

Diseño y optimización de un atrapa-olas para un dispositivo de bombeo directo de agua con energía undimotriz



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de
Barcelona

Treball de fi de Màster

**Màster Universitari en Enginyeria Industrial
Especialitat Energia**

Autor: Esteve Baraut Marsal

Director: Romain Gers

Co-referente: Udo Rheinschmidt

A la universitat de destí

Universidad Técnica Federico Santa María

Curs acadèmic: 2017-2018



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Resumen

El proyecto *Dragón de Mar* nace de la necesidad de abastecer de agua a aquellas viviendas o lugares cercanos al mar que no disponen de conectividad con una red de agua ya sea porque pertenecen a poblaciones con un muy bajo nivel económico o porqué se encuentran lejos de los núcleos urbanos. El objetivo principal del proyecto es diseñar un dispositivo de bombeo directo a partir de energía undimotriz, es decir, un dispositivo capaz de bombear agua sin tener que pasar por la conversión eléctrica de la energía.

El marco práctico de esta memoria parte del trabajo de título de un integrante del equipo que desarrolla el proyecto “Dragón de Mar”, Eliecer Cabrera Fernández, cuya memoria bajo el título “*Bombeo de agua con energía undimotriz*” supone los primeros pasos para desarrollar el dispositivo de bombeo de agua renovable a partir de la energía de las olas en el marco del proyecto. En su memoria Eliecer Cabrera Fernández realiza una revisión del estado del arte, formula una solución conceptual y confirma el funcionamiento del dispositivo formulado a partir de análisis *CFD* y diseños de prototipos a pequeña escala.

Siguiendo la recomendaciones de Eliecer Cabrera Fernández, este trabajo supone los siguientes pasos en el desarrollo del dispositivo de bombeo, centrándose en la actividad de optimizar la forma del atrapa-olas (parte del dispositivo encargada de convertir la energía cinética y potencial de la ola en energía potencial de bombeo). Para tal fin se emplea la Mecánica de Fluidos Computacional (*CFD*) mediante el aplicativo *Fluent* de *ANSYS*, desarrollándose hasta 8 simulaciones diferentes para sacar diferentes conclusiones: en primer lugar descubrir en que línea deben diseñarse los dispositivos atrapa-olas con el fin de optimizar su funcionamiento, y, en segundo lugar, proponer un nuevo modelo de atrapa-olas que mejore el funcionamiento del modelo propuesto en primera instancia por *Eliecer Cabrera Fernández* en su memoria.

Las simulaciones de *CFD* desarrolladas son multifásicas y con generación de olas y todos los conocimientos y métodos para llevarlas a cabo se detallan en el trabajo con la finalidad de justificar la toma de decisiones relativas a la configuración del análisis y de divulgar el conocimiento necesario para llevarlas a cabo.

Tras las simulaciones que se llevan a cabo en el trabajo se consigue diseñar una geometría de atrapa-olas que mejora el desempeño del atrapa-olas propuesto en primera instancia por *Eliecer Cabrera Fernández*. También se marcan las pautas que se deben seguir para conseguir diseños de atrapa-olas aún más óptimos que los expuestos en este trabajo. Por último se hacen recomendaciones sobre las acciones a llevar a cabo sobre el dispositivo de bombeo undimotriz con la finalidad de llegar a cumplir los objetivos del proyecto global.

Sumario

RESUMEN	2
SUMARIO	3
1. GLOSARIO	7
1.1. Símbolos	7
1.2. Siglas, acrónimos y abreviaturas	10
1.3. Tecnicismos	10
2. INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL TRABAJO	13
2.1. Objetivos del proyecto	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1. Teoría de mecánica de fluidos	16
3.1.1. Principio de conservación de la masa y ecuación de continuidad.....	16
3.1.2. Principio de conservación de la cantidad de movimiento o momentum	18
3.1.3. Principio de conservación de la energía.....	19
3.1.4. Shallow Water Equations	22
3.1.5. Regímenes de flujo	23
3.1.6. Capa límite.....	25
3.1.7. Pérdidas de presión a lo largo de una tubería.....	27
3.2. Teoría del oleaje.....	29
3.2.1. Explicación del fenómeno físico de la ola y del oleaje.....	29
3.2.2. Mecánica del oleaje	31
3.2.2.1. Teoría lineal o Teoría de Airy	34
3.2.2.2. Teoría de Stokes	40
3.2.2.3. Teoría Cnoidal.....	43
3.2.2.4. Estudio del oleaje real	44
3.2.3. Energía del oleaje	48
3.2.3.1. Distribución de la energía del oleaje.....	50
3.2.3.2. Sistemas de Captación de energía undimotriz	50
3.3. Teoría de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	53
3.3.1. Definición de la geometría del problema	54
3.3.2. Mallado o <i>Mesh</i>	55

3.3.2.1. Técnicas de mallado	57
3.3.3. Elección del modelo físico.....	57
3.3.3.1. Modelo Volume of Fluid.....	58
3.3.3.2. Ecuaciones de Reynolds-Averaged Navier-Stokes	60
3.3.3.3. Modelo k-epsilon	62
3.3.3.4. Modelo k-omega	64
3.3.3.5. K-omega SST.....	64
3.3.3.6. Large Eddy Simulation (LES) y Direct Numerical Simulation (DNS).....	65
3.3.4. Definición de las condiciones de contorno	67
3.3.4.1. <i>Velocity inlet</i> para la generación de olas	67
3.3.5. Computación de la solución	69
3.3.6. Post-procesado y visualización de los resultados	71
4. MARCO PRÁCTICO	73
4.1. Descripción del problema y de los objetivos del proyecto	73
4.2. Estudio y análisis del histórico de sistemas undimotrices para la generación de energía.....	75
4.2.1. Dispositivos undimotrices para la generación de electricidad	75
4.2.1.1. Sistemas con columna de agua oscilante	75
4.2.1.2. Pelamis	77
4.2.1.3. PowerBuoy.....	78
4.2.1.4. WaveDragon	79
4.2.1.5. Tapchan	80
4.2.1.6. Coppe Subsea Technology	81
4.2.2. Dispositivos undimotrices para el bombeo directo de agua	82
4.2.2.1. Aquabuoy.....	82
4.2.2.2. Lilypad.....	83
4.2.2.3. Oyster.....	84
4.2.3. Resumen del estado del arte de los dispositivos undimotrices	85
4.3. Revisión y evaluación de la memoria y conclusiones de Eliecer Cabrera Fernández sobre el sistema de bombeo con energía undimotriz escogido para los objetivos del proyecto.	86
4.3.1. Selección del diseño conceptual	87

4.3.1.1.	Dispositivo de bombeo comeolas.....	88
4.3.1.2.	Sistema de bombeo directo comeolas con bomba de ariete.....	88
4.3.2.	Desarrollo del diseño conceptual.....	89
4.3.3.	Construcción y análisis de los prototipos a pequeña escala.....	91
4.3.4.	Propuestas de mejora de Eliecer Cabrera Fernández.....	96
4.4.	Evaluación del la ubicación dónde se instalará el dispositivo undimotriz de bombeo.....	97
4.4.1.	Dominio de simulación.....	100
4.5.	Optimización del atrapa-olas mediante <i>CFD</i>	102
4.5.1.	Configuración de las simulaciones de CFD con ANSYS Fluent.....	103
4.5.1.1.	Geometría.....	103
4.5.1.2.	Mallado o <i>mesh</i>	104
4.5.1.3.	Setup.....	106
4.5.2.	Análisis de sensibilidad.....	111
4.5.3.	Dragón de mar 1.0.....	119
4.5.4.	Dragón de mar 2.0.....	123
4.5.5.	Dragón de Mar 3.0.....	128
4.5.6.	Dragón de Mar 4.0.....	133
4.5.7.	Dragón de Mar 5.0.....	138
4.5.8.	Dragón de Mar 6.0.....	143
4.5.9.	Dragón de Mar 7.0.....	148
4.5.10.	Dragón de Mar 8.0.....	153
4.5.11.	Resumen de los resultados de las simulaciones.....	160
4.5.12.	Conclusiones de las simulaciones.....	164
4.6.	Fabricación y testeo del diseño a escala real.....	165
4.7.	Recomendaciones y proposiciones de nuevos modelos de dispositivos undimotrices.....	166
5.	PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO DEL PROYECTO	169
6.	COSTE DEL PROYECTO	171
7.	IMPACTO MEDIOAMBIENTAL	173
	CONCLUSIONES	175
	AGRADECIMIENTOS	177
	BIBLIOGRAFÍA	178

1. Glosario

1.1. Símbolos

m	Masa [kg]
S	Superficie del volumen de control [m ²]
v	Velocidad del fluido [m/s]
G	Flujo volumétrico o caudal volumétrico [m ³ /s]
M	Flujo másico o caudal másico [kg/s]
F	Fuerza [N]
Fa_i	Campo de aceleraciones [m/s ²]
δ_{ij}	Función de dos variables delta de Kronecker.
e_c	Energía cinética [J]
Ec	Energía cinética por unidad de masa [J/kg]
e_p	Energía potencial [J]
Ep	Energía potencial por unidad de masa [J/kg]
z	Posición vertical de un cuerpo en presencia del campo potencial gravedad [m]
u	Energía interna [J]
U	Energía interna por unidad de masa [J/kg]
q	Calor [J]
Q	Calor por unidad de masa [J/kg]
h	Entalpía [J]
w	Trabajo intercambiado entre fluido y algún mecanismo [J]
W	Trabajo intercambiado entre fluido y algún mecanismo por unidad de masa [J/kg]

w_p	Trabajo asociado a cambios de volumen debido a fuerzas de presión que actúan sobre un fluido [J]
Wp	Trabajo asociado a cambios de volumen debido a fuerzas de presión que actúan sobre un fluido por unidad de masa [J/kg]
E_t	Energía total de un sistema [J]
F_r	Pérdidas por fricción del sistema por unidad de masa [J/kg]
P	presión [Pa]
ξ	Función de disipación viscosa.
V	Volumen [m ³]
L	Escala de longitud del campo del flujo o dimensión característica [m]
ν	Viscosidad cinemática del fluido [m ² /s]
μ	Viscosidad dinámica [Pa·s]
δ	Espesor de la capa límite [m]
h_f	Pérdidas de presión por fricción [m.c.f.]
h_s	Pérdidas de presión por singularidad [m.c.f.]
$L_{laminar}$	Longitud de entrada para un perfil de velocidades desarrollado de flujo laminar en una tubería [m]
$L_{turbulento}$	Longitud de entrada para un perfil de velocidades desarrollado de flujo turbulento en una tubería [m]
f	Factor de fricción adimensional de Darcy
L_t	Longitud de la tubería [m]
D	Diámetro de la tubería [m]
λ	Longitud de onda [m]
H	Altura de la onda [m]
A	Amplitud de onda [m]

h	Profundidad desde la altura media de la ola hasta el fondo marino [m]
C	Celeridad del frente de onda [m/s]
T	Período [s]
ω	Frecuencia angular [rad/s]
k	Numero de onda [m^{-1}]
ρ	Densidad del fluido [kg/m^3]
g	Gravedad [m/s^2]
t	Tiempo [s]
u_f	Velocidad de las partículas del fluido [m/s]
ϕ	Función potencial de velocidad [m^2/s]
ξ	Desplazamiento horizontal de las partículas del fluido en una ola de Airy [m]
ε	Desplazamiento vertical de las partículas del fluido en una ola de Airy [m]
H_s	Altura significativa del oleaje [m]
$H_{1/3}$	Altura significativa del oleaje [m]
H_{RMS}	Altura media cuadrática del oleaje [m]
\bar{H}	Altura media del oleaje [m]
T_z	Periodo medio del oleaje [s]
T_s	Periodo significativo del oleaje [s]
E_d	Densidad de energía media de la ola por unidad de área horizontal [J/m^2]
$E_{d,cin}$	Componente cinética de la densidad de energía media de la ola por unidad de área horizontal [J/m^2]
$E_{d,pot}$	Componente potencial de la densidad de energía media de la ola por unidad de área horizontal [J/m^2]
E	Energía de la ola [J]

b	Ancho del tren de ola [m]
Pot	Potencia del oleaje por metro de ancho de la ola [W/m]
C_v	Calor específico de una sustancia a volumen constante [J/(kmol·K)]
y^+	<i>y-plus value</i> , traducido al castellano como valor de y-plus [adimensional].
y_d	Distancia entre el primer nodo de un mallado y la pared más próxima [m].
v_f	Velocidad característica de un problema de interacción líquido-sólido denominada velocidad de fricción [m/s].
Δt	Intervalo entre pasos de tiempo en un problema <i>CFD</i> [s].
Δx	Longitud de una celda de la malla [m].

1.2. Siglas, acrónimos y abreviaturas

<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i> , traducido al castellano como “mecánica de fluidos computacional”.
<i>OWC</i>	<i>Oscillating Water Column</i> , traducido al castellano como “columna de agua oscilante”.
<i>CAD</i>	<i>Computer Aided Design</i> traducido al castellano como “diseño asistido por ordenador”.
<i>RANS</i>	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
<i>SIMPLE</i>	<i>Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations</i>
<i>SIMPLEC</i>	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent</i>
<i>PISO</i>	<i>Pressure-Implicit with Splitting of Operators</i>
<i>CFL</i>	<i>Courant-Friedrichs-Lewy</i>

1.3. Tecnicismos

Fetch: es un término procedente directamente del inglés usado en geografía física,

meteorología y otras ciencias para designar a la longitud rectilínea máxima de una gran masa de agua superficial de mares u océanos que es uniformemente afectada en dirección y fuerza del viento, generando a su vez un determinado tipo de oleaje.

Mesh: traducido como malla en español, es el nombre que se le da al conjunto de elementos o subdominios en los que se discretiza una geometría en procedimientos de *CFD*.

Solver: es una pieza de software matemático, posiblemente en la forma de un programa de computadora independiente o como una biblioteca de software, que 'resuelve' un problema matemático.

Render: del verbo renderizar, es un término usado en para referirse al proceso de generar una imagen desde un modelo. Este término técnico es utilizado por los animadores o productores audiovisuales y en programas de diseño en 3D.

Setup: Setup es un término inglés que no forma parte del diccionario de la Real Academia Española (RAE). Puede ser traducido como configuración, organización o disposición.

Fluido Newtoniano: Un fluido newtoniano es un fluido cuya viscosidad puede considerarse constante. Los fluidos newtonianos son uno de los fluidos más sencillos de describir. La curva que muestra la relación entre el esfuerzo o cizalla contra su velocidad de deformación es lineal.

Aguas profundas: profundidad a la cual los efectos del fondo marino son despreciables en la propagación del oleaje. Convencionalmente se acepta que esto ocurre cuando la profundidad es mayor a la mitad de la longitud de la ola. En la práctica, el límite de aguas profundas se encuentra entre los 150 m y 650 m de profundidad dependiendo del período del oleaje [33].

Aguas intermedias: profundidad intermedia entre aguas profundas y aguas someras. A esta profundidad la forma del fondo marino influye en la propagación del oleaje [33].

Aguas someras: profundidad a la cual la longitud de la ola la supera 20 veces. A esta profundidad la forma del fondo marino es determinante en la propagación del oleaje. En aguas someras, las velocidades orbitales de las olas son prácticamente horizontales y la velocidad de propagación de la ola se independiza de la frecuencia y solo varía con la profundidad, alcanzando menores valores que en aguas profundas [33].

Golpe de Ariete: el golpe de ariete se origina debido a que el fluido es ligeramente elástico (aunque en diversas situaciones se puede considerar como un fluido no compresible). En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula o un grifo

instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de fluido que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobrepresión, conocida como golpe de ariete, que se desplaza por la tubería a una velocidad que puede superar la velocidad del sonido en el fluido.

Flujo irrotacional: flujo que no presenta torbellinos, es decir, no hay momento angular del fluido respecto de cualquier punto [50].

2. Introducción y Alcance del trabajo

El proyecto *Dragón de Mar* nace de la necesidad de abastecer de agua a aquellas viviendas o lugares cercanos al mar que no disponen de conectividad con una red de agua ya sea porque pertenecen a poblaciones con un muy bajo nivel económico o porque se encuentran lejos de los núcleos urbanos. Esta necesidad a cubrir se ataca con el diseño y construcción de un dispositivo de bombeo undimotriz que aproveche la energía de la ola para el bombeo directo de agua de mar sin la conversión a energía eléctrica.

El marco práctico de esta memoria parte del trabajo de título de un integrante del equipo que desarrolla el proyecto “Dragón de Mar”, Eliecer Cabrera Fernández, cuya memoria bajo el título “*Bombeo de agua con energía undimotriz*” supone los primeros pasos para desarrollar el dispositivo de bombeo de agua renovable a partir de la energía de las olas en el marco del proyecto.

En su memoria Eliecer Cabrera Fernández realiza una revisión del estado del arte, formula una solución conceptual y confirma el funcionamiento del dispositivo formulado a partir de análisis *CFD* y diseños de prototipos a pequeña escala. Partiendo de este escenario, tanto Philipp Englisch, como yo mismo, Esteve Baraut Marsal, pasamos a formar parte del equipo bajo la supervisión del director de proyecto Udo Rheinschmidt. Los próximos pasos del proyecto consisten en la elaboración de un modelo a escala real de la formulación de dispositivo planteada por Eliecer Cabrera Fernández y de la optimización o reformulación de dicho dispositivo a través de *CFD* para mejorar su rendimiento y ratificar su viabilidad en el lugar de instalación. Para desarrollar ambas actividades Philipp Englisch se encarga del desarrollo del modelo a escala real mientras que yo, Esteve Baraut Marsal, tengo la tarea de optimizar el modelo vía *CFD*. Aún así, y en pos de formar un equipo más sólido y multidisciplinado, todos los integrantes del equipo, incluyendo al director Udo Rheinschmidt, participan en la medida de lo posible en las actividades de los demás, realimentándose mutuamente para una mayor comprensión del fenómeno y mejora en la capacidad de actuación y decisión.

El marco práctico de este trabajo está enfocado a la optimización y reformulación del modelo propuesto por Eliecer Cabrera Fernández para mejorar el rendimiento del dispositivo y verificar su funcionamiento en el lugar de instalación. Para tal fin se emplea la mecánica de fluidos computacional (*CFD*) a través del aplicativo *Fluent* ejecutable a partir del software *ANSYS 18.1*.

2.1. Objetivos del proyecto

Los objetivos específicos del trabajo son los siguientes:

- Estudiar y analizar los sistemas existentes de bombeo de agua de mar funcionando con energía undimotriz.
- Seleccionar del sistema más adecuado para la costa de la punta Curaumilla con vista a la instalación de un prototipo.
- Optimizar la geometría del sistema elegido vía modelación numérica con el software *Ansys-Fluent*.
- Proponer un nuevo modelo de bomba de agua de mar funcionando con la energía de las olas.

3. Marco Teórico

El siguiente apartado pretende dar a conocer todos los aspectos teóricos necesarios para poder entender los fenómenos que se tratan y que se estudian en el marco experimental del proyecto. Dicho marco experimental consta principalmente de dos tareas; por una parte, el análisis computacional de los fenómenos de la mecánica de fluidos involucrados en el dispositivo de bombeo con el fin de optimizar su diseño; y por otra parte, la implementación y instalación de dicho dispositivo en un lugar de conveniencia para contrastar su funcionamiento con los resultados analíticos.

