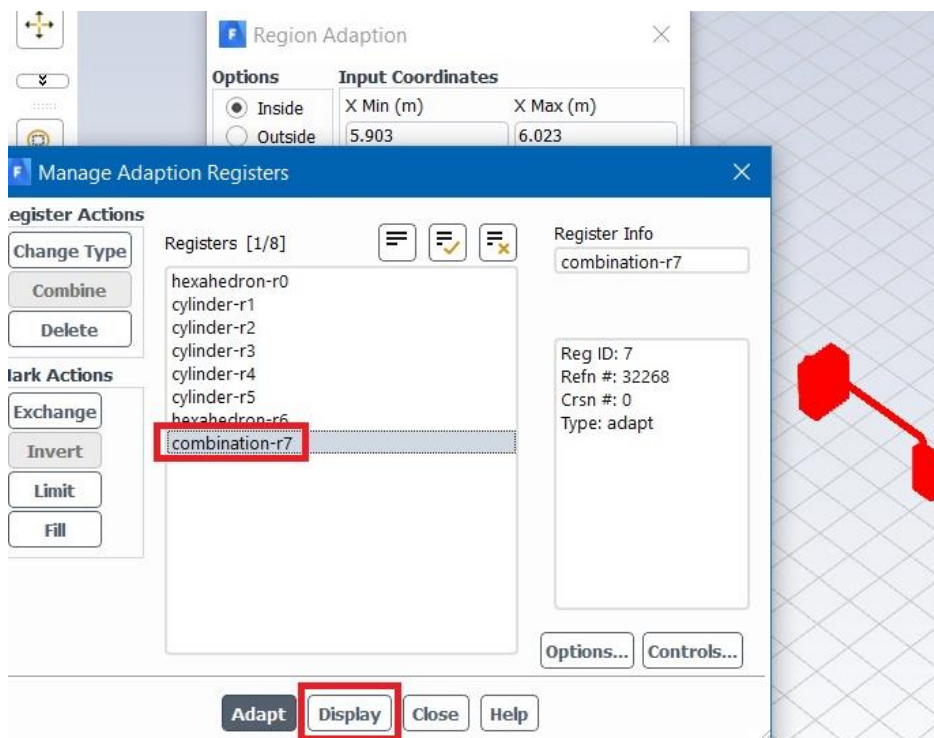
sphere9:  
x:5.94695m y:-0.02698m z:0m  
r:0.013

sphere10:  
x:5.96102m y:-0.04105m z:0m  
r:0.013

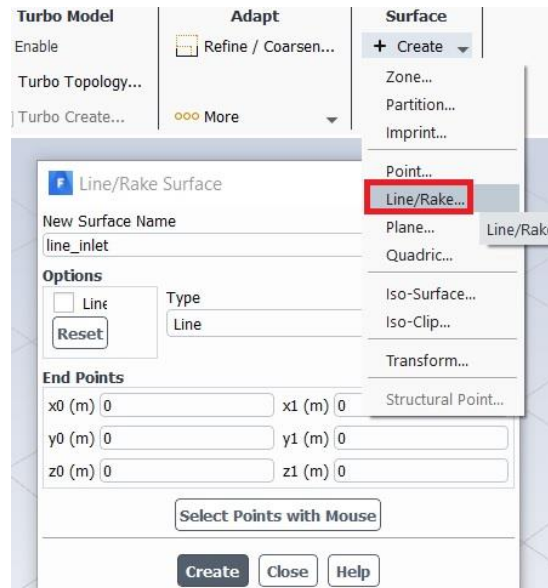
- 4.11 Para hacer que se muestra la región seleccionada se debe dar click “Manage” se seleccionan todas las coordenadas creadas y se hace click en “combine” que se encarga de combinar todas las geometrías.



El siguiente paso es seleccionar la región combinada y hacer click en “display”



4.12 Para obtener un reporte de los resultados de la simulación, se deben crear líneas en los puntos de interés queremos y la variable que vamos a estudiar.