Teniendo en cuenta la naturaleza del dispositivo que se pretende diseñar así como las herramientas que se pretenden usar para su diseño e implementación, se considera oportuno dividir el marco teórico en tres grandes bloques de la forma que sigue:

- Teoría de mecánica de fluidos de especial interés para los objetivos del trabajo: más allá de querer resumir la teoría troncal de la mecánica de fluidos, se pretende profundizar y/o recordar aspectos de la mecánica de fluidos que tienen una especial relevancia para la comprensión del fenómeno del oleaje, para entender los conceptos relativos al *CFD*, y para justificar la toma de decisiones relativas al objetivo del trabajo.
- Teoría del oleaje: por ser el fenómeno en el que se fundamenta el trabajo y por pertenecer a un ámbito específico de la mecánica de fluidos que recibe un tratamiento singular.
- Teoría de *CFD*: por ser los análisis de la mecánica de fluidos computacional una parte troncal de este trabajo y por considerarse la teoría y procedimientos de *CFD* como no triviales. Se pretende dar suficiente información como para que se entienda el análisis desarrollado en su totalidad así como para justificar toda decisión que se tome al respecto.

3.1. Teoría de mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos no es una ciencia trivial y existen muchos conceptos relativos a ella. Atendiendo a la singularidad del problema objetivo de este trabajo, no se considera oportuno el explicar todos y cada uno de dichos conceptos. De esta forma, en este apartado del trabajo se dan a conocer ciertos aspectos teóricos relativos a la mecánica de fluidos que más allá de su complejidad y/o generalidad sirvan para entender y justificar la toma de decisiones relativa al objetivo del proyecto.

3.1.1. Principio de conservación de la masa y ecuación de continuidad

Tres principios básicos de la mecánica de fluidos para entender el comportamiento de estos con el entorno son el principio de conservación de masa, el principio de la conservación de la cantidad de movimiento y el principio de conservación de energía.

En mecánica de fluidos, en un determinado volumen de control se cumple el principio de conservación de la masa si la masa que entra en un volumen de control menos la masa que sale del mismo es igual al incremento de masa en el interior del volumen de control en un intervalo de tiempo determinado. La proposición anterior puede expresarse de la forma más generalizada a través de la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Donde:

- t es el tiempo [s].
- ρ es la densidad [kg/m^3].
- \vec{v} es la velocidad del fluido [m/s].
- ∇ es el operador matemático para divergencias.

La divergencia de un campo vectorial mide la diferencia entre el flujo saliente y el flujo entrante de un campo vectorial sobre la superficie que rodea a un volumen de control, por tanto, si el campo tiene "fuentes" la divergencia será positiva, y si tiene "sumideros", la divergencia será negativa [53]. Para el campo vectorial F expresado en coordenadas cartesianas la divergencia resulta:

$$\nabla \cdot \vec{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (A)$$

En mecánica de fluidos, caudal es la cantidad de fluido que circula a través de una sección de una conducción por unidad de tiempo. Normalmente se identifica con

el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

$$G = S \cdot v \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (B)$$

Donde G es el flujo volumétrico, S la superficie del volumen de control y v la velocidad del fluido. A veces también se identifica con el flujo másico o masa que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

$$M = S \cdot v \cdot \rho \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (C)$$

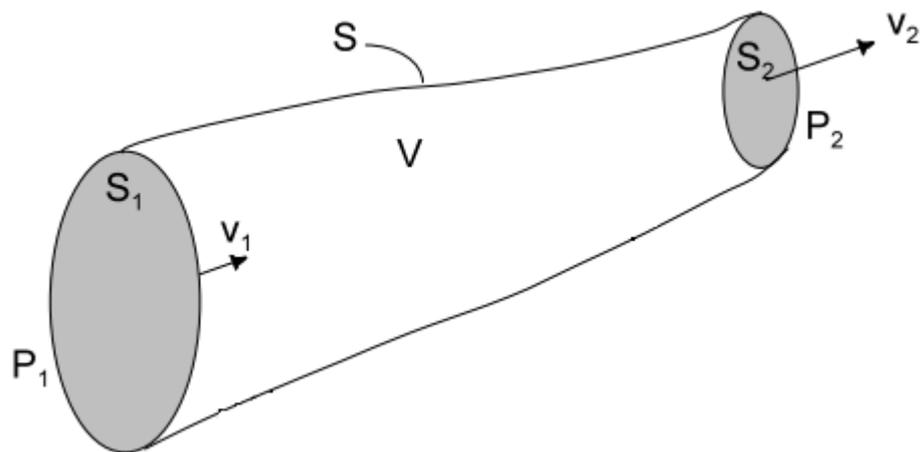


Figura 1 Representación de un volumen de control cualquiera [12].

Si forzamos el cumplimiento del principio de conservación de la masa integrando en un recinto fijo e indeformable y que opere con un fluido incompresible y estacionario resulta:

$$M_1 = M_2 \quad \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (2)$$

$$G_1 = G_2 \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3)$$

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (4)$$

La última expresión (7) se conoce como ecuación de continuidad.

3.1.2. Principio de conservación de la cantidad de movimiento o momentum

Supongamos un volumen de control en forma de tubo en el cual entra, por una de sus secciones limitantes, un caudal determinado de fluido. Si la sección de salida de dicho recinto tiene una superficie menor a la de entrada es de esperar que el fluido se acelere puesto que así lo sugiere la ecuación de continuidad (6), ya que la misma cantidad de masa tiene que pasar en un tiempo determinado por una sección que es menor. Esquematicemos el problema:

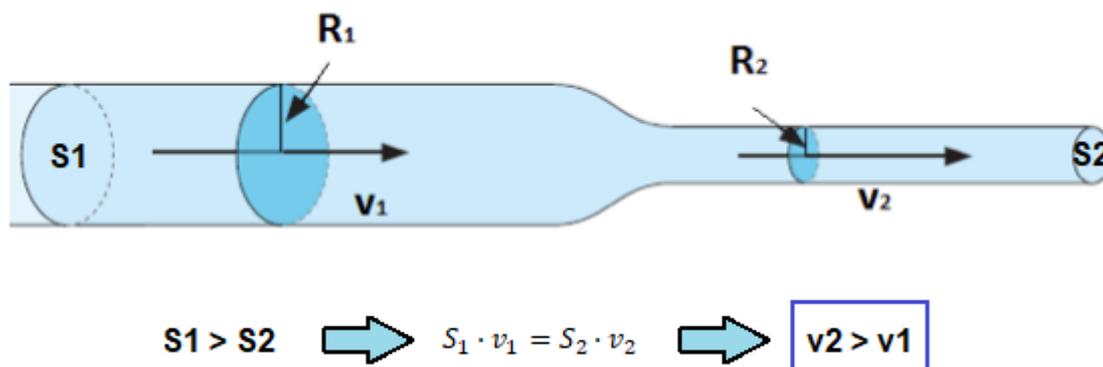


Figura 2 Volumen de control con cambio de sección. Elaboración propia.

El cambio de velocidad que experimenta el fluido del sistema es necesariamente producido por una aceleración, y a su vez, un sistema en presencia de aceleración está sujeto a fuerzas según la famosa ley de *Newton*.

$$\overline{\sum F} = m \cdot a \quad [N] \quad (5)$$

$$\overline{\sum F} \cdot \partial t = \partial(m \cdot v) \quad \left[\frac{kg \cdot m}{s} \right] \quad (6)$$

Dónde:

- F es la fuerza [N].
- m es la masa [Kg].
- a es la aceleración que experimenta la masa m [m/s^2].
- t es el tiempo [s].

El término $\overline{\sum F} \cdot \partial t$, conocido como impulso mecánico, es el responsable de generar una variación de la cantidad de movimiento $m \cdot v$ del fluido contenido en el volumen de control. Si consideramos el problema en régimen permanente se tiene la siguiente expresión de la

conservación de la cantidad de movimiento:

$$\overline{\sum F} = \dot{m} \cdot (v_2 - v_1) \quad \left[\frac{kg \cdot m}{s} \right] \quad (7)$$

En forma diferencial y para un fluido general el principio de conservación del momentum puede escribirse de la siguiente forma:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \rho F a_i - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \left[2\mu \left(e_{ij} - \frac{\Delta \delta_{ij}}{3} \right) \right] \quad (8)$$

Dónde:

- ρ representa la densidad [Kg/m³].
- v_i representan las componentes de la velocidad [m/s].
- $F a_i$ representa en campo de aceleraciones creado por las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo, como la gravedad [m/s²].
- P es la presión del fluido [Pa].
- μ es la viscosidad dinámica del fluido [Pa·s].
- e_{ij} es el tensor tasa de deformación del fluido: $e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$
- δ_{ij} es la delta de Kronecker.

3.1.3. Principio de conservación de la energía

La energía total de un sistema sólo tiene tres componentes:

- Energía cinética: es la energía que posee un sistema por estarse moviendo a una velocidad determinada respecto a un sistema de referencia. Para un cuerpo de masa m moviéndose a velocidad v :

$$e_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad [J] \quad E_c = \frac{e_c}{m} \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (9)$$

- Energía potencial: energía que tiene el sistema debido a su posición en un campo potencial de fuerzas. Para un cuerpo de masa m , situado a una altura z y sometido al campo potencial gravitatorio:

$$e_p = m \cdot g \cdot z \quad [J] \quad E_p = \frac{e_p}{m} \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (10)$$

- Energía interna: es la energía del sistema debida al movimiento de las moléculas y a la interacción entre ellas que se manifiesta a través de la temperatura del sistema. Al

ser una función compleja del estado del sistema no se puede representar con sus variables ni calcularla de forma absoluta; se suele representar con la letra u y es posible calcular diferencias de energía interna Δu .

$$U = \frac{u}{m} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (11)$$

Por otra parte la energía transferible entre el sistema y sus alrededores puede tomar dos formas distintas:

- Calor: es la energía que fluye como resultado de la diferencia de temperaturas (q).

$$Q = \frac{q}{m} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (12)$$

- Trabajo: es la energía que fluye como resultado de una aplicación de fuerzas. En sistemas fluidos pueden considerarse dos aspectos del trabajo: trabajo intercambiado entre fluido y algún mecanismo (w), y, trabajo asociado a cambios de volumen debido a fuerzas de presión que actúan sobre el fluido (w_p).

$$w = \frac{W}{m} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad w_p = PV \quad [J] \quad Wp = \frac{w_p}{m} = \frac{PV}{m} = \frac{P}{\rho} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (13)$$

Finalmente, para facilitar cierto tipo de cálculos se defina una variable llamada entalpía h que es la combinación de dos aspectos de la energía: la energía interna y el trabajo asociado a cambios de volumen debido a fuerzas de presión que actúan sobre el fluido:

$$h = u + PV \quad [J] \quad (14)$$

Para demostrar el principio de conservación de energía en fluidos se va a partir de una ley fundamental de la física, la primera ley de la termodinámica, que no es más que una ley que refleja la conservación de energía en el contexto de la termodinámica.

$$\frac{\partial E_t}{\partial t} = \dot{q} + \dot{w} \quad [W] \quad (15)$$

Donde:

- E_t es la energía total de un sistema [J].
- \dot{Q} es la potencia neta en forma de calor [W].
- \dot{W} es la potencia neta en forma de trabajo [W].

La expresión (15) se interpreta como que la rapidez del cambio en el tiempo de la energía de un sistema es igual a la velocidad de transferencia neta de energía (potencia) entre el sistema y el entorno. Si integramos y manipulamos un poco dicha expresión con las

definiciones energéticas expuestas:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = Q + W \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (16)$$

$$\frac{1}{2} \cdot (v_2^2 - v_1^2) + g \cdot (z_2 - z_1) + (U_2 - U_1) + \frac{1}{\rho} \cdot (P_2 - P_1) = Q + W \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (17)$$

La expresión (17) constituye el principio de conservación de la energía.

En muchos procesos termodinámicos los factores más significativos de la ecuación de conservación de la energía son los mecánicos y el trabajo. Los términos de incremento de energía interna y flujo de calor acostumbran a ser muy pequeños, aun así es cierto que el rozamiento del fluido con las paredes del sistema hace que parte de la energía interna se transforme en calor. Por ello la cantidad $\Delta U - Q$ constituye las denominadas pérdidas por fricción del sistema, que denotaremos con F_r . Se expresa de este modo lo que se conoce en fluidodinámica como la ecuación de Bernoulli generalizada.

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) + \sum F_r = W \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (18)$$

Si consideramos ahora que las pérdidas por fricción son menospreciables, lo cual es habitual en cálculos ingenieriles, y que no existe trabajo aportado mecánicamente por una máquina w , lo cual es una situación recurrente, se tiene lo que se conoce en fluidodinámica como la ecuación de Bernoulli simplificada.

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta \left(\frac{P}{\rho} \right) = 0 \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (19)$$

$$\frac{v_1^2}{2} + z_1 \cdot g + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2} + z_2 \cdot g + \frac{P_2}{\rho} \quad \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (20)$$

Esta última expresión (20) pone de claro manifiesto la conservación de la energía entre sus diferentes componentes energéticas.

De forma diferencial y para un fluido incompresible, viscoso y *Newtoniano* a ecuación de conservación de la energía puede escribirse de la siguiente manera:

$$\rho \frac{\partial \hat{u}}{\partial t} + P(\nabla \bar{v}) = \nabla(k\nabla T) + \xi \quad (21)$$

Dónde ξ es la función de disipación viscosa:

$$\begin{aligned} \xi = \mu \left[2 \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} \right) + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] \end{aligned} \quad (22)$$

3.1.4. Shallow Water Equations

Las *Shallow water equations*, o traducido al castellano, ecuaciones de aguas someras, son una alternativa poco costosa computacionalmente comparado con la resolución de las ecuaciones de *Navier-Stokes* de gobierno de los fluidos. Son un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales hiperbólicas (o parabólicas si se considera una cizalladura viscosa) que describen el flujo debajo de una superficie de presión en un fluido [52]. Las *shallow water equations* en forma unidireccional también se las conoce como ecuaciones de Saint-Venant.

Las *shallow water equations* derivan de las ecuaciones de conservación de la masa y la conservación del momento lineal (las ecuaciones de Navier-Stokes), que se mantienen incluso cuando las suposiciones de las aguas poco profundas se rompen. En el caso de un lecho horizontal, sin fuerzas de Coriolis, fuerzas de fricción o viscosas, las *shallow water equations* en la forma no-conservativa son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}((H+h)u) + \frac{\partial}{\partial y}((H+h)v) = 0 \quad (23)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial h}{\partial x} - bu + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (24)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fv = -g \frac{\partial h}{\partial y} - bv + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (25)$$

Donde:

- u es la velocidad en la dirección x , o velocidad zonal [m/s].
- v es la velocidad en la dirección y , o velocidad meridional [m/s].
- h es la desviación de altura de la superficie de presión horizontal desde su altura

media H : $\eta = H + h$

- H es la altura media de la superficie de presión horizontal [m].
- g es la aceleración debido a la gravedad [m/s^2].
- f es el coeficiente de Coriolis asociado con la fuerza de Coriolis, en la Tierra vale $2\Omega \sin(\varphi)$, donde Ω es la tasa de rotación angular de la Tierra y φ es la latitud
- b es el coeficiente de arrastre viscoso
- ν es la viscosidad cinemática

3.1.5. Regímenes de flujo

Cuando se tiene un flujo de algún líquido circulando dentro de una tubería, las partículas del líquido se comportan de formas diferentes en función de ciertas variables que afectan al flujo. Existen entonces distintos regímenes de flujo que están definidos por la combinación del efecto de gravedad y del efecto de viscosidad de los fluidos. El descubrimiento formal de estos dos regímenes de flujo se debe a una famosa experimentación llevada a cabo por el ingeniero y físico irlandés Osborne Reynolds.

Reynolds llevó a cabo una experimentación para verificar si las características de un flujo de un determinado líquido podían verse alteradas por una modificación de las propiedades físicas de dicho fluido. Para ello realizó un montaje que presentaba una tubería por donde circularía el fluido de estudio, y, en el punto central de esta, situó un tubo que desprendía tinta para que el comportamiento dinámico del fluido de estudio se hiciera visual.

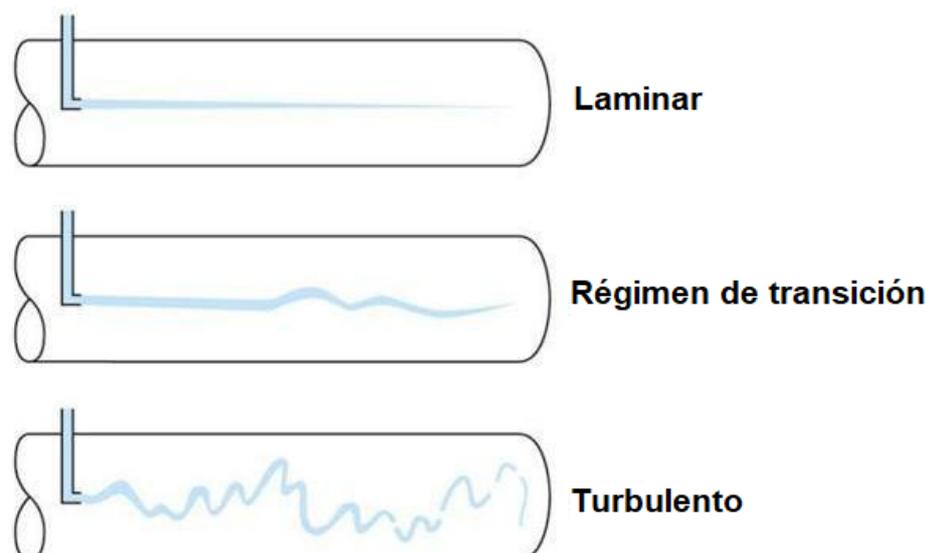


Figura 3 Representación del experimento de Reynolds. Elaboración propia.

Primero que todo Reynolds observó como la tinta circulaba de forma muy ordenada y nada caótica, lo que indicaba que así también lo hacía el fluido de estudio. Al ir variando la velocidad del fluido de estudio a través de una válvula situada al final de la tubería y llegados a cierto punto, la tinta comenzó a presentar síntomas de inestabilidad, pequeñas fluctuaciones que indicaban que al aumentar más la velocidad se pasaría a un régimen desordenado y caótico del fluido de estudio tal y como muestra la Figura 3.

El primer régimen del flujo es el régimen laminar, y sus principales características son que el movimiento del fluido es lento y viscoso, las variaciones del flujo son suaves, no existe una mezcla significativa entre las partículas cercanas entre sí y los efectos de inercia son despreciables mientras los efectos viscosos son relevantes.

El tercer régimen es el régimen turbulento, y sus características son la presencia de movimiento con fuertes fluctuaciones, movimiento caótico de las partículas del fluido que varía de forma irregular, las fuerzas viscosas son débiles frente las inerciales que son relevantes y las propiedades presentan variaciones aleatorias con el tiempo y el espacio, por lo tanto se describen mediante promedios estadísticos.

El régimen de en medio es el régimen de transición, y es un régimen donde el flujo presenta propiedades a caballo de los dos regímenes anteriores. Es por ello un régimen difícil de estudiar ya que es frontera entre dos comportamientos claramente diferenciados.

Cabe decir que no sólo la velocidad del fluido es determinante sobre el régimen de flujo, también lo son otros parámetros físicos como por ejemplo la escala de longitud del campo del flujo del problema de estudio, que en el caso del experimentación de Reynolds corresponde con el diámetro de la tubería principal. Es tan importante esta dimensión característica del problema que, en primera instancia en hacer variar la velocidad del fluido, Reynolds no pudo observar un cambio de régimen del fluido de estudio de laminar a turbulento dado a que el diámetro de la tubería utilizada era demasiado pequeño.

La necesidad de determinar en qué tipo de régimen se encuentra un flujo llevó a Reynolds a determinar lo que se conoce como número de Reynolds (Re), el cual es adimensional y nos indicará si un flujo se encuentra en régimen turbulento o laminar en función de los parámetros físicos que afectan al mismo. El número de Reynolds se puede definir como la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas presentes en un fluido.

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inercia}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{v \cdot L}{\nu} \quad (26)$$

Donde:

- v es la velocidad del flujo [m/s].

- L la escala de longitud del campo del flujo o dimensión característica [m].
- ν viscosidad cinemática [m^2/s].

A través del cálculo de este número se puede establecer en qué régimen se encuentra cualquier flujo. En dominios tubulares cerrados, el flujo será laminar para números de Reynolds inferiores a 2100, turbulentos por números superiores a 2400, y, en régimen de transición para valores de Reynolds que se encuentren en medio de ambos citados.

3.1.6. Capa límite

Si se tiene un flujo de un fluido con una cierta velocidad v que es estorbado por la presencia de un sólido, fruto de la interacción se produce un gradiente de velocidades del flujo, fenómeno que se conoce como capa límite. Este gradiente de velocidades se debe al fenómeno físico de rozamiento entre fluido y sólido, de tal manera que aquellas partículas de fluido más cercanas al sólido se verán ralentizadas mientras que aquellas suficientemente lejanas al fluido no sufrirán los efectos de rozamiento de esta interacción. Toda la región en la que los efectos de rozamiento están presentes se conoce como la capa límite. Si nos atenemos a la condición de no deslizamiento en las partículas directamente expuestas al sólido, podemos definir el espesor de la capa límite δ , que comprende la región del flujo en que la velocidad pasa de ser nula hasta que pasa a ser el 99% de la velocidad no perturbada del flujo ($0,99 \cdot v$).

El espesor de la capa límite varía en función de la distancia de penetración del fluido sobre el sólido en cuestión. En todo este espesor los efectos de rozamiento entre flujo y sólido se transmiten desde los puntos de contacto hasta el final de la capa límite a través de esfuerzos cortantes que se dan en las diferentes capas del fluido. Veamos dos ejemplos, flujo externo sobre una placa plana y flujo interno en una tubería:

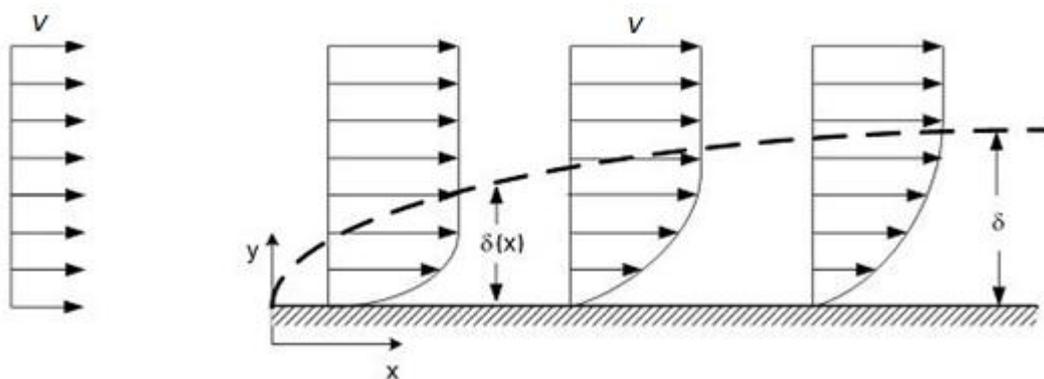


Figura 4 Esquemización de la capa límite de un flujo sobre una placa plana [15].

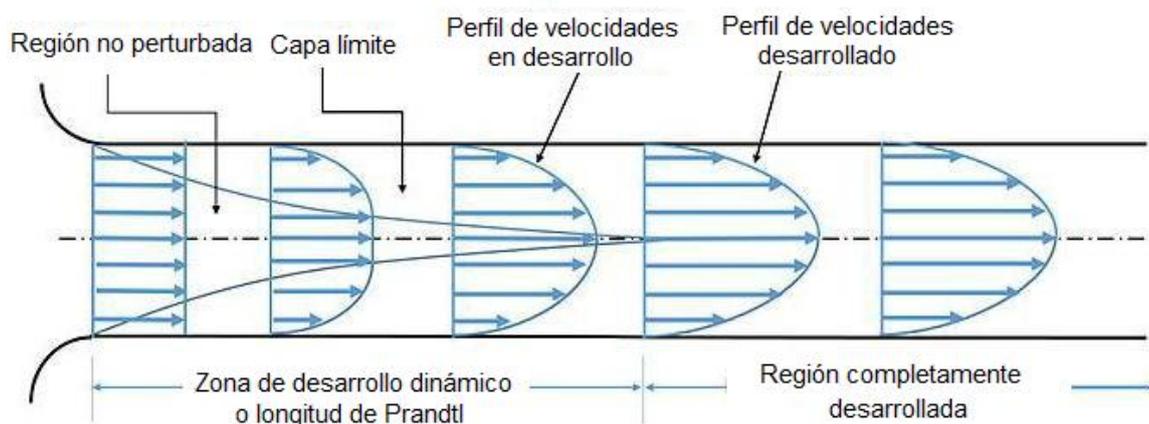


Figura 5 Esquemmatización de la capa límite de un flujo sobre una placa plana [15].

El espesor de la capa límite depende de la posición horizontal x ($\delta(x)$) ya que el principio de conservación de la masa entre la entrada y la salida del volumen de control así lo sugiere. Dado que la velocidad media del flujo disminuye en la capa límite, su sección de paso debe aumentar según la expresión del principio de conservación de la masa (4).

Entrando en más detalle en la capa límite, podemos dividirla en tres zonas o tipos de capa límite bien diferenciadas en función del comportamiento que el flujo tiene en su interior. Tal y como se ha explicado anteriormente, existen tres tipos de regímenes de flujo, el laminar, el turbulento y el de transición. Paralelamente, las tres zonas en que se divide la capa límite son la laminar, la turbulenta y la de transición, que se corresponden con los tipos de regímenes de flujo que se dan en su interior. Dado a que las características de cada régimen de flujo son claramente diferenciables, cada uno de ellos tiene unos efectos diferentes cuando se dan en la capa límite.

Tal y como su régimen de flujo indica, en la capa límite laminar los movimientos de las partículas son ordenados y las capas del fluido se deslizan suavemente entre sí generando fuerzas de cizalla pequeñas. En estos tipos de capa los esfuerzos viscosos son relevantes y el espesor de la capa es relativamente pequeño.

Por otro lado, la capa límite turbulenta los movimientos de las partículas son desordenados y aleatorios, los esfuerzos viscosos por tanto no tienen relevancia pero sí los inerciales. El espesor de la capa límite turbulenta es mayor al de la capa límite laminar. Por otro lado, y dentro de esta capa en las regiones más cercanas al sólido, se forma una subcapa límite laminar, de un grosor muy pequeño, y que presenta las características de una capa límite laminar.

Dentro de una tubería y en régimen laminar, se obtiene un perfil de velocidades desarrollado

a partir de una determinada longitud de entrada a la tubería según la siguiente expresión [33]:

$$\frac{L_{laminar}}{D} \approx 0,05 \cdot Re \quad (27)$$

En flujos turbulentos y en casuística ingenieril se puede utilizar la siguiente expresión [33]:

$$\frac{L_{turbulento}}{D} \approx 10 \quad (28)$$

Los diferentes tipos de capas límite pueden convivir o bien no hacerlo, es decir, pueden darse situaciones donde sólo se dé la capa límite laminar y no se desarrolle la capa límite turbulenta, ya sea debido a la geometría del sólido o a la naturaleza del problema. En caso de que sí que se den ambos tipos de capa, también aparecerá un tercer tipo, la capa límite de transición, que una zona de impasse entre la zona laminar y la turbulenta con un comportamiento poco definido.

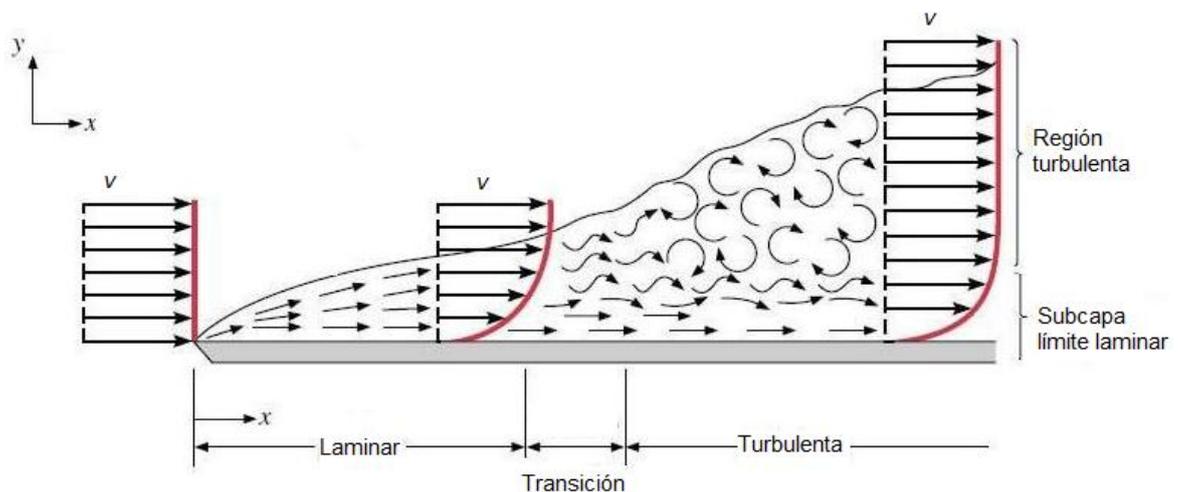


Figura 6 Desarrollo de la capa límite de un flujo sobre una placa plana [15].

3.1.7. Pérdidas de presión a lo largo de una tubería

La fricción resultante de la interacción fluido-sólido en una tubería genera pérdidas de presión que puede modelarse a partir de la ecuación de Darcy-Weisbach. Es una expresión empírica cuya forma general es la que sigue:

$$h_f = f \cdot \frac{L_t}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad [m. c. l] \quad (29)$$

Donde:

- h_f son las pérdidas de presión en metros columna de fluido.
- f es el factor de fricción adimensional de Darcy.
- L_t es la longitud de la tubería [m].
- D diámetro de la tubería [m].
- v velocidad media del fluido [m/s].
- g es la aceleración de la gravedad [m/s²].

El factor de fricción adimensional de Darcy depende del número de Reynolds del flujo fluido y de la rugosidad (ϵ) de las paredes de la tubería. Para el cálculo de dicho coeficiente existen múltiples ecuaciones pero quizás la forma más fácil y típica de calcularlo sea la propuesta por Lewis Ferry Moody, quien invento lo que se conoce como diagrama de Moody para el cálculo del factor de fricción adimensional de Darcy.

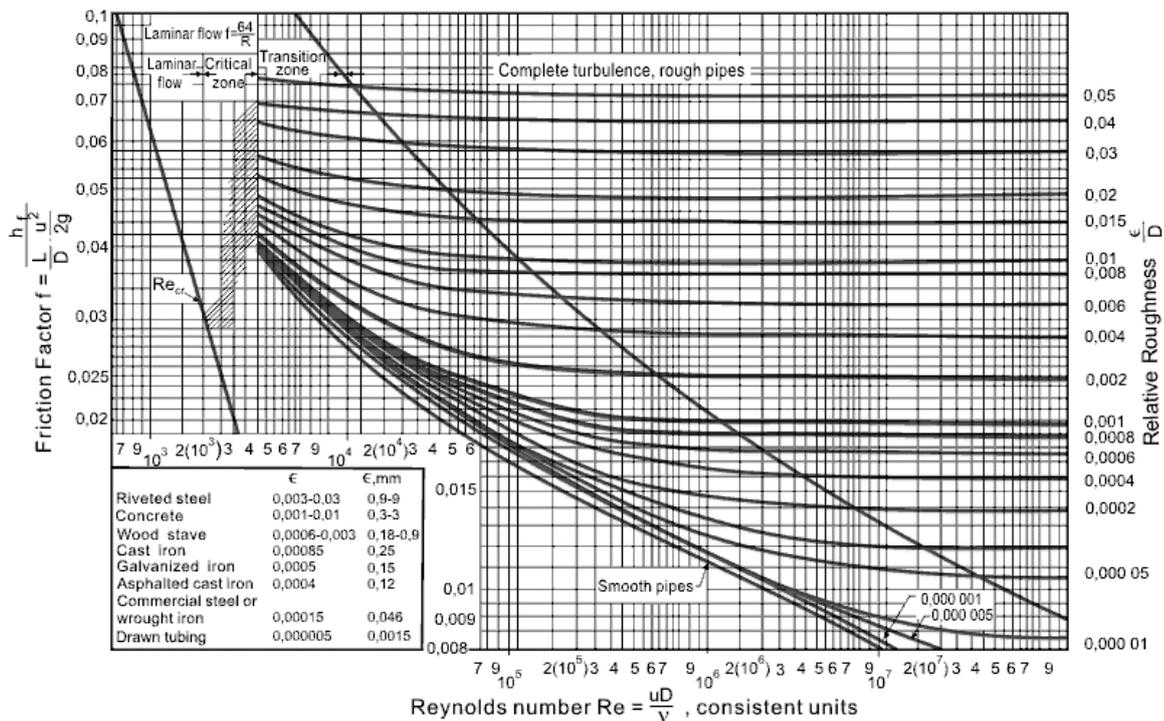


Figura 7 Diagrama de Moody [49].

Cuando las pérdidas de carga son debidas a singularidades geométricas de la tubería como codos o válvulas y no debidas a la fricción las pérdidas de carga pueden modelarse con la siguiente ecuación empírica:

$$h_s = \sum K_L \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} \quad [m.c.l.] \quad (30)$$

Donde K_L es el coeficiente de pérdida por singularidad.

3.2. Teoría del oleaje

En este apartado se tratan los aspectos teóricos relacionados con el fenómeno físico del oleaje puesto que el dispositivo objetivo de este trabajo se fundamenta en la energía undimotriz, es decir, en la energía de las olas.

3.2.1. Explicación del fenómeno físico de la ola y del oleaje

Se define ola como el fenómeno físico que se manifiesta en forma de onda y que se da en grandes superficies líquidas como mares, océanos, ríos, lagos entre otros, cuando éstas se ven sometidas a una acción externa. Algunos de estos mecanismos externos son el viento, los movimientos del sistema Tierra-Luna-Sol, movimientos del suelo marino, desprendimiento de laderas y glaciares o erupciones volcánicas submarinas entre otras de menor importancia para los objetivos del presente trabajo.

Todas las olas existentes en la naturaleza han estado generadas por alguno de los mecanismos externos citados, o más concretamente, por la combinación de varios de ellos. Aún así lo cierto es que la mayor parte de la energía comprendida en el oleaje es debida al viento, siendo éste el mecanismo externo de mayor relevancia.

El viento genera cierto arrastre cuando entra en fricción con la superficie del agua formando así lo que se conoce como olas capilares, de pocos milímetros de altura y longitudes de onda del orden del centímetro. El efecto de fricción del viento sobre el agua se intensifica cuando la superficie del agua pierde su lisura y las olas capilares van poco a poco transformándose en olas de gravedad.

En este proceso de formación del oleaje se distinguen dos zonas fácilmente identificables por sus singularidades: el mar de viento y el mar de fondo.



Figura 8 Esquema de las diferentes zonas que se dan en la formación del oleaje [16].

En un proceso de formación del oleaje, en la zona dónde el viento ejerce influencia sobre la superficie líquida se genera el denominado mar de viento. En el mar de viento la altura y el período del oleaje aumentan con la intensidad, la duración y la longitud de la zona de generación del viento o *fetch*. Las olas son de base corta, de altura más o menos elevada y de crestas no muy largas siendo el oleaje en esta zona caótico e impredecible.



Figura 9 Imagen representativa del mar de viento [16].

Por otra parte, en zonas alejadas de la acción del viento y debido a los fenómenos de

dispersión angular y de frecuencia, así como también por la disipación de la energía del oleaje y por la transferencia no lineal de energía entre frecuencias espectrales, se dan olas que disminuyen en altura y en frecuencia en cuanto más lejos se encuentran de la zona de formación. A esta zona dónde el fenómeno del oleaje deja de ser tan caótico como lo es en el mar de viento se la denomina mar de fondo.



Figura 10 Imagen representativa del mar de fondo [16].

3.2.2. Mecánica del oleaje

Tratándolo como una onda plana, los parámetros más importantes para describir el oleaje son los siguientes:

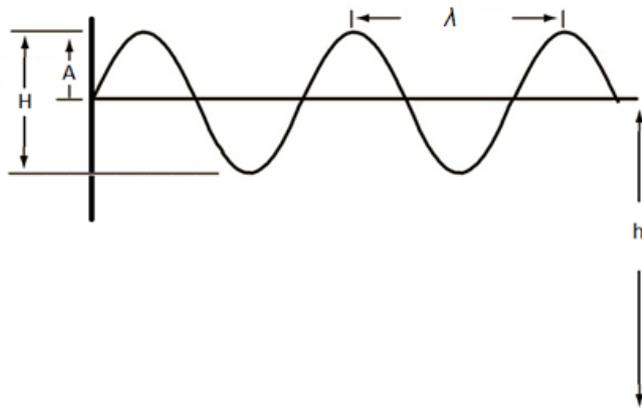


Figura 11 Esquema de una onda. Elaboración propia.

- Longitud de la onda λ que corresponde a la distancia entre dos crestas o dos valles de una onda [m].
- Altura de la onda H que corresponde a la distancia entre el punto más alto de una onda y su punto más bajo [m]. Es uno de los parámetros más importantes de la ola y determina en gran medida el comportamiento de la misma.
- Amplitud de onda A que corresponde la distancia entre el punto más alto o el punto más bajo de una onda a su punto de superficie media [m].
- La profundidad h que representa la distancia entre el punto de la superficie media del agua hasta una superficie solida que actúe como suelo [m]. Es también uno de los parámetros más importantes de la ola y determina en gran medida el comportamiento de la misma.
- La celeridad C que corresponde a la velocidad de desplazamiento de una onda [m/s].
- El período T de una ola que corresponde al tiempo que se demora una ola en realizar un ciclo completo a velocidad C . Por ello se calcula de la siguiente manera:

$$T = \frac{\lambda}{C} \quad [s] \quad (31)$$

El oleaje manifiesta el transporte de unas perturbaciones (olas) en el espacio así como de la energía contenida en ellas. Así pues el oleaje es un fenómeno de transporte de energía desde el punto dónde nace hasta el punto dónde rompe pero no supone un movimiento de las partículas del medio, o no al menos un movimiento significativo en comparación a la celeridad C de propagación del frente de onda. Para comprender en su totalidad la afirmación anterior es preciso comprender los modelos teóricos existentes acerca del oleaje.