Los nombres y las coordenadas de las líneas se muestran a continuación.

line\_inlet:

xmin=0 xmax=0  
ymin=-0.7 ymax=0.5  
zmin=0m zmax=0

line\_middle:

xmin=2.560 xmax=2.560  
ymin=-0.7 ymax=0.5  
zmin=0m zmax=0

line\_wallCamOsc:

xmin=5.120 xmax=5.120  
ymin=-0.7 ymax=0.5  
zmin=0m zmax=0

line\_freecamOsc:

xmin=5.183 xmax=5.183

```
ymin=-0.7 ymax=-0.125  
zmin=0m zmax=0
```

```
line_freecamRes:  
xmin=5.963 xmax=5.963  
ymin=-0.7 ymax=-0.125  
zmin=0m zmax=0
```

```
lineh_vel_camsosc:  
xmin=5.123m xmax=5.243m  
ymin=-0.175m ymax=-0.175m  
zmin=0m zmax=0
```

```
lineh_sens_keller30mm_camsosc:  
xmin=5.123m xmax=5.243m  
ymin=-0.400m ymax=-0.400m  
zmin=0m zmax=0
```

```
lineh_sens_keller230mm_camsosc:  
xmin=5.123m xmax=5.243m  
ymin=-0.200m ymax=-0.200m  
zmin=0m zmax=0
```

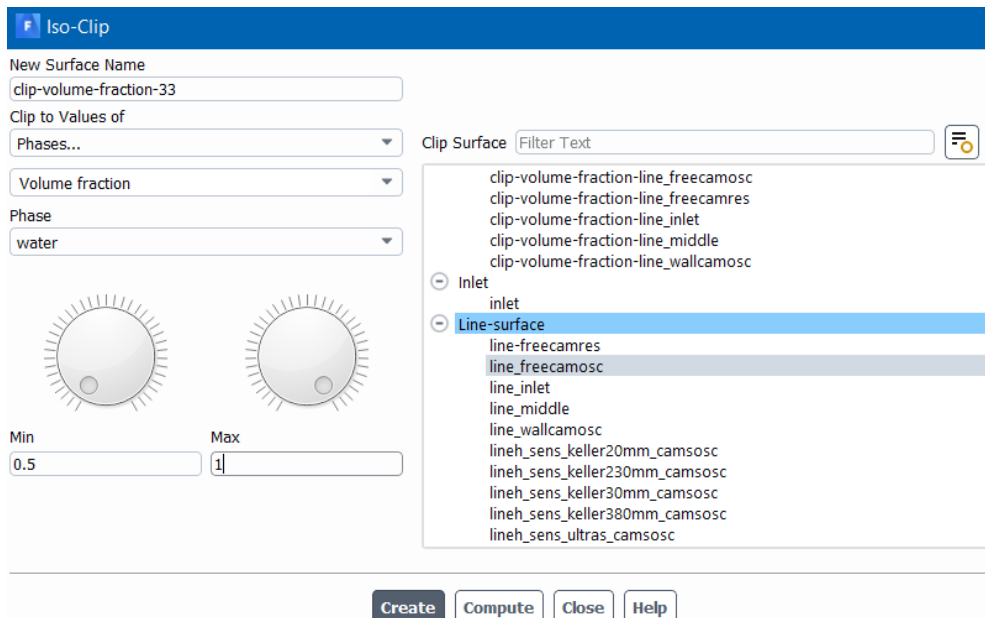
```
lineh_vel_camsres:  
xmin=5.903m xmax=6.023m  
ymin=-0.265m ymax=-0.265m  
zmin=0m zmax=0
```

```
lineh_sens_keller20mm_camsres:  
xmin=5.903m xmax=6.023m  
ymin=-0.570m ymax=-0.570m  
zmin=0m zmax=0
```

```
lineh_sens_keller380mm_camsres:  
xmin=5.903m xmax=6.023mm  
ymin=-0.210m ymax=-0.210m  
zmin=0m zmax=0
```