Tal y como se ha especificado anteriormente, la profundidad de la ola h y su altura H son unos parámetros muy importantes de la ola por determinar gran parte de su comportamiento. Lo cierto es que las olas presentan diferente comportamiento en función de su altura y en función de si estas se dan en aguas someras, intermedias o profundas. Se hace pues indispensable disponer de distintos modelos o teorías de olas para poder tratar cada una de las distintas situaciones. Los diferentes modelos de olas deben ser capaces de establecer relaciones matemáticas para describir: (1) diferentes formas de ola; (2) el movimiento del agua a lo largo de la columna de fluido y la presión en las olas; (3) como (1) y (2) cambian con el asomeramiento. Para comprender la última proposición de forma ilustrativa véase la siguiente figura:

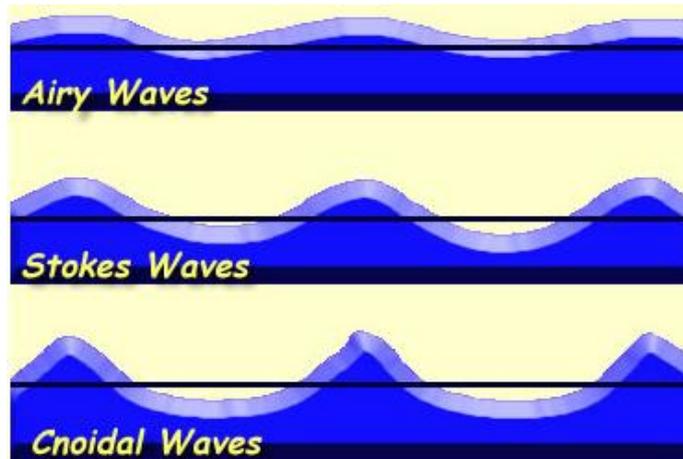


Figura 12 Formas de las olas resultantes de aplicar distintas formulaciones [17].

El siguiente gráfico muestra algunas de las teorías de olas clásicas empleadas para tratar cada una de las distintas situaciones así como el rango de validez de cada modelo en función de su altura H y su profundidad h :

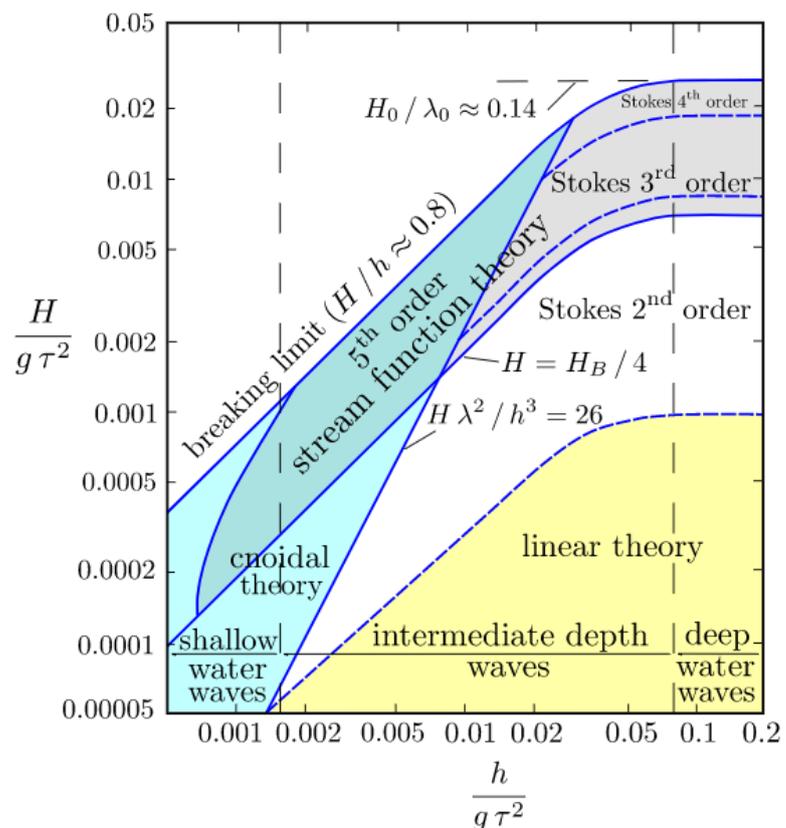


Figura 13 Gráfico de los rangos de validez de las distintas teorías de olas [18].

Como puede observarse del gráfico anterior, aquellas situaciones en las que la altura de la ola es muy grande en comparación a la profundidad de la misma corresponden a las situaciones en las que la ola colapsa. Se aprecia así del gráfico anterior que para dichas situaciones no hay modelo de tratamiento.

Se recalca que a pesar de la variedad de diferentes teorías de olas que existen ninguna de ellas es capaz de describir la totalidad de las formas en las que podemos encontrar el oleaje en la naturaleza.

3.2.2.1. Teoría lineal o Teoría de Airy

La teoría lineal o teoría de Airy es un modelo de uso bastante extendido que data del 1845. Se trata de una teoría lineal para describir la propagación de olas en la superficie de un flujo potencial y por encima de un fondo horizontal. Se fundamenta en una serie de simplificaciones que la hacen apta para describir oleaje de intermedia/alta profundidad pero baja amplitud en comparación a su longitud de onda tal y como se denota en la *Figura 13*. Las simplificaciones en las que se fundamenta la teoría son las siguientes:

- El agua es homogénea e incompresible.
- La tensión superficial puede ser despreciada.
- El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
- La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
- El agua del mar carece de viscosidad.
- El flujo es *irrotacional*, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.
- El fondo marino constituye un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que la velocidad vertical en él es nula.
- La amplitud de onda es pequeña en comparación a la longitud de onda y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio.
- Las ondas son planas (bidimensionales).

Formulación del problema de Flujo

La teoría de Airy utiliza el enfoque del flujo potencial para describir el movimiento de las olas de gravedad en la superficie del fluido. En términos de matemáticos, un potencial es una magnitud que puede ser vectorial o escalar y que sirve para describir la evolución o la variación más probable de otra magnitud. La teoría del flujo potencial pretende describir el comportamiento cinemático de los fluidos basándose en el concepto matemático de la función potencial, asegurando que el campo de velocidades del flujo de un fluido (que es un campo vectorial) es igual al gradiente de una función potencial que determina el movimiento de dicho fluido.

Teniendo en cuenta que el flujo es irrotacional por definición, la teoría de flujo potencial dice que existe una función escalar ϕ del espacio y del tiempo tal que su derivada en una dirección cualquiera es la componente de la velocidad del fluido en esa dirección. Se define así como función potencial el potencial de velocidad $\phi(x,z,t)$, el cual es una magnitud escalar. Nótese como la velocidad vectorial del fluido puede ser representada como el gradiente de una función escalar gracias a la teoría de flujo potencial. La variable x denota la posición horizontal (en la dirección de propagación de la ola), la variable z denota la posición en el eje vertical y la variable t corresponde al tiempo.

Utilizando la teoría del flujo potencial y asumiendo que el flujo es irrotacional, el potencial de velocidad $\phi(x,z,t)$ se relaciona con la componente horizontal (u_{fx}) y vertical (u_{fz}) de la velocidad del fluido de la siguiente manera:

$$u_{fx} = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad u_{fz} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad [m/s] \quad (32)$$

Por otra parte, si recordamos la ecuación de continuidad (1) presentada en capítulos anteriores:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{u}_f) = 0 \quad (33)$$

Dónde ρ es la densidad, t el tiempo y \vec{u}_f es la velocidad vectorial del fluido. Debido a esta ecuación y a la incompresibilidad del fluido, el potencial $\phi(x,z,t)$ debe satisfacer la ecuación de Laplace, puesto que si el flujo es incompresible su densidad no puede variar en el tiempo. Operando las ecuaciones 3 y 4 se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (34)$$

Se aplican a continuación las diferentes condiciones de contorno en la superficie y en el fondo para cerrar el sistema de ecuaciones.

Siendo el fondo un límite fijo e impermeable, la velocidad en la componente vertical del flujo en ese punto debe ser nula tal y como ya se ha descrito en las simplificaciones anteriores. Se tiene así la siguiente condición de contorno cinemática:

$$u_{fz} = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad [m/s] \quad \text{cuando } z = -h \quad (35)$$

Donde h es la profundidad desde la superficie media de la ola hasta el fondo marino. En segundo lugar, en la superficie libre del fluido y para olas infinitesimales, la velocidad vertical de las partículas del flujo tiene que ser igual a la velocidad de la superficie libre. Se tiene así la siguiente condición de contorno cinemática:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad \text{cuando } z = \eta(x, t) \quad (36)$$

Donde $\eta(x, t)$ es la elevación de la superficie libre en el momento t y punto x . Se necesita una última condición de contorno para cerrar el sistema. Ésta última viene dada por la ecuación de Bernoulli aplicada a la superficie del flujo potencial. Puesto que los efectos de la tensión superficial son desperdiciados como hipótesis de la teoría, la presión atmosférica justo por encima de la superficie libre debe ser igual a la presión del fluido justo por debajo de la misma. En el caso de presión atmosférica constante y después de la linealización del flujo potencial se obtiene la siguiente condición de contorno dinámica para la superficie:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0 \quad \text{cuando } z = \eta(x, t) \quad (37)$$

La siguiente imagen muestra el problema de forma esquematizada. La condición de contorno referente a la superficie libre surge como combinación de las anteriores ecuaciones (36) y (37).

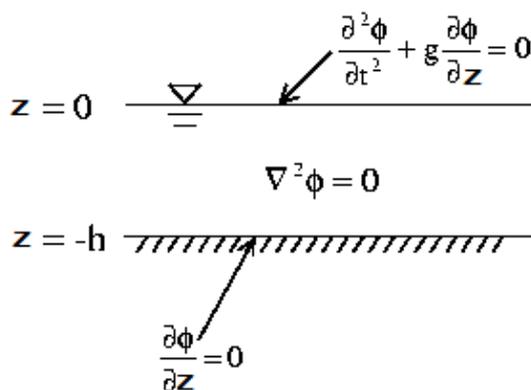


Figura 14 Esquematización del problema [7].

Solución para una onda monocromática progresiva

Para una onda de una sola frecuencia, es decir, una onda monocromática, la altura de la superficie libre prende la siguiente forma:

$$\eta(x, t) = A \cdot \cos(kx - \omega t) \quad [m] \quad (38)$$

Donde:

- A es la amplitud de onda [m].
- k es el número de onda y representa el número de veces que una onda vibra en una unidad de distancia.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad [m^{-1}] \quad (39)$$

- x es la posición horizontal, en la dirección de propagación de la ola [m].
- ω es la frecuencia angular.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (40)$$

- t es el tiempo [s].

El potencial de velocidad asociado a esta función $\eta(x, t)$ que satisface la ecuación de Laplace (34) así como las condiciones de contorno cinemáticas (35) y (36) y dinámica (37) es el siguiente:

$$\phi = \frac{\omega}{k} \cdot A \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad [m^2/s] \quad (41)$$

La condición de contorno dinámica (37) debe ser satisfecha por ϕ y η , que solo resulta en valores no triviales (no nulos por diferentes valores de amplitud de onda A) si se satisface la siguiente relación de dispersión lineal:

$$\omega^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kh) \quad \left[\frac{rad}{s} \right] \quad (42)$$

Así los valores de k y ω están relacionados y no pueden ser escogidos de forma independiente. La amplitud A de la ola si puede ser elegida de forma independiente, pero debe ser lo bastante pequeña en relación a la longitud de onda para que cumpla con las hipótesis de la teoría de Airy, véase la *Figura 13*.

Desplazamiento de las partículas de agua

Si integramos respecto al tiempo las ecuaciones de la velocidad (32) obtendremos, respectivamente, las ecuaciones de desplazamiento horizontal (43) y vertical (44) de las partículas del fluido.

$$\xi = -\frac{H}{2} \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad [m] \quad (43)$$

$$\varepsilon = -\frac{H}{2} \cdot \frac{\sinh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad [m] \quad (44)$$

Donde:

- H representa la distancia entre crestas de una ola.
- k es el número de onda de la ola.
- h es la profundidad de la ola.
- ω es la frecuencia angular de la ola.

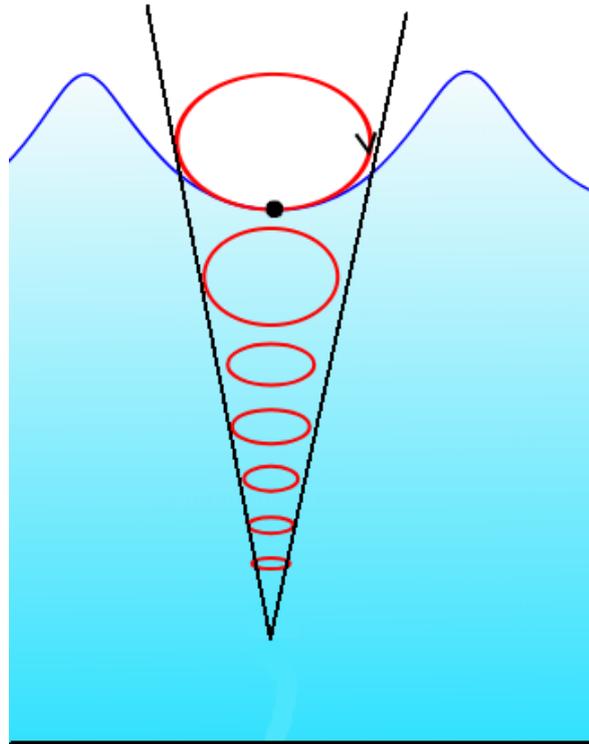
Podemos reescribir las expresiones anteriores de la siguiente forma si las manipulamos un poco matemáticamente:

$$\xi = -\frac{1}{\omega} \cdot B \cdot \cos(\omega t) \quad \text{con} \quad B = \omega \cdot A \cdot \frac{\cosh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \quad [m] \quad (45)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\omega} \cdot C \cdot \sin(\omega t) \quad \text{con} \quad C = \omega \cdot A \cdot \frac{\sinh(k(z+h))}{\sinh(kh)} \quad [m] \quad (46)$$

$$\frac{\xi^2}{\left(\frac{B}{\omega}\right)^2} + \frac{\varepsilon^2}{\left(\frac{C}{\omega}\right)^2} = 1 \quad (47)$$

La expresión anterior (47) es ni más ni menos que la ecuación de una elipse con semieje horizontal B/ω y semieje vertical C/ω . Así pues la teoría de Airy denota claramente que las partículas del fluido se mueven en orbitas elípticas. Se observa también como dichas trayectorias elípticas son cada vez más cerradas a medida que decrece la cota vertical z , hasta el punto que el movimiento desaparece.



*Figura 15 Representación del movimiento de las partículas en una ola.
Elaboración propia.*

Como caso particular, cuando B sea igual a C las trayectorias en lugar de elípticas serán circulares puesto que los semiejes mayor y menor de la trayectoria elíptica tendrán el mismo valor. Para que B sea igual a C es necesario que la profundidad k adquiera valores lo suficientemente grandes. En dicha situación:

$$B = C = A \cdot \omega \cdot e^{kz} \quad (48)$$

Por ello las trayectorias circulares de las partículas fluidas tendrán un radio de valor igual al producto $A \cdot e^{kz}$.

De este modo, la teoría de Airy denota que cuando el oleaje se da en aguas profundas las partículas seguirán trayectorias circulares mientras que a medida que la profundidad vaya disminuyendo las trayectorias van a ser cada vez más elípticas hasta llegar al punto de colapsar.

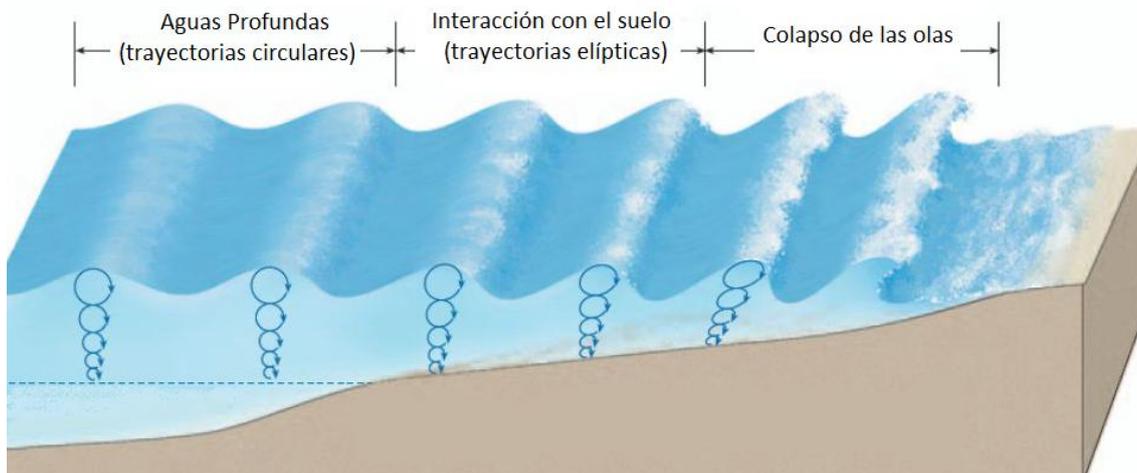


Figura 16 Trayectorias de las partículas de fluido en una ola a diferentes profundidades. Elaboración propia.

En resumen, la teoría de Airy pone de manifiesto que existen dos tipos de movimientos en el oleaje:

- Movimiento ondular de la onda, que es cíclico y que hace que la onda viaje a celeridad C transmitiendo energía desde su origen hasta el momento de colapsar. Este movimiento no supone transporte de materia.
- Movimiento circular o elíptico que realizan las partículas del fluido, que es el responsable de que los objetos que flotan en aguas profundas sufran un pequeño desplazamiento y de que las olas colapsen en aguas someras por interacción con la costa.

3.2.2.2. Teoría de Stokes

La teoría de Stokes es una teoría no lineal para describir una onda superficial y periódica sobre una capa de fluido no viscoso de profundidad media constante. Tiene sus orígenes en 1847 de la mano de George Stokes y es una teoría no alternativa a la de Airy, sino complementaria, ya que es útil para describir olas de naturaleza diferente a las olas de la teoría lineal. Esta teoría es de uso práctico para olas en aguas profundas e intermedias y de pequeña amplitud, aunque permite modelar olas de mayor amplitud que la teoría lineal, véase la *Figura 13*.

Uno de los problemas fundamentales a la hora de encontrar soluciones para problemas de olas gravitacionales es que las condiciones de contorno deben aplicarse a una posición de la superficie libre desconocida de antemano, tal y como se denota en la teoría lineal en las expresiones (36) y (37). La teoría de Stokes soluciona este problema a través de expansiones en series de Taylor del flujo potencial alrededor de la elevación media de la

superficie. Como resultado las condiciones de contorno pueden expresarse en términos de la superficie libre media, la cual es fija y conocida.

La solución al problema no lineal pasa por el uso de series de perturbación (denominadas en la teoría como expansión de Stokes) lo cual es una herramienta matemática para encontrar soluciones aproximadas de un problema perturbando la solución exacta de un problema relacionado más simple. El parámetro de expansión es el producto del numero de onda y de la amplitud de onda $k \cdot A$.

Un parámetro importante de las olas de Stokes es el *wave steepness* (o pendiente de ola en castellano) por ser proporcional al parámetro de expansión $k \cdot A$ y por ello determinante del comportamiento de la ola. Se define como la altura de la ola H dividida por la longitud de onda λ de la misma. El mismo Stokes demostró que el máximo *wave steepness* para una onda periódica propagándose en aguas profundas es de 0,14 tal y como se puede apreciar en la *Figura 13*. Siendo este parámetro el resultado de dividir la altura de la ola H y su longitud de onda λ , se llega a la conclusión que la altura máxima de la ola no puede rebasar la séptima parte de la longitud de onda de la misma.

El desarrollo de la teoría de Stokes es en la misma línea que la teoría de Airy pero aplicando las series de Taylor alrededor de la elevación media de la superficie libre para las condiciones de contorno. En función del primer término despreciado en dichas series de Taylor obtendremos consecuentemente las olas de Stokes de segundo orden, tercer orden, cuarto orden, quinto orden...etc. Las ondas periódicas progresivas que poseen una forma permanente deben propagarse a celeridad C constante. Si esta dirección de propagación la denotamos por la variable x , la elevación de la superficie libre η y la velocidad de las partículas del fluido u_f tienen que ser función de $(x-C \cdot t)$:

$$\eta(x, t) = \eta(x - C \cdot t) \quad [m] \quad (49)$$

$$u_f(x, z, t) = u_f(x - C \cdot t, z) \quad \left[\frac{m}{s}\right] \quad (50)$$

Para poder aplicar la expansión de Stokes a las ondas periódicas progresivas es bastante cómodo expresarlas como series de Fourier en función de la fase de onda $\theta(x, t)$ donde:

$$\theta(x, t) = kx - \omega t = k \cdot (x - C \cdot t) \quad [rad] \quad (51)$$

De esta manera:

$$\phi = \beta x - \gamma t + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot [\cosh(n \cdot k(z + h))] \cdot \sin(n\theta) \quad [m^2/s] \quad (52)$$

Satisfaciendo la ecuación de continuidad (1) así como las condiciones de contorno expresadas como series de Taylor alrededor de la elevación media de la superficie se determinan los parámetros D_n , E_n , C , β y γ .

La ecuación de la elevación de la superficie libre para una ola de Stokes de segundo orden se puede expresar de la siguiente manera:

$$\eta = H \cos(mx) + KH^2 \cos(2mx) \quad (53)$$

Donde:

- H es la amplitud de la ola [m].
- $m = 2\pi/\lambda$ [m^{-1}].
- $K = \frac{\pi}{\lambda} \left[\frac{\left(e^{\frac{2\pi d}{\lambda}} + e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}} \right) \cdot \left(e^{\frac{4\pi d}{\lambda}} + e^{-\frac{4\pi d}{\lambda}} + 4 \right)}{2 \left(e^{\frac{2\pi d}{\lambda}} + e^{-\frac{2\pi d}{\lambda}} \right)^3} \right]$ [m^{-1}] siendo d la profundidad de la ola en metros.

Así pues la teoría de Stokes conlleva el hecho de que la elevación de la superficie libre de las ondas generadas puede descomponerse en tantas ondas simples como el orden de las series de Taylor empradas para su resolución. Véase un ejemplo gráfico para una ola de Stokes de segundo orden:

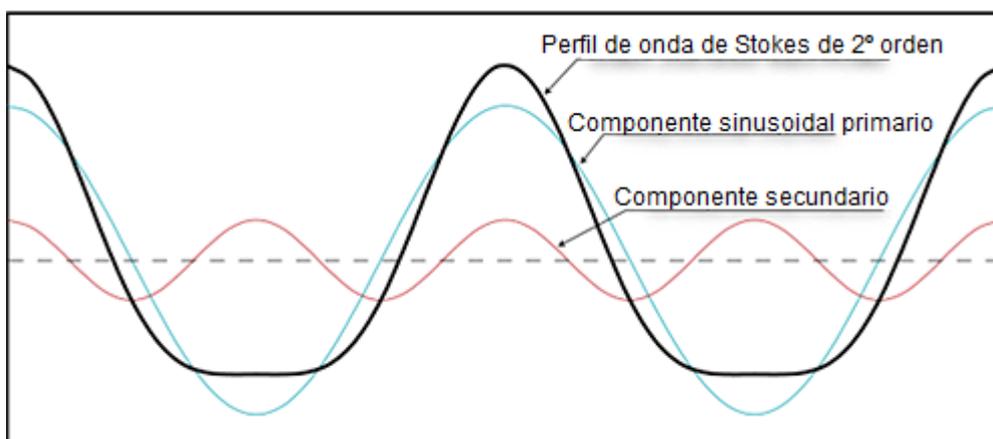


Figura 17 Ola de Stokes de 2º orden. Elaboración propia.

3.2.2.3. Teoría Cnoidal

La teoría Cnoidal fue desarrollada en 1895 por Diederik Johannes Korteweg y Gustav de Vries. Es útil para describir olas gravitatorias con longitudes de onda λ razonablemente largas en comparación a su profundidad h , por ello es una teoría que aplica en aguas someras tal y como se puede ver en la *Figura 13*.

Las olas de la teoría Cnoidal derivan de la ecuación de Korteweg–de Vries que puede ser empleada para describir la propagación de ondas débilmente no lineales y ondas largas, entendiendo como ondas largas aquellas que tienen una longitud de onda grande en comparación a la profundidad del fondo marino.

Solucionando la ecuación de Korteweg–de Vries se obtiene que la elevación de la superficie libre para olas de la teoría Cnoidal es la siguiente:

$$\eta(x, t) = \eta_2 + H \cdot cn^2 \cdot \left(2 \cdot K(m) \frac{x - C \cdot t}{\lambda} \middle| m \right) \quad [m] \quad (54)$$

Donde:

- η_2 es la elevación del canal, distancia entre el fondo hasta la depresión de la ola. [m]
- H es la altura de la ola [m].
- cn es la función elíptica de Jacobi. Depende del parámetro m .
- $K(m)$ es la integral elíptica completa de primer tipo. Depende del parámetro m .
- C es la celeridad de la onda [m/s].
- λ es la longitud de onda [m].
- m parámetro que determina la forma de la ola Cnoidal.

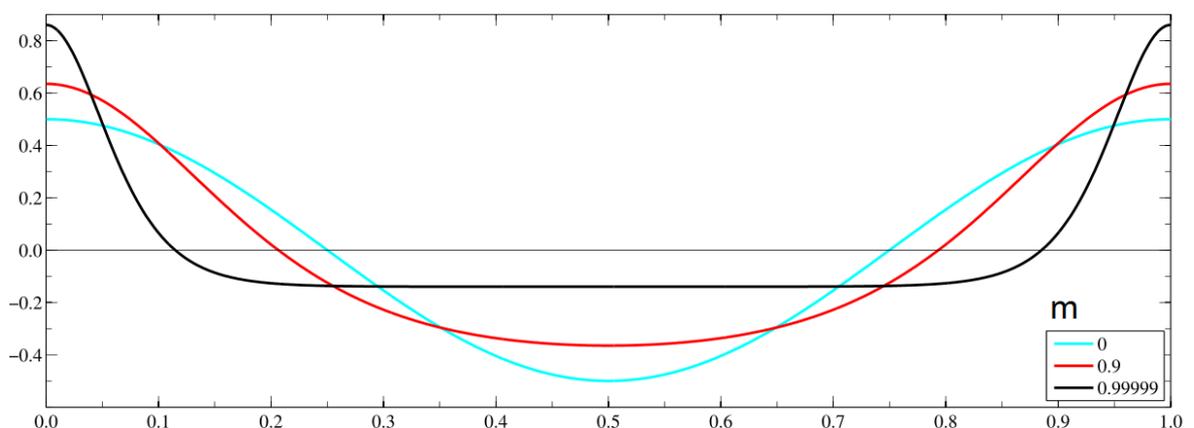


Figura 18 Ejemplos de olas generadas a partir de la teoría Cnoidal para diferentes valores del parámetro m [20].

3.2.2.4. Estudio del oleaje real

Los modelos teóricos del oleaje son útiles para muchísimas aplicaciones de la mecánica de fluidos donde interviene el oleaje, pero dichas teorías describen un oleaje formado por olas completamente idénticas entre ellas. Sabemos por simple inspección directa que el oleaje real es caótico y muy impredecible, y esto son características que las teorías de olas no consiguen abarcar. Las distintas olas que conforman el oleaje presentan diferentes alturas, variaciones en la anchura y en la longitud de onda así como tantas otras protuberancias que las hacen diferentes las unas de las otras. El oleaje se define pues como un proceso estocástico que varía de forma aleatoria en el espacio y en el tiempo. Así pues existe la necesidad de una herramienta para poder describir el oleaje real en distintas localizaciones y que contemple todas las particularidades que puedan darse.

La solución al problema pasa por estudiar el oleaje real considerando las dos componentes siguientes:

- Componente de fluctuación: estudia el comportamiento del oleaje durante un tiempo determinado.
- Componente de estado: estudia el comportamiento del oleaje en diferentes estados, como tormentas, marejadas, tsunamis...etc.

Para el estudio de la componente de fluctuación del oleaje se considera la hipótesis de que el oleaje es estacionario y homogéneo, aunque sepamos claramente que el oleaje real no lo sea porque evoluciona en el tiempo y sus principales características varían en el espacio. Aun así se puede hacer aplicable la hipótesis de que el oleaje es estacionario y homogéneo, para ello es necesario que las mediciones que se hagan en un punto determinado se den en un lapso de tiempo lo suficientemente corto como para considerar que el contenido energético del oleaje no ha variado sustancialmente pero a su vez lo suficientemente largo como para que los datos tomados sean estadísticamente significativos. Atendiendo simultáneamente ambas condiciones se consideran períodos de registro en un punto determinado de 20 minutos, o lo que resulta similar, un muestreo de más de 100 olas.

La componente de fluctuación del oleaje admite dos descripciones y tipos de análisis, el espectral y el geométrico estadístico.

Descripción espectral del oleaje

La descripción espectral del oleaje se fundamenta en la descomposición por medio de la transformada de Fourier de los diferentes parámetros que describen el oleaje. De esta manera a la elevación de la superficie libre $\eta(t)$ se la describe mediante un número finito de ondas lineales con diferentes amplitudes, frecuencias y fases.

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^n A_i * \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad [m] \quad (55)$$

Donde:

- $\eta(t)$ es la elevación de la superficie libre [m].
- A_i es la amplitud de la onda lineal componente i [m].
- ω_i es la frecuencia angular de la onda lineal componente i rad/s.
- t es el tiempo [s].
- φ_i es la fase de la onda lineal componente i .
- n es el número de ondas lineales en que hacemos la descomposición.

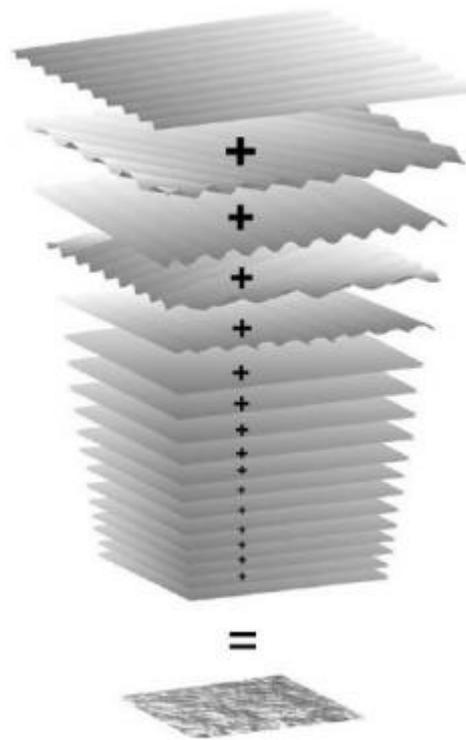


Figura 19 Representación de la descomposición espectral del oleaje real en todas sus componentes lineales [33].

La descripción espectral puede hacerse también en el marco de la distribución de la energía lo cual resulta muy útil a nivel de ingeniería ya que entrega información sobre la densidad de energía asociada a cada una de las frecuencias o componentes lineales que conforman el oleaje.

Descripción geométrico-estadística del oleaje

La descripción geométrico-estadística del oleaje es la otra alternativa a la descripción espectral que también tiene el fin de analizar y describir la componente de fluctuación del oleaje. Ésta descripción resulta más intuitiva que la espectral puesto que consiste en la determinación de unos parámetros estadísticos que sean descriptivos del oleaje y de las fluctuaciones del mismo a partir de un muestreo de datos recogidos en un determinado punto.

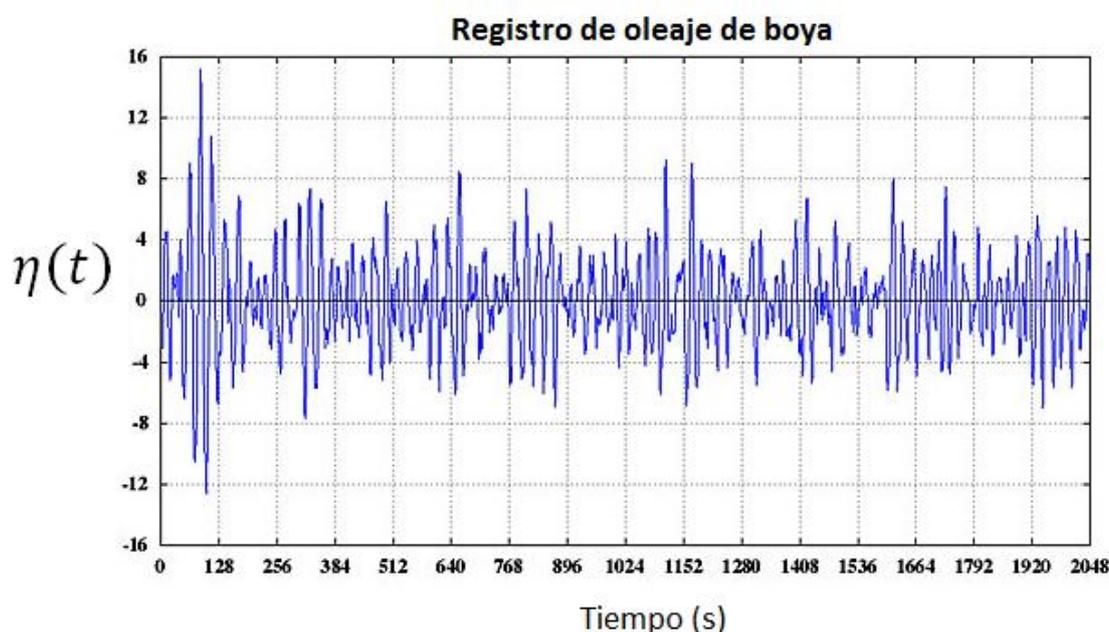


Figura 20 Ejemplo de registro de la elevación de la superficie libre del oleaje hecho por una boya. Elaboración propia.

El desafío es obtener información útil y descriptiva del oleaje de mediciones como los de la Figura 20. Así pues los datos recogidos del oleaje real en un punto y en un lapso de tiempo determinado se manipulan para calcular las siguientes magnitudes descriptivas del oleaje:

- Altura significativa del oleaje (H_s o $H_{1/3}$): se define la altura significativa como la media aritmética del tercio de olas con mayor altura, esto entrega información útil sobre la altura aprovechable desde una perspectiva energética.
- Altura media cuadrática del oleaje (H_{RMS}): La altura media cuadrática entrega información útil sobre la ola que representa de mejor manera el estado de un mar.

$$H_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad [m] \quad (56)$$

- Altura de media del oleaje (\bar{H}): La altura media del oleaje es simplemente la media de todas las olas.

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad [m] \quad (57)$$

- Periodo medio (T_z): El periodo medio es el promedio de todos los periodos del oleaje.
- Periodo significativo (T_s): Corresponde al promedio de los periodos del tercio de olas de mayor altura, dicho en otras palabras, corresponde al periodo promedio de las olas significantes.

Conocidos estos parámetros es posible obtener la distribución estadística del fenómeno del oleaje. Usualmente se utiliza la función de tipo Rayleigh de densidad que parte del supuesto de que el oleaje se distribuye de manera normal.

$$p(H) = \frac{2H}{(H_{RMS})^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (58)$$

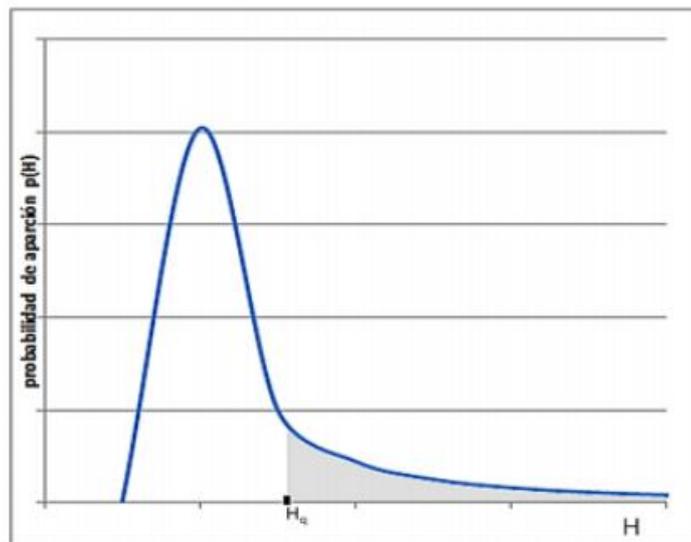


Figura 21 Función de densidad tipo Rayleigh de la altura de las olas. [33].

La integración de la función de densidad entrega la probabilidad de obtener un oleaje menor o igual al buscado:

$$P(H) = \int_0^{H_q} \frac{2H}{(H_{RMS})^2} e^{-\left(\frac{H}{H_{RMS}}\right)^2} dH = 1 - e^{-\left(\frac{H_q}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (59)$$

Aunque desde un punto de vista ingenieril es más interesante conocer la probabilidad de

obtener una altura mayor a un cierto valor H_q :

$$Q(H) = 1 - P(Hq) = e^{-\left(\frac{Hq}{H_{RMS}}\right)^2} \quad (60)$$

Lo interesante de esta distribución es que solo basta conocer el valor de H_{RMS} para conocer la probabilidad de obtener olas con una cierta altura en algún lugar determinado. Otro resultado interesante de esta distribución es la siguiente aproximación:

$$H_{1/3} \approx 1,41H_{RMS} \quad (61)$$

Esto nos entrega nuevamente información útil sobre la altura de las olas aprovechable energéticamente conociendo solamente el valor de H_{RMS} .

3.2.3. Energía del oleaje

Los mares y los océanos son la cuna de diversas fuentes de energías renovables como lo son:

- La energía contenida en las corrientes marinas, que son generadas por gradientes de temperatura, por la geometría de la superficie y por el movimiento de rotación terrestre entre otros factores.
- Energía mareomotriz, que consiste en el aprovechamiento de la energía contenida en las subidas y las bajadas de la marea.
- Energía undimotriz o olamotriz, la cual está contenida en las olas que han sido generadas por acción del viento.

El gradiente salino que se genera en las desembocaduras de los ríos en contacto con el agua salada del océano o el gradiente de temperatura existente entre las aguas de la superficie del océano y las profundas son otras fuentes renovables aprovechables desde el punto de vista energético que no serán tratadas en este trabajo porque no son objeto de estudio.

La energía del oleaje, la undimotriz, es así una de varias fuentes de energía renovable que puede ser explotada en los mares y océanos. Existen maneras de extraer la energía undimotriz más convencionales que otras, más sencillas o más complejas, más o menos eficientes, pero la energía que el oleaje contiene es una cantidad fija que depende de sus características físicas, las cuales limitan la cantidad de energía extraíble.

En cuanto a olas se refiere, una de las medidas más utilizadas para expresar la energía que contiene el oleaje es la densidad de energía media de la ola por unidad de área horizontal.