4.13 Una vez creadas las líneas se debe crear un iso-clip de cada línea

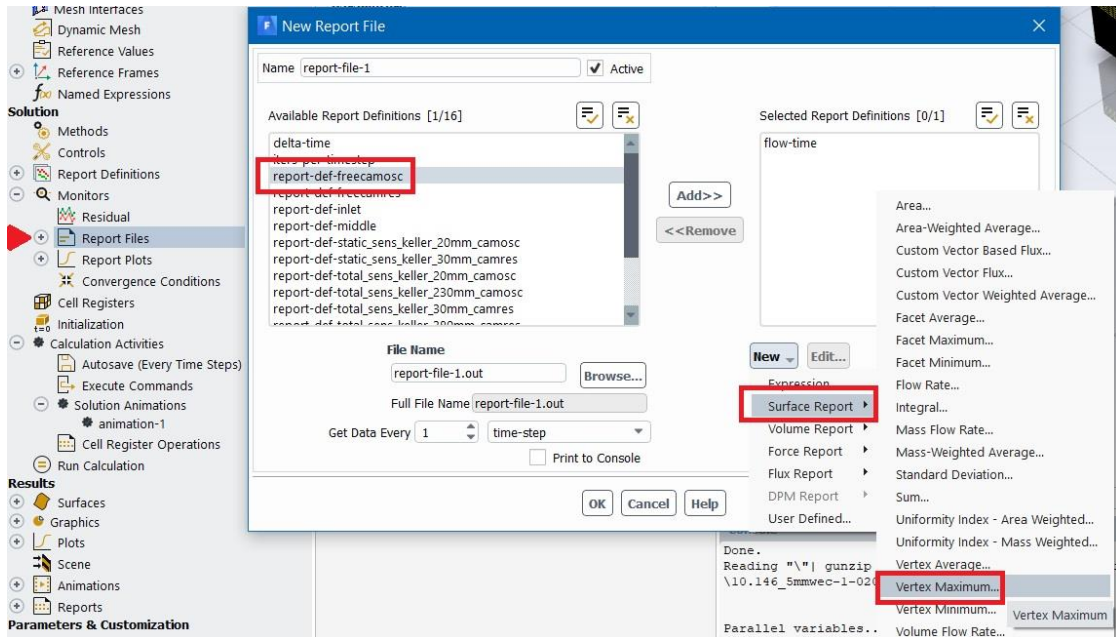
Como ejemplo se muestra el iso-clip para hallar la oscilación dentro de las cámaras. Para esto en el hizo clip se de seleccionar la línea line\_freecamosc, luego elegir en “Clip to values of” la opción “Phases” y “Volume fraction” del agua “water” y establecer como min y max 0.5 y 1 respectivamente.



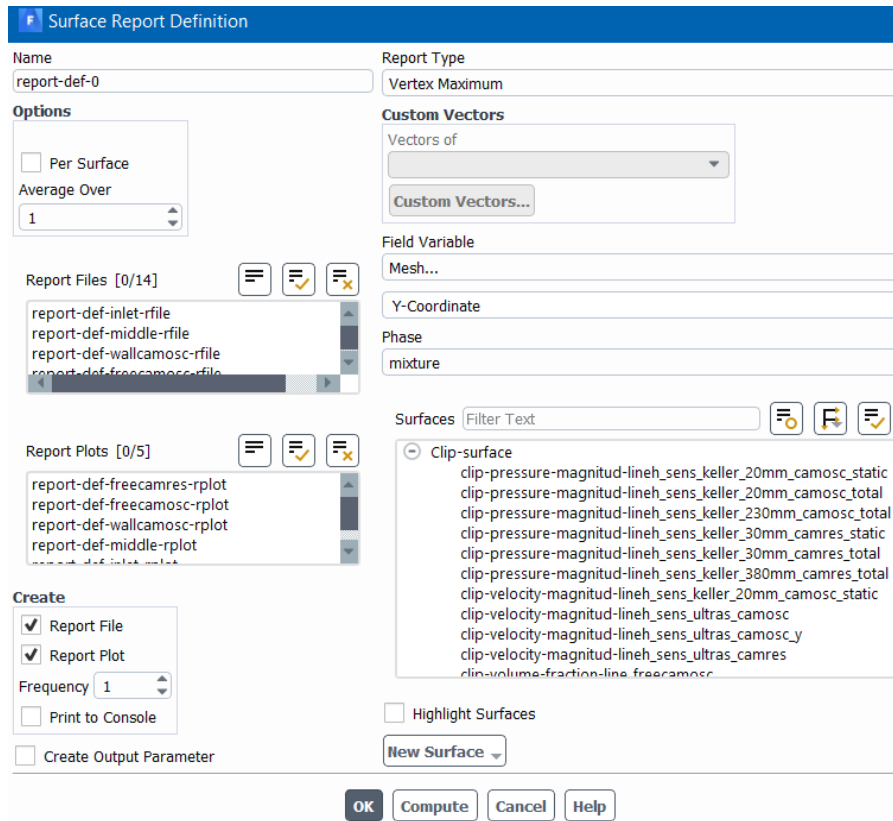
Para crear el iso-clip de la presión se usará la opción “Total pressure” en el intervalo de 0 Pa a 9000 Pa.

- 4.14 Ya creado el iso-clip se debe crear archivo de reporte donde se vayan a guardar los datos, por lo que oprimimos click derecho en “Report Files” y luego “New”, lo cual hará que se despliegue una pestaña.

Continuando con el ejemplo de obtener un reporte de la oscilación dentro de las cámaras seleccionamos el iso-clip del cual queremos obtener el reporte de oscilación, y posteriormente en la opción “Surface Report” seleccionamos “Vertex Maximum” para definir nuestro reporte.

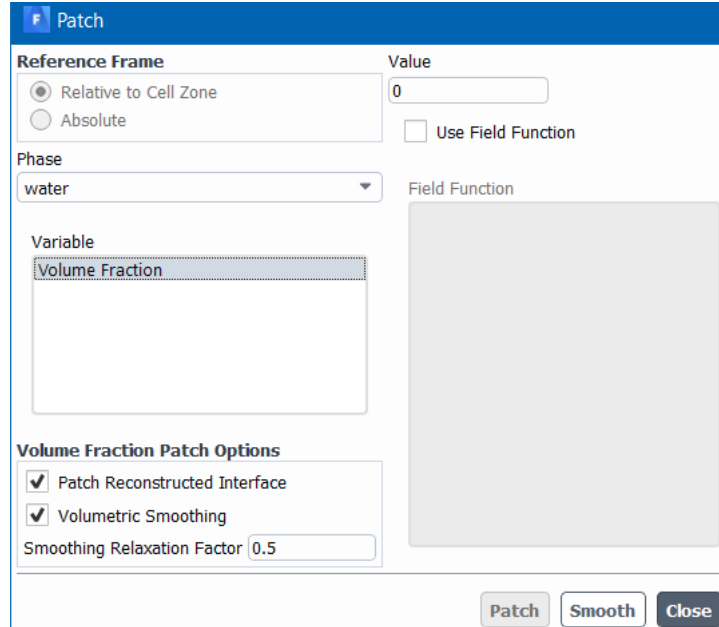


Es importante resaltar que para conocer la oscilación dentro de las cámaras, anteriormente, al crear el iso-clip, trabajamos con la opción “Phases”, pero en este apartado a la hora de crear el reporte, debemos seleccionar la opción “Mesh” con coordenadas en el eje Y. También debemos habilitar la opción de crear el reporte y la gráfica.

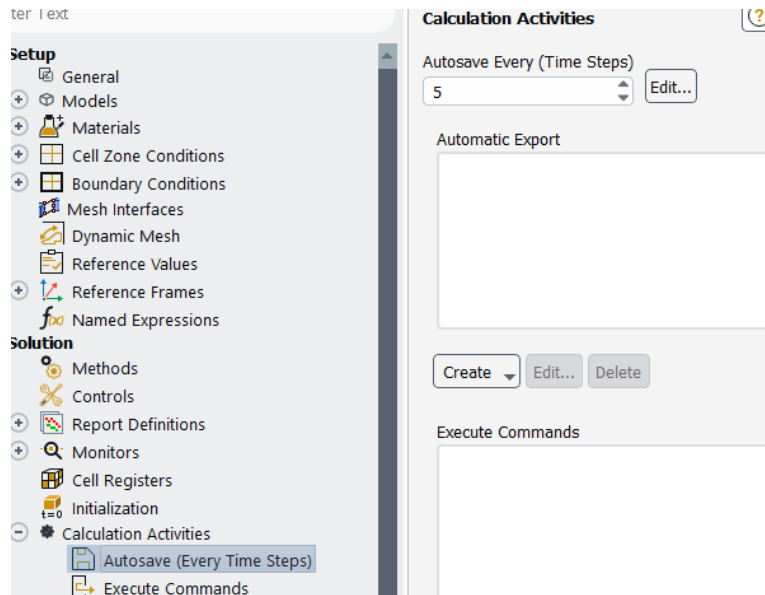


En el caso de las presionar no usamos “Vertex Maximum” sino que trabajamos con “Vertex Average” que es el promedio de las presiones en ese punto. En las variables debemos marcar “Total pressure”.