Siendo el total de energía que contiene una ola la suma de la energía cinética y potencial de la misma, podemos expresar la energía del oleaje de la siguiente forma si utilizamos el enfoque de la teoría de Airy [33]:

$$E_{d,pot} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot \eta^2 = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (62)$$

$$E_{d,cin} = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (63)$$

$$E_d = E_{d,pot} + E_{d,cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \quad (64)$$

Donde:

- A es la amplitud de la ola [m].
- ρ es la densidad del fluido [m^3].
- g es la aceleración de la gravedad [m/s^2].

Si en lugar de querer la densidad de energía media por unidad de área horizontal y queremos saber la cantidad de energía en *Joules* de una determinada ola solo tenemos que multiplicar la expresión anterior por la longitud de onda λ y por el ancho de tren de ola b .

$$E = E_{pot} + E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot A^2 \cdot \lambda \cdot b = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b \quad [J] \quad (65)$$

La expresión (65) denota algo muy interesante: la cantidad de energía máxima que cualquier dispositivo sería capaz de extraer de una ola sólo depende de la altura de la misma H , su longitud de onda λ , y del ancho del tren de ola b , en tanto que la densidad ρ y la gravedad g son parámetros invariantes. La relación entre la energía contenida en la ola y su altura es cuadrática, por ello, si se desea extraer una gran cantidad de energía de las olas mediante cualquier dispositivo, sería interesante a priori, disponer de olas de gran altura.

Comúnmente también se usa la potencia del oleaje por metro de ancho de la ola como parámetro para caracterizar la energía contenida en el oleaje.

$$Pot = \frac{1}{32\pi} \cdot \rho \cdot g^2 \cdot H^2 \cdot T \quad [W] \quad (66)$$

3.2.3.1. Distribución de la energía del oleaje

Es bien sabido que el oleaje tiene distintas características en función de la situación geográfica, por ende, también el contenido energético es diferente en función de la localización. Estando el oleaje estrechamente relacionado con la acción del viento sobre las masas de agua, la densidad energética del mismo tiende a aumentar a medida que la localización es más lejana al ecuador tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.

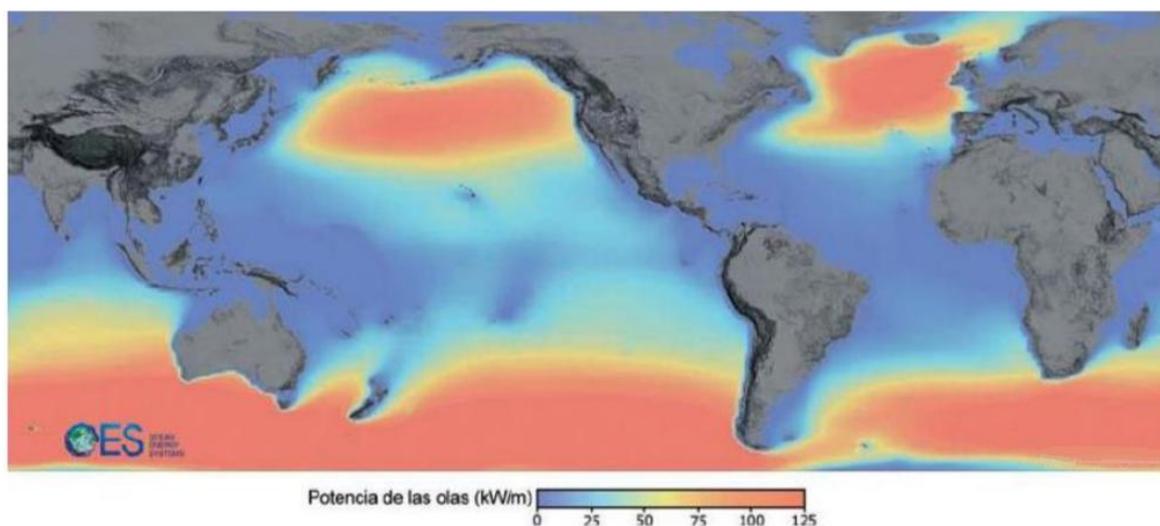


Figura 22 Mapa mundial de la potencia de las olas en kW/m [21].

3.2.3.2. Sistemas de Captación de energía undimotriz

Ya se ha explicado que la energía que transportan las olas, la energía undimotriz, es una magnitud que depende de las características de las mismas, concretamente de su altura, longitud de onda y del ancho del tren de onda. Dicha magnitud de energía se comporta como una cota superior de la energía que se puede obtener a través de dispositivos transformadores de energía, puesto que el principio de conservación de la energía así lo sugiere. Se sabe que el oleaje no es homogéneo, y por ello, distintas situaciones requerirán diferentes maneras de extraer energía según un criterio de optimización. De esta manera, a lo largo de la historia se han ideado una serie de dispositivos que actúan según diferentes principios con el único fin de optimizar la captación de energía del oleaje. Estos dispositivos pueden clasificarse según diferentes criterios.

Clasificación según su ubicación

Según el criterio adoptado en el proyecto europeo *WaveNet*, los dispositivos de captación

de la energía undimotriz pueden clasificarse según su ubicación de la siguiente forma:

- **Offshore:** si se encuentran ubicados en aguas profundas.
- **Nearshore:** si se encuentran ubicados en aguas intermedias o someras.
- **Onshore:** si se encuentra ubicado en la costa.

Independientemente de dónde se encuentren, si en aguas someras, profundas o intermedias, los dispositivos undimotrices pueden recibir el calificativo:

- **Apoyado:** si el cuerpo del dispositivo está anclado firmemente en la roca.
- **Flotante:** si el dispositivo flota en la superficie del agua.
- **Sumergido:** si el dispositivo se encuentre sumergido en el agua, es decir, sin estar flotando en la superficie ni fijado en la roca.

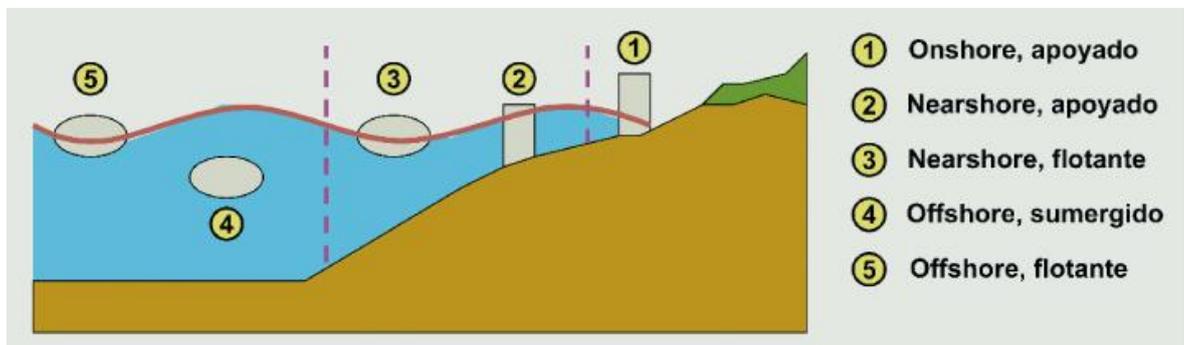


Figura 23 Clasificación de dispositivos undimotrices según su ubicación [22].

Clasificación según su tamaño y orientación

Según su tamaño y orientación, los dispositivos captadores de energía undimotriz pueden clasificarse de la siguiente manera:

- **Absorbedores puntuales:** Se trata de estructuras pequeñas en comparación con la longitud de la ola incidente y de formas cilíndricas. No les afecta la dirección del oleaje. Es habitual agruparlos formando una línea tal y como se muestra en la *Figura 23*.
- **Atenuadores:** También se denominan absorbedores lineales. Consisten en estructuras alargadas, colocadas en paralelo a la dirección de avance de las olas, de forma que van extrayendo energía de modo progresivo y direccional. Están menos expuestos a daños y por ello requieren menos esfuerzos de anclaje que los puntuales.
- **Terminadores o totalizadores:** Se trata de dispositivos alargados situados perpendicularmente a la dirección del avance de la ola y que pretenden captar la

energía de una sola vez. Un dispositivo ideal de este tipo no reflejaría ninguna energía, aprovechando el 100% de la misma.

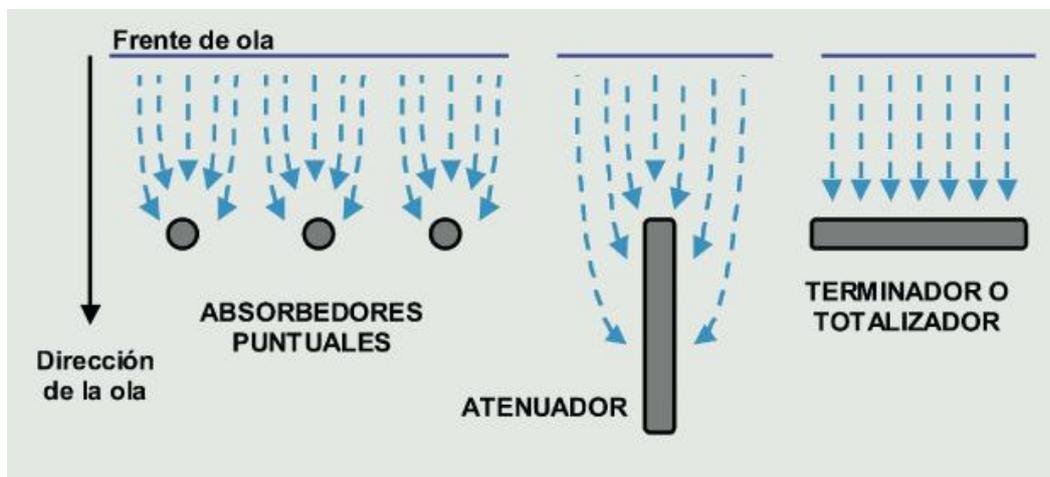


Figura 24 Tipo de dispositivos unidimensionales en función de su tamaño y orientación [22].

Clasificación según el principio de captación

Los dispositivos unidimensionales pueden clasificarse en función del principio de captación en el que se fundamentan de la siguiente forma:

- **Por diferencia de presión:** aprovechan la diferencia de presión que el oleaje genera en un fluido, normalmente aire, para transformar la energía. Se distinguen dos tipos: dispositivos que operan a través del fenómeno de columna de agua oscilante (OWC); y, dispositivos que funcionan con el efecto Arquímedes, es decir, que aprovechan las fluctuaciones de presión estática del oleaje.
- **Cuerpos flotantes:** los dispositivos basados en cuerpos flotantes aprovechan el movimiento oscilatorio del oleaje para transformar la energía. El movimiento aprovechable puede ser vertical, horizontal, de cabeceo o una combinación de ellos y a referencia puede ser fija o móvil.
- **Sistemas de rebosamiento y/o impacto:** Son sistemas fundamentados en la incidencia de las olas en una estructura que cause un aumento de su energía potencial, cinética o ambas. Los sistemas de rebosamiento fuerzan a que el agua pase por encima de la estructura mientras que en los de impacto las olas inciden en una estructura articulada o flexible.

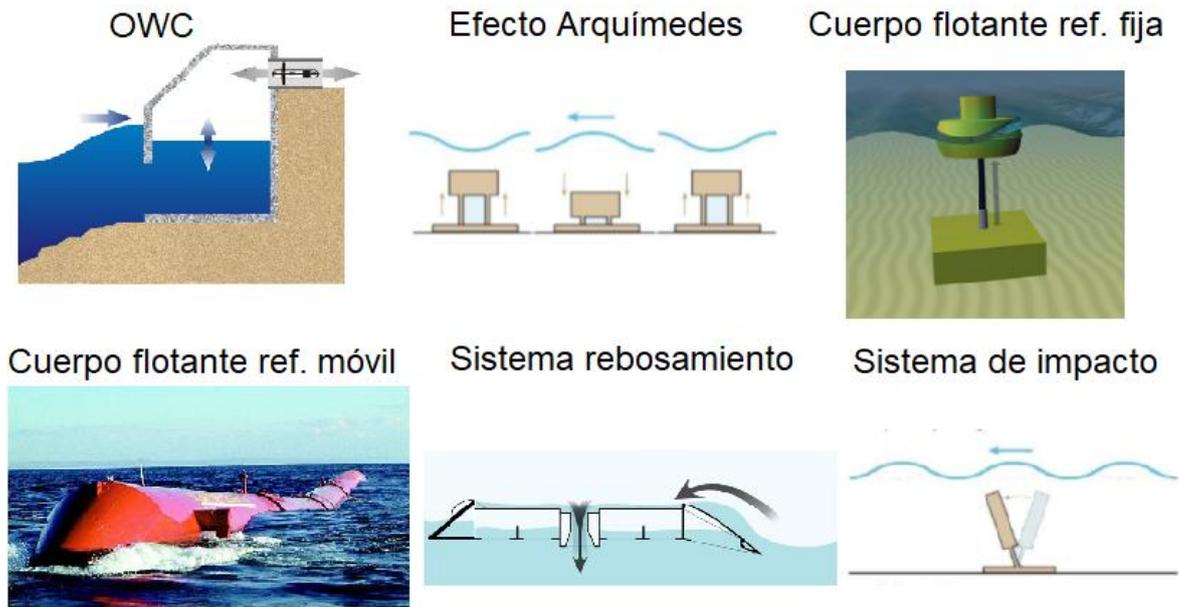


Figura 25 Distintos dispositivos undimotrices clasificados según su principio de captación.
Elaboración propia.

3.3. Teoría de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

En este apartado del trabajo se detallan ciertos aspectos teóricos de la dinámica de fluidos computacional que son fundamentales para entender la parte práctica del mismo.

Como se ha detallado en apartados anteriores, véase apartado 3.1, los flujos líquidos están gobernados por una serie de ecuaciones diferenciales que representan las leyes de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el flujo de fluidos y la transferencia de calor no suelen ser susceptibles para soluciones analíticas, excepto en casos muy simples. Por lo tanto, para analizar los flujos de fluidos, los dominios del flujo se dividen en subdominios más pequeños y las ecuaciones de gobierno son discretizadas en forma algebraica y resueltas dentro de cada uno de estos subdominios. El *CFD* es el arte de convertir estos sistemas de ecuaciones diferenciales en una serie de ecuaciones algebraicas que puedan ser tratadas y resueltas usando computadores [23]. La dinámica de fluidos computacional predice pues el comportamiento de flujos fluidos a partir de la resolución de ecuaciones matemáticas que gobiernan su comportamiento haciendo uso de procesos numéricos.

La dinámica de fluidos computacional puede utilizarse con muchos fines diferentes como mejorar la aerodinámica de aviones o coches o hasta para evaluar el impacto de tsunamis o

inundaciones. Ésta disciplina aporta predicciones cualitativas de problemas que involucren flujos fluidos a través de la siguiente metodología:

- Definición de la geometría del problema.
- Discretización de la geometría definida en celdas (*mesh*) sobre las cuales se aplicaran las ecuaciones de gobierno en forma discretizada para poder obtener soluciones analíticas del conjunto.
- Elección apropiada del modelo matemático de ecuaciones diferenciales que gobiernan la naturaleza del problema.
- Definición de las condiciones del contorno del problema.
- Computación de la solución.
- Post-procesado para examinar los resultados de los cálculos.

Para todas y cada una de las partes de este proceso existe *software* especializado pero también existen programas que permiten llevar a cabo todos los pasos necesarios en los problemas de *CFD*, como es el caso de *ANSYS*.

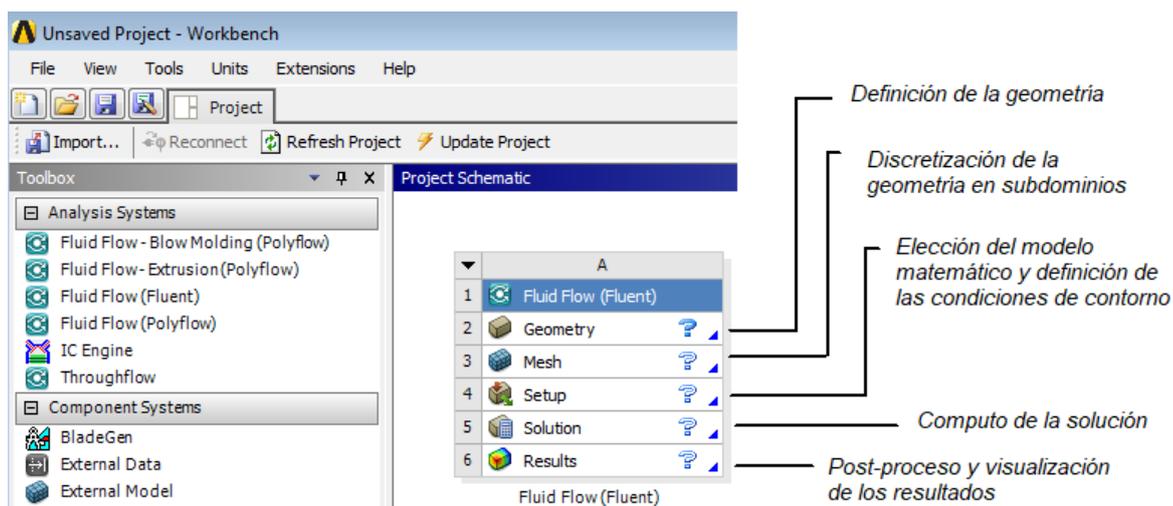


Figura 26 Captura de pantalla del software Ansys. Elaboración propia.

3.3.1. Definición de la geometría del problema

Representa los límites físicos del problema y puede ser definida haciendo uso de cualquier programa de Computer Aided Design (*CAD*).

La dinámica de fluidos computacional puede aplicarse tanto a geometrías bidimensionales como a geometrías tridimensionales. La discretización en problemas tridimensionales

supondrá, por razones obvias, un mayor número de elementos o subdominios que el mismo problema tratado de forma bidimensional, por ende, el costo computacional se verá también incrementado. Es pues una tarea fundamental determinar si el problema debe ser abordado tridimensionalmente o puede hacerse de manera simplificada y de forma bidimensional a mucho menor coste computacional.

3.3.2. Mallado o *Mesh*

La discretización es un proceso matemático mediante el cual vamos a obtener resultados aproximados de la ecuación diferencial de un problema [25].

Meshing o el acto de mallar consiste en la división de la geometría en pequeñas celdas que pueden tener distintas formas y que comúnmente se les denomina también elementos con el fin de poder aplicar las ecuaciones de gobierno de los flujos fluidos de forma discretizada a cada uno de los subdominios creados.

Las formas que pueden adoptar estas subdivisiones son comúnmente hexaedros y tetraedros en 3D y cuadriláteros y triángulos en 2D. Pero también pueden generarse mallas con elementos piramidales, prismáticos o poliédricos arbitrarios.

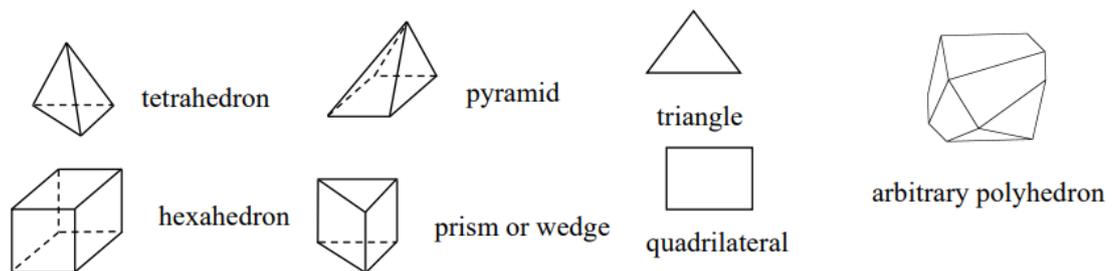


Figura 27 Diferentes tipos de elementos de un mallado [26].