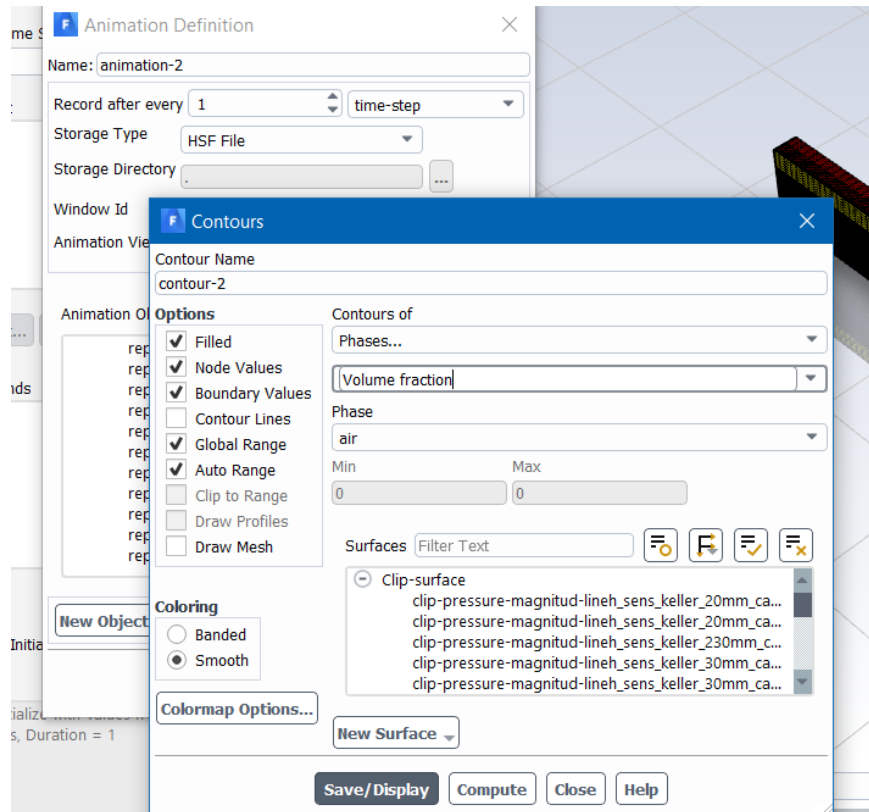
- 4.15 Después de crear los archivos de reporte se prosigue estableciendo el aire como el fluido que estará presente en las cámaras del WEC; anteriormente ya seleccionamos con la herramienta “region adapt” la región que ocupa el aire dentro del WEC, pero antes de correr la simulación se debe establecer una especie de calidad del agua “volumen fraction water” en donde el valor de 0 se usa para una región en la que su fluido es aire . Para ellos se debe seleccionar agua con una calidad de 0, esto garantiza que el fluido presente sea aire.



4.16 Es importante decirle al software que me guarde los datos de la simulación cada x tiempo, para esto establecemos un tiempo de guardado de cada 5s de simulación.



4.17 El siguiente paso es mostrar contorno del wec, en donde se pueda apreciar la bifase aire-agua. Para esto debemos ir a la condición contorno “contour” y clickear en display para mostrar la animación de la simulación.



4.18 Para terminar, en la opción “Run Calculation” se debe configurar el tiempo de simulación y el número de iteraciones, que para el caso de estudio se usó un número de 3000 pasos y un intervalo de 0.01 para un tiempo de 30 segundos con 20 iteraciones.

**Run Calculation** ?

Check Case...    Preview Mesh Motion...

**Time Advancement**

Type: Fixed    Method: User-Specified

**Parameters**

Number of Time Steps: 3000    Time Step Size (s): 0.01

Max Iterations/Time Step: 20    Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

**Options**

Extrapolate Variables

Report Simulation Status

**Solution Processing**

**Statistics**

Data Sampling for Time Statistics

Data File Quantities...

**Solution Advancement**

Calculate