La elección del tipo de geometría de elementos a usar sigue el siguiente criterio:

- Para geometrías poco complejas el uso de elementos cuadrados y hexaédricos proveen de un mallado de mejor calidad con menor número de elementos.
- Para geometrías complejas el uso de elementos cuadrados y hexaédricos no ofrecen ninguna ventaja y se puede ahorrar coste computacional usando elementos triangulares o tetraédricos.

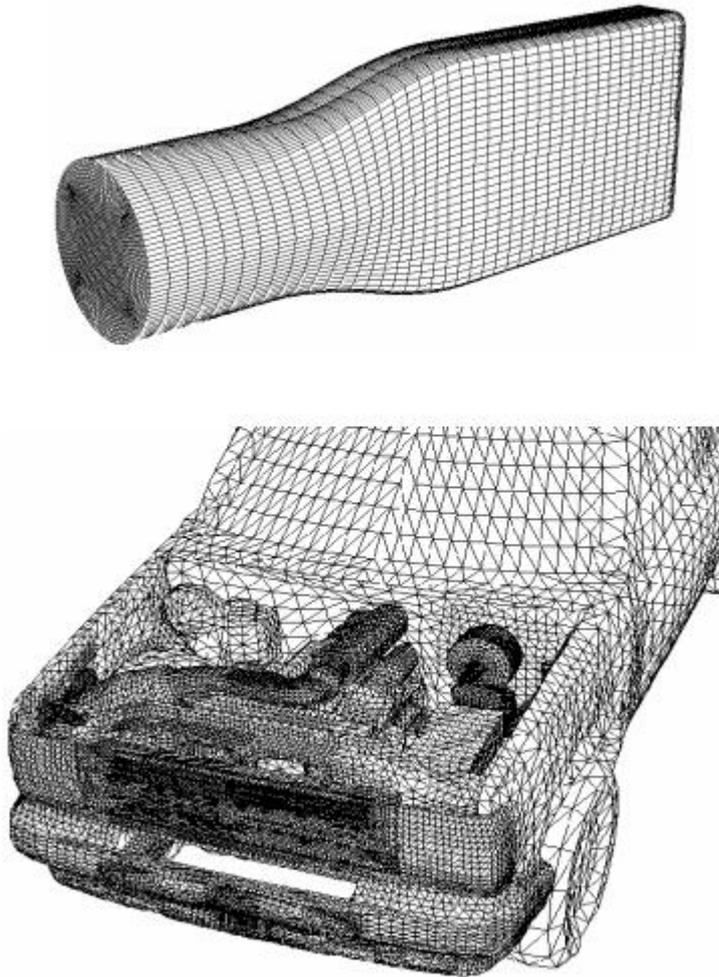


Figura 28 Ejemplos de mallados con distintos tipos de elementos [26].

El proceso de obtener un mallado apropiado constituye un cuello de botella en los problemas *CFD*. Un mallado con un mayor número de elementos suele acarrear un coste computacional elevado que puede llegar a ser innecesario en muchos casos. Para darse cuenta de hasta qué punto es necesario afinar la malla se recomienda realizar un análisis de sensibilidad del mallado, el cual consiste en evaluar los resultados de distintos problemas resueltos con mallas a precisiones diferentes y ver hasta qué punto es necesario seguir afinando o no en función de la variación en los resultados obtenidos.

El programa *ANSYS* provee de una serie de indicadores de calidad del mallado que pueden resultar muy útiles para escoger entre diferentes maneras de mallar una misma geometría. Los indicadores más relevantes son:

- **Orthogonal Quality:** La calidad ortogonal de los subdominios se calcula utilizando el vector normal de la cara, el vector desde el centroide del subdominio hasta el centroide de cada una de los subdominios adyacentes, y el vector desde el centroide del subdominio hasta cada una de las caras. El rango de la calidad ortogonal es de 0 a 1, donde 0 es el peor valor y 1 es el mejor.
- **Skewness:** la oblicuidad es una de las principales medidas de calidad para una malla. La oblicuidad determina qué tan cerca del ideal (es decir, equilátero o equiangular) una cara o celda es. El rango de la calidad ortogonal es de 0 a 1, donde 1 es el peor valor y 0 es el mejor.

3.3.2.1. Técnicas de mallado

El mallado es una parte crítica en la resolución de un problema de *CFD*, es por ello que los *software* de mallado cuentan con una serie de métodos que ayudan al usuario a discretizar la geometría de la forma más apropiada posible. Puesto a que esta disciplina es muy extensa, en este apartado sólo se detallarán aquellos métodos de mallado necesarios para comprender la parte práctica del trabajo.

- *Sizing* es un método de mallado que permite controlar las dimensiones de los elementos del mallado. Puede aplicarse a todo el mallado o a zonas específicas que requieran un mayor grado de discretización del espacio.
- *Inflation* es un método que permite generar un gran número de elementos cuadráticos o hexaédricos muy cerca de superficies de interés. Normalmente este método se usa en las partes sólidas de interés del problema para poder capturar de forma precisa la física que se da en regiones de interacción líquido sólido, véase el apartado 3.1.6 que trata sobre la capa límite.

3.3.3. Elección del modelo físico

Los problemas que involucran a flujos fluidos pueden tener naturalezas muy distintas, tan es así que existen diferentes modelos físicos para abordarlos, es decir, diferentes maneras de aplicar las ecuaciones de gobierno de los fluidos (conservación de masa, momentum y energía) con el fin reducir el coste computacional y aumentar la precisión en los resultados. Cada uno de los diferentes modelos se aproxima a la realidad de una forma distinta, con diferentes simplificaciones o herramientas matemáticas, lo que hace que la elección del modelo físico a usar sea también un aspecto fundamental y crítico a la hora de afrontar un problema de *CFD*, sobre todo si el flujo a tratar es un flujo turbulento.

Para los flujos turbulentos, el rango de escalas de longitud y la complejidad de los fenómenos implicados en la turbulencia hacen que la mayoría de los enfoques de modelado sean prohibitivamente caros; la resolución requerida para resolver a todas las escalas involucradas en la turbulencia está más allá de lo que es computacionalmente posible. El enfoque principal en tales casos es crear modelos numéricos para aproximar los fenómenos no resueltos. Puesto a que el modelado de la turbulencia es un aspecto abarcado en la parte práctica del trabajo y siendo la disciplina de modelado físico muy extensa, en este apartado solo se detallaran ciertos aspectos del modelado de la turbulencia necesarios para entender el marco práctico del trabajo.

3.3.3.1. Modelo Volume of Fluid

Antes de exponer los modelos matemáticos para tratar la turbulencia de los fluidos de forma computacional se expone el modelo *Volume of Fluid*.

El modelo *VOF* puede modelar dos o más fluidos inmiscibles resolviendo un solo conjunto de ecuaciones de momento y rastreando la fracción de volumen de cada uno de los fluidos a lo largo del dominio. Las aplicaciones típicas incluyen la predicción del *jet breakup* (desintegración de un líquido o gas debido a los esfuerzos turbulentos), del movimiento de grandes burbujas en un líquido, del movimiento del líquido después de una ruptura de una presa y el seguimiento constante o transitorio de cualquier interfaz líquido-gas. Pertenece a la clase de métodos eulerianos que se caracterizan por una malla que es estacionaria o se mueve de una determinada manera prescrita para adaptarse a la forma evolutiva de la interfaz. Como tal, *Volume of Fluid* es un esquema de advección cuya idea fundamental es usar una función discreta que represente el volumen de uno de los fluidos en el volumen de control. Esta función de presencia, denotada α_q , varía entre 0 y 1 para la fase considerada. Si es 0 o 1, el volumen contiene solo uno de los dos fluidos. Si su valor está entre estos dos terminales, el volumen contiene una mezcla bifásica y, por lo tanto, la interfaz está presente [54].

0,95	0,8	0,3	0	0
1	1	1	0,6	0
1	1	1	1	0,3
1	1	1	1	0,8
1	1	1	1	0,95

Figura 29 Ejemplo de tasa de presencia de fluido azul en un volumen de control [54].

La ley de conservación de la masa se aplica para cada una de las fases que intervienen en el modelo VOF, por ejemplo, para la fase q^{th} la ecuación tiene la siguiente forma:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (67)$$

Donde:

- \dot{m}_{qp} es la transferencia de masa de la fase q a la fase p .
- \dot{m}_{pq} es la transferencia de masa de la fase p a la fase q .
- S_{α_q} es un término que representa una fuente de masa para cada fase y que por defecto vale cero.
- α_q es la fracción de volumen de fase primaria.

La ecuación de fracción de volumen no se resolverá para la fase primaria sino que la fracción de volumen de fase primaria se computará en función de la siguiente restricción:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (68)$$

Las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el movimiento del flujo deben resolverse por separado (véase apartado 3.3.3.2).

En relación a las propiedades físicas del fluido en un volumen de control para un sistema de múltiples fluidos, la densidad de la mezcla se escribe de forma natural ponderando las densidades de cada una de las fases por sus tasas de presencia [54]:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (69)$$

Para la viscosidad de la mezcla, usando también las tasas de presencia α_q como coeficientes, se tiene:

$$\mu = \frac{\sum \alpha_q \rho_q \mu_q}{\sum \alpha_q \rho_q} \quad (70)$$

3.3.3.2. Ecuaciones de Reynolds-Averaged Navier-Stokes

También denominadas ecuaciones o modelos *RANS*, ofrecen el enfoque computacionalmente más económico para el cálculo de flujos turbulentos complejos. Los ejemplos más típicos de tales modelos son los modelos k-epsilon y k-omega.

Los modelos *RANS* son adecuados para muchas aplicaciones de ingeniería y generalmente brindan el nivel de precisión requerido. Como ninguno de los modelos es universal, debe decidir qué modelo es el más adecuado para una aplicación determinada.

El problema en los flujos turbulentos es que las variables de interés, velocidad y presión, fluctúan en una escala muy pequeña de tiempo lo que hace computacionalmente imposible poder resolver un problema tratando cada una de dichas variaciones. Los modelos *RANS* se fundamentan en aplicar la descomposición de Reynolds a dichas variables, consistente en descomponer las cantidades de flujo turbulento en componentes promedio y fluctuante.

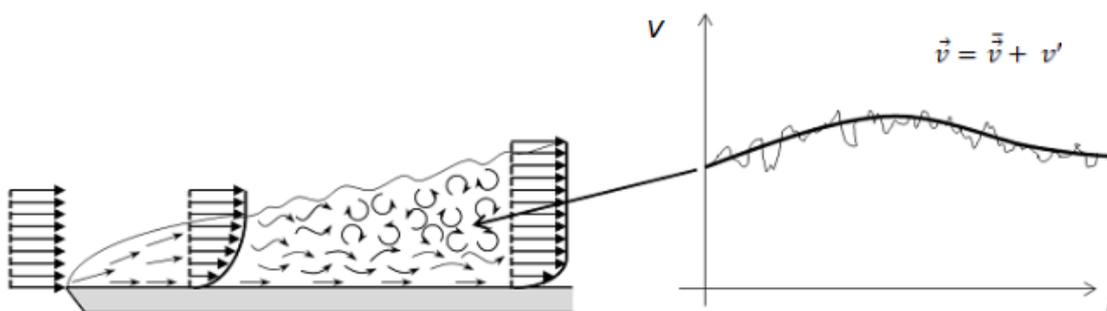


Figura 30 Representación de la velocidad como variable cambiante en el tiempo cuando se dan flujos turbulentos y su descomposición de Reynolds [27].

La velocidad de flujo promediada en el tiempo de la descomposición de Reynolds se define de la siguiente manera:

$$\bar{\vec{v}}(\vec{r}) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \vec{v}(\vec{r}, t) dt \right) \quad [m/s] \quad (71)$$

Así la velocidad total puede escribirse de la siguiente manera:

$$\vec{v} = \bar{\vec{v}} + v' \quad [m/s] \quad (72)$$

Dónde:

- \vec{v} es la velocidad total [m/s].
- $\bar{\vec{v}}$ es la velocidad de flujo promediada en el tiempo [m/s].
- v' es la componente fluctuante de la velocidad [m/s].

Similarmente para la presión:

$$P = \bar{P} + P' \quad [Pa] \quad (73)$$

En los modelos *RANS*, a las ecuaciones de gobierno de los fluidos en forma diferencial; conservación de la masa (1), conservación del momentum (8) y conservación de la energía (21); se les aplica la descomposición de Reynolds con la finalidad de expresarlas de la manera que sigue (la variable α_q es la fracción de volumen de la fase q en la celda donde se apliquen las ecuaciones):

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (74)$$

$$\frac{\partial (\alpha_q \bar{\rho} \bar{\vec{v}})}{\partial t} + \bar{\rho} (\alpha_q \bar{\vec{v}} \cdot \nabla) \bar{\vec{v}} = -\nabla \alpha_q \bar{P} + \mu \nabla \cdot (\nabla \alpha_q \bar{\vec{v}} + \nabla \alpha_q \bar{\vec{v}}^T) - \frac{2}{3} \mu \nabla (\nabla \cdot \alpha_q \bar{\vec{v}}) + TT1 \quad (75)$$

$$\bar{\rho} (\alpha_q \bar{\vec{v}} \cdot \nabla) (Cv \cdot \bar{T}) = \alpha_q k \nabla^2 \bar{T} - \bar{P} (\nabla \cdot \alpha_q \bar{\vec{v}}) + \alpha_q \mu \bar{\xi} + \text{Términos Turbulentos 2} \quad (76)$$

Las ecuaciones (74), (75) y (76) corresponden respectivamente a la ley de conservación de masa, momentum y energía expresadas utilizando las componentes promediadas de las variables físicas afectadas por la turbulencia por un lado y por otro lado generando dos incógnitas “*TT1*” (*términos turbulentos1*) y “*Términos Turbulentos 2*” que dependen de las componentes fluctuantes de las variables de interés. Estos dos términos incógnita que nos aparecen deben ser calculados a partir de la información relativa a las fluctuaciones debidas a la turbulencia.

A partir de este escenario aparecen distintos modelos de turbulencia en función de cómo se decidan tratar estos términos turbulentos. Los más típicos y más utilizados en el campo de la ingeniería son los ya citados k-epsilon y k-omega.

3.3.3.3. Modelo k-epsilon

Este modelo plantea dos variables que dan información sobre la turbulencia de los flujos y a través de las cuales se calculan los términos turbulentos de las ecuaciones (75) y (76). Estas variables son la energía cinética turbulenta, k , y la tasa de disipación de energía cinética, ϵ . En los modelos de dos ecuaciones, dichas variables precisan de dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo, una para k y la otra para ϵ , cerrando así el sistema de ecuaciones.

En la dinámica de fluidos, la energía cinética de la turbulencia (k) es la energía cinética media por unidad de masa asociada a los remolinos en el flujo turbulento. Físicamente, la energía cinética de la turbulencia se caracteriza por fluctuaciones de la velocidad media cuadrática. En las ecuaciones de *Navier-Stokes* promediadas por Reynolds, la energía cinética de la turbulencia se puede calcular basándose en el método de cierre, es decir, un modelo de turbulencia. Generalmente, la energía cinética de la turbulencia se puede cuantificar por la media de las tensiones normales de turbulencia:

$$k = \frac{1}{2} (\overline{(u')^2} + \overline{(v')^2} + \overline{(w')^2}) \quad \left[\frac{J}{Kg} \right] \quad (77)$$

Por otra parte, la disipación de la turbulencia (ϵ) es la velocidad a la que la energía cinética de la turbulencia se convierte en energía interna térmica. En la forma general se expresa como sigue:

$$\epsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad \left[\frac{J}{Kg \cdot s} \right] \quad (78)$$

El modelo k-epsilon ofrece una buena convergencia y no requiere mucha memoria. Por su formulación y definición, el modelo se usa típicamente para flujos externos con geometría compleja. Sin embargo, también es un buen modelo de propósito general [29].

Las limitaciones del modelo incluyen:

- No trabaja bien si se dan gradientes de presión adversos.
- No da buenos resultados si la geometría presenta curvaturas pronunciadas.
- Dificultad de resolución de la ecuación para ϵ .

Una cosa a recalcar en este modelo es que usa *wall functions* o funciones de pared para tener en cuenta analíticamente la velocidad del fluido en la subcapa límite laminar cerca de la pared (véase *Figura 6*).

Las *wall functions* suponen una aproximación matemática para el tratamiento de las variables de interés en aquellas zonas de interacción fluido-sólido con el fin de reducir mucho el coste computacional afectando poco a la precisión de los resultados. Las funciones de pared o *wall functions* calculan analíticamente una velocidad de fluido distinta de cero en la pared. Suponen una solución analítica para el flujo en la capa viscosa y los modelos resultantes tendrán requisitos computacionales significativamente menores. Este es un enfoque muy útil para muchas aplicaciones de ingeniería.

Por el hecho de simplificar el tratamiento del problema en aquellas zonas cercanas al sólido, si el modelo físico que se utiliza presenta *wall functions*, los requisitos de mallado y su intensidad pueden relajarse en dichas zonas, lo que se traduce en ahorro de tiempo al computar la solución. La pregunta es: ¿Hasta qué punto se puede relajar el mallado en dichas zonas para un correcto funcionamiento del modelo? Para poder cuantificar la distancia necesaria desde cualquier pared sólida del sistema con el primer nodo de fluido para los distintos modelos de turbulencia existe el parámetro *y-plus*.

El *y-plus* representa la distancia normalizada y adimensional necesaria para que el modelo de turbulencia trate correctamente las interacciones entre fluido y sólido. Es independiente de la malla, depende solo a la naturaleza del flujo y se calcula de la siguiente manera:

$$y^+ = \frac{v_f \cdot y_w}{\nu} \quad (79)$$

Dónde:

- y^+ es el valor adimensional de *y-plus*.
- v_f es la velocidad característica de un problema de interacción líquido-sólido denominada velocidad de fricción [m/s].
- y_w es la distancia entre el primer nodo de la malla y la pared más cercana [m].
- ν es la viscosidad cinemática [m²/s].

Tal y como se aprecia en la ecuación (79), cuanto mayor sea la velocidad del fluido y cuanto mayor sea la distancia entre la pared y el primer nodo de la malla mayor será el valor de *y-plus*. Las simulaciones que se lleven a cabo haciendo uso de modelos k-epsilon, como utilizan funciones de pared, requieren de valores de *y-plus* que oscilen entre 100 y 200, mientras que otros modelos físicos que no implementen *wall-functions* precisaran valores de *y-plus* cercanos a 1 para poder considerar los resultados como fiables, lo que claramente repercutirá en un mayor número de elementos en la malla ya que para disminuir el valor de

y -plus debe disminuirse también el valor de y_w . Dándole la vuelta al problema, si el usuario decide el modelo físico que va a implementar y sabe que valores de y -plus requiere dicho modelo para que los resultados sean fiables, atendiéndose a la expresión (79) y estimando o calculando el parámetro de velocidad de fricción, el usuario obtiene una buena idea de la distancia que debe existir entre el primer nodo de la malla y la pared más cercana. De esta manera el usuario puede aplicar métodos de mallado como el *inflation* (véase apartado 3.3.2.1) de tal manera que el mallado que se obtenga sea lo más adecuado posible al modelo físico que se quiere utilizar para el tratamiento de la turbulencia y su interacción con las paredes del sistema.

3.3.3.4. Modelo k-omega

Es el otro modelo popular de dos ecuaciones combina la energía cinética turbulenta k con la tasa específica de disipación de energía cinética omega ω . El objetivo con el que nace el modelo estándar k-omega es el de modelar las interacciones cercanas a la pared con mayor precisión que el modelo k-epsilon, el cual usa las *wall functions*. Así pues el modelo k-omega no utiliza *wall-functions* por lo que precisa de valores de y -plus cercanos a 1 para poder tratar correctamente los fenómenos turbulentos cercanos a la pared.

Las limitaciones más destacadas del modelo son:

- Dificultad de convergencia comparado con el modelo k-epsilon.
- Mucha sensibilidad a las condiciones iniciales.
- Malas predicciones en zonas alejadas a la pared en comparación a k-epsilon.

3.3.3.5. K-omega SST

El modelo K-omega SST es una mejora del modelo k-omega original y aborda algunos defectos específicos del modelo base, como la sensibilidad a los niveles de turbulencia de la corriente libre (lejos de la pared). Presenta características intermedias entre los modelos k-epsilon y k-omega convencionales ya que puede aplicar *wall functions* en aquellas zonas que lo requieran o no aplicarlas si no es necesario (en función de la distancia entre el primer nodo de la malla y la pared). Es una opción de uso bastante concurrente en el ámbito ingenieril para abordar problemas de *CFD*. Para un buen tratamiento de la turbulencia lo idóneo sería que los valores de y -plus no sean superiores a 10.

3.3.3.6. Large Eddy Simulation (LES) y Direct Numerical Simulation (DNS)

Large Eddy Simulation (LES) es un modelo matemático para la turbulencia utilizado en la dinámica de fluidos computacional. Inicialmente fue propuesto en 1963 por Joseph Smagorinsky para simular las corrientes de aire atmosféricas pero se aplica actualmente en una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería, incluida la combustión, acústica, y simulaciones de la capa límite atmosférica [55].

La simulación de flujos turbulentos resolviendo numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes requiere la resolución de un rango muy amplio de escalas de tiempo y longitud, todas las cuales afectan al campo de flujo. Tal resolución se puede lograr con simulación numérica directa (*DNS*), pero los modelos *DNS* son computacionalmente costosos, y su costo prohíbe la simulación de sistemas de ingeniería prácticos con geometría compleja o configuraciones de flujo tales como chorros turbulentos, bombas, vehículos o trenes de aterrizaje.

La idea principal detrás del modelo *LES* es reducir el costo computacional al ignorar las escalas de longitud más pequeñas, que son las más costosas de resolver computacionalmente, mediante el filtrado de paso bajo de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dicho filtrado de paso bajo, que puede verse como un promedio temporal y espacial, elimina de manera efectiva la información a pequeña escala de la solución numérica. Esta información no es irrelevante, y su efecto en el campo de flujo debe ser modelado, una tarea que es un área activa de investigación para problemas en los que las escalas pequeñas pueden jugar un papel importante, como flujos cercanos a la pared, flujos de reacción, y flujos multifásicos.

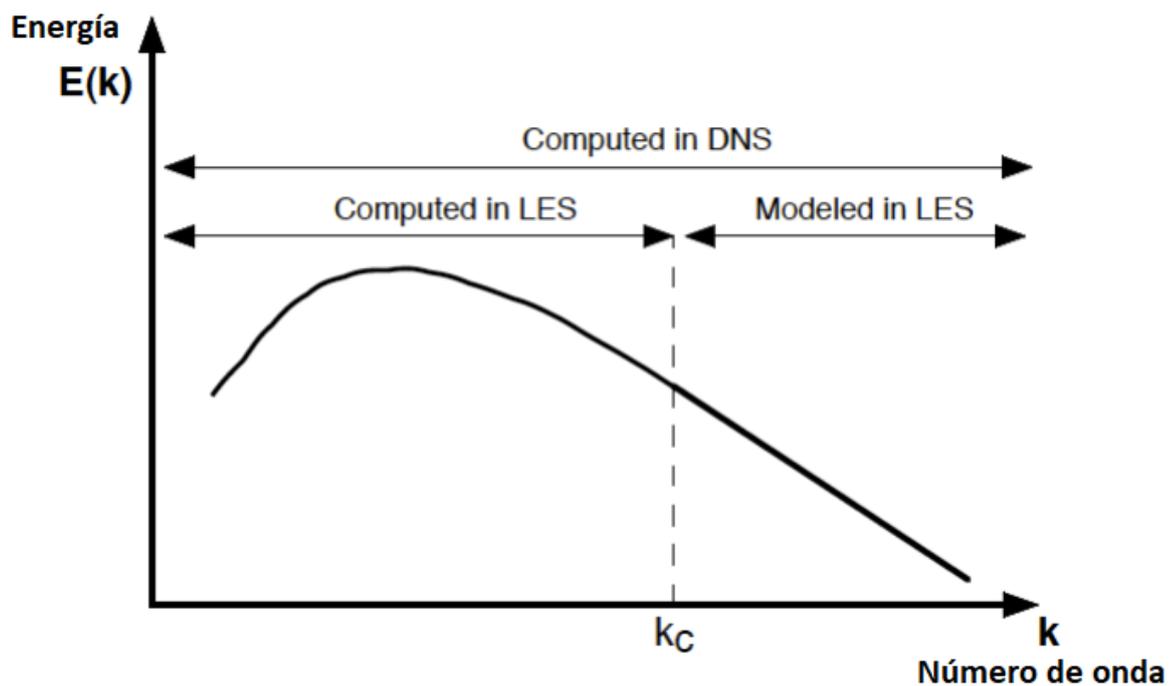


Figura 31 Representación gráfica del marco de actuación de los modelos RANS, LES y DNS en función de la escala de longitud [56].

Las ecuaciones gobernantes del modelo *LES* se obtienen filtrando las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el campo de flujo. Existen diferencias entre las ecuaciones de gobierno del modelo *LES* para flujos incompresibles y compresibles, que conducen a la definición de una nueva operación de filtrado. Para el flujo incompresible, la ecuación de continuidad y las ecuaciones de *Navier-Stokes* se filtran, produciendo la ecuación de continuidad incompresible filtrada y las ecuaciones filtradas de *Navier-Stokes*:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (80)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + 2\nu \frac{\partial}{\partial x_j} S_{ij} \quad (81)$$

Donde:

- \bar{p} es el campo de presiones filtrado [Pa].
- S_{ij} es el tensor velocidad de deformación.

3.3.4. Definición de las condiciones de contorno

El dominio del problema de *CFD* es limitado y por ello es preciso definir cómo se comporta el mismo en su frontera. Por condiciones de contorno se entienden aquellas condiciones que definen el comportamiento del modelo en sus límites. En otras palabras, las condiciones de contorno que se imponen en un recinto establecen las condiciones de masa, momentum y energía en las fronteras del recinto. Las hay de varios tipos, se destacan [30]:

- *Velocity inlet* se utiliza para definir las propiedades de velocidad y escalares del flujo en los límites de entrada.
- *Pressure inlet* se usa para definir la presión total y otras cantidades escalares en las entradas de flujo.
- *Outflow* se usa para modelar salidas de flujo donde los detalles de la velocidad y presión del flujo no se conocen antes de la solución del problema de flujo. Son apropiados cuando el flujo de salida está cerca de una condición totalmente desarrollada, ya que la condición de límite de flujo asume un gradiente de flujo cero para todas las variables de flujo, excepto la presión. No son apropiados para cálculos de flujo compresible.
- *Pressure outlet* se usa para definir la presión estática en las salidas de flujo (y también otras variables escalares, en caso de flujo inverso). El uso de una condición de límite de salida de presión en lugar de una condición de flujo de salida a menudo da como resultado una mejor tasa de convergencia cuando se produce flujo de retorno durante la iteración.
- *Wall* se usa para separar regiones de sólidos de regiones fluidos. Las paredes pueden ser estacionaras o móviles, en este último caso se les suele denominar *moving walls*.
- *Symetry*: se usa para reducir la extensión del modelo computacional a una subsección simétrica del sistema físico general.

3.3.4.1. *Velocity inlet* para la generación de olas

Uno de los pasos más característicos en el *setup* de un problema de *CFD* que use olas en su modelo es la configuración necesaria para generar las mismas. La configuración de dichos fenómenos se realiza cuando se establece la condición de contorno de *velocity inlet*. Particularmente, para el *software Fluent*, debe editarse la condición de contorno de *velocity inlet* indicando que lo que entra en el dominio son efectivamente olas y no otro tipo de flujo.

En el menú de edición de la condición de contorno para la generación de olas, aparte de parámetros físicos de la ola como su velocidad media, su longitud de onda, su dirección respecto al dominio, la altura de la superficie libre en el dominio y la altura de la ola, debe

definirse también que modelo de olas se requiere utilizar (véase apartado 3.2.2). La Figura 13 denota que no todas las teorías pueden aplicarse en todas las condiciones, sino que cada teoría parte de unas hipótesis y realiza unos tratamientos matemáticos que la hacen apta para tratar ciertos tipos de olas. Es por ello que en el menú de edición de *velocity inlet* para la generación de olas se puede escoger entre diversas teorías de olas para su generación, como la teoría lineal, la de Stokes de segundo, tercero, cuarto, quinto orden y la Cnoidal en diversos ordenes. El *software* también tiene la posibilidad de generar olas a partir de su descripción espectral (véase apartado 3.2.2.4).

Existe un comando en el *software Fluent* que permite obtener información de si la ola que se desea generar a partir de los parámetros físicos definidos puede generarse a través de la teoría de olas escogida. En otras palabras, existe una forma rápida de saber si para la altura H , profundidad h y periodo T de la ola que se quiere generar se ha escogido la teoría de olas correcta para generarla según los límites de la propia teoría representados en la Figura 13. Dicho comando, que debe de introducirse en la ventana de diálogo de la interfaz del *software*, es el siguiente: `"//define/boundary-conditions/open-channel-wave-settings"`. En la misma interfaz del programa aparecerán una serie de parámetros de la ola que se quiere generar, en función de dichos parámetros el programa recomendará una de las siguientes acciones:

- En el mejor de los casos el programa indica que la ola que se desea generar se adecua a la teoría de olas que se ha escogido para generarla.
- Por lo contrario el programa indicará que la teoría de olas escogida no es apropiada para generar la ola que se desea y te propondrá otra teoría que si sería apropiada. Frente a esta situación puede cambiarse la teoría de olas por la propuesta por el programa o cambiar alguno de los parámetros de la ola que se desea generar para adecuarla a la teoría escogida en primera instancia. Para cada una de las dos acciones anteriores el programa ofrece la información necesaria para proceder correctamente.
- En el peor de los casos el programa indicará que la ola que pretendes generar no es apropiada para ninguna de las teorías de olas de las que dispone, situación en la cual el usuario se ve forzado a variar los parámetros físicos de la ola que desea generar.

La correspondencia de la ola que se desea generar con la teoría de olas adecuada para generarla es crucial para el cálculo de la solución. De no respetarse esta correspondencia del programa no podrá solucionar el problema de *CFD* por cuestiones de divergencia en el cómputo de la solución.

3.3.5. Computación de la solución

Las ecuaciones de gobierno pertenecientes al modelo escogido y que se han discretizado de forma algebraica en todo el dominio del problema son resueltas a partir de forma iterativa. Es preciso un cierto número de iteraciones para alcanzar una solución convergente, es decir, aquella situación en que de una iteración a otra el cambio sea despreciable y los residuales del método iterativo sean menospreciables. El tiempo de computación de cada iteración depende de la naturaleza del problema, del modelo físico escogido y fuertemente del número de elementos con los que se trabaja entre otros. El número de iteraciones necesarias depende también de la naturaleza del problema y de la precisión que se solicite sobre los residuales del método iterativo, pudiéndose dar el caso de no llegar nunca a converger a una solución. Esta última situación de divergencia a la hora de computar la solución puede venir dada por errores en cualquiera de los pasos que se dan en los problemas de *CFD*, desde a una mala definición del mallado a una errónea elección del modelo pasando por una mala definición de las condiciones frontera entre otros.

Si consideramos las ecuaciones de gobierno en forma discretizada, estas muestran una dependencia de la velocidad con la presión y viceversa. Esta dependencia de variables entre ecuaciones se denomina dependencia de presión y velocidad, del inglés, *velocity-pressure coupling*. Atendiendo a su complejidad de resolución, se requiere un tratamiento especial para el fenómeno *velocity-pressure coupling*. Existen varios métodos diferentes para tratar este acontecimiento, algunos de ellos son:

- *SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)*
- *SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations-Consistent)*
- *PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators)*

El método *SIMPLE* es el primer método utilizado para resolver las ecuaciones de conservación en forma discretizada. Por defecto el *solver* del programa *ANSYS* utiliza este método. El método *SIMPLE* para casar presión y velocidad consta de simplificaciones de términos en las ecuaciones de conservación y de una corrección de presión y una corrección de velocidad de la siguiente forma:

- Una aproximación del campo de velocidad se obtiene al resolver la ecuación de conservación del momento. El término de gradiente de presión se calcula utilizando la distribución de presión de la iteración anterior o una suposición inicial.
- La ecuación de presión se formula y se resuelve para obtener la nueva distribución de presión.
- Las velocidades se corrigen y se calcula un nuevo conjunto de flujos conservativos.

El método *SIMPLEC* es una forma modificada del algoritmo *SIMPLE* y también es de uso

muy común. Su eficacia a la hora de converger a una solución se estima de un 20-30% superior a la del algoritmo *SIMPLE*. El método *SIMPLEC* para casar presión y velocidad también consta de una corrección de presión y una corrección de velocidad pero a diferencia del método *SIMPLE* no se realizan simplificaciones de ningún término en las ecuaciones de conservación.

EL algoritmo *PISO* es muy recomendable para todos los cálculos de flujo transitorio, especialmente cuando desea utilizar un paso de tiempo grande. Generalmente ofrece resultados más estables y acarrea menos coste computacional. El método *Piso* para casar presión y velocidad consta de dos correcciones de presión y dos correcciones de velocidad a diferencia de los métodos *SIMPLE* y *SIMPLEC*. Pese a que este método fue inventado para flujos compresibles hoy en día puede aplicarse también a flujos incompresibles. La siguiente figura muestra el desempeño del algoritmo:

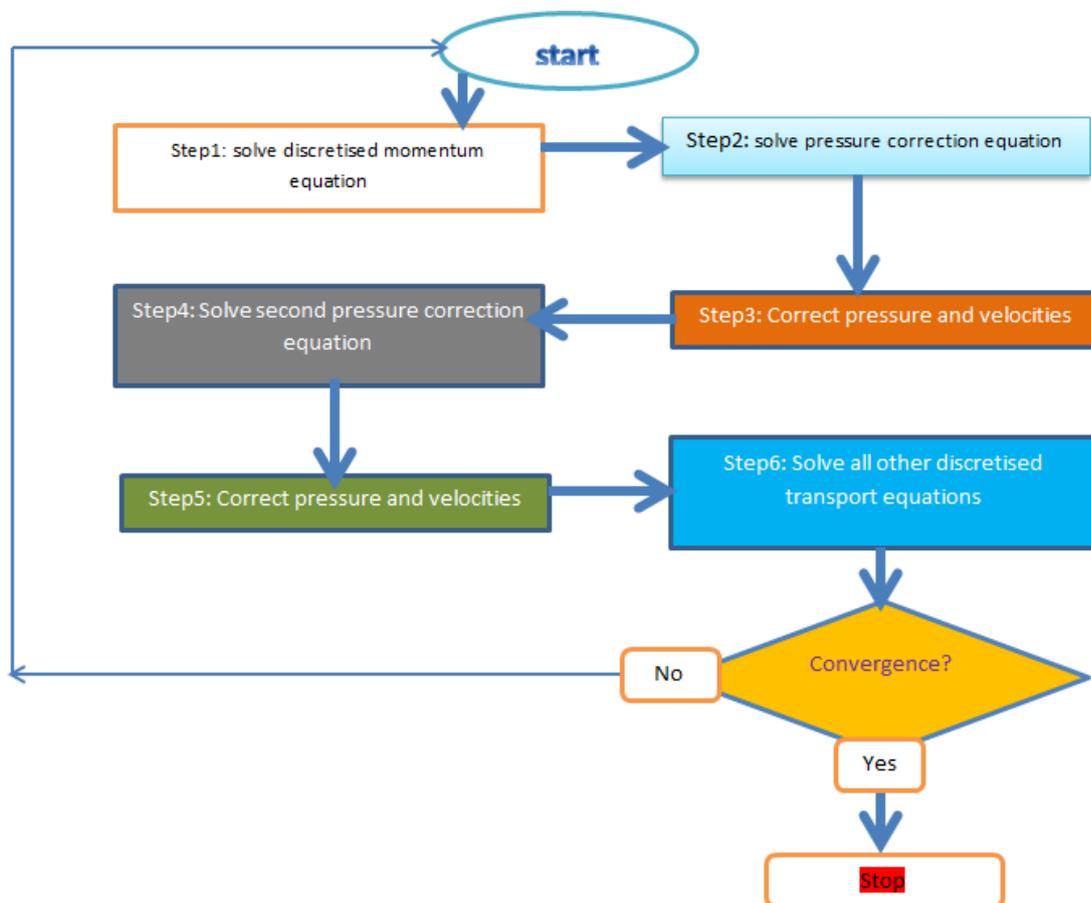


Figura 32 Diagrama de flujo del algoritmo *PISO* [32].

Otros parámetros que deben ser definidos en la configuración del *solver* son el número de

que se quieren llevar a cabo y el criterio de convergencia de los residuales, que indica a partir de qué momento una solución ha convergido y ya no es necesario seguir iterando

Por último, las simulaciones de *CFD* pueden abarcarse desde el punto de vista estacionario o transitorio en función de la naturaleza del problema a tratar. Sea de un tipo o de otro, todo problema de *CFD* debe inicializar sus variables previamente de empezar a iterar la solución, pero sólo si la simulación es en régimen transitorio, deben definirse además de todo lo expuesto el intervalo temporal entre pasos de tiempo y el número de pasos de tiempo a calcular. En el caso transitorio el *solver* calculará tantas soluciones como pasos de tiempo se hayan especificado, ocupando para cada solución o paso de tiempo el número de iteraciones que se definan si no es que la solución converge antes por el criterio de convergencia de los residuales. El intervalo temporal entre pasos de tiempo es un parámetro crítico para la convergencia de las soluciones. El manual de *ANSYS* sugiere que un intervalo de tiempo adecuado es aquel que permite que las soluciones a cada paso de tiempo converjan tras 20 iteraciones, siendo el número de iteraciones mucho mayor en los primeros pasos. Una manera de estimar el intervalo temporal entre pasos de tiempo es a través del número de *Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)*. La condición de *Courant-Friedrichs-Lewy* es una condición necesaria para la convergencia de los problemas de *CFD* puesto que está relacionada con el término conectivo en las ecuaciones de gobierno. Para un caso unidimensional la condición de *Courant-Friedrichs-Lewy* se expresa de la siguiente forma:

$$CFL = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} \leq CFL_{max} \quad (82)$$

Dónde:

- u es la velocidad [m/s].
- Δt es el intervalo entre pasos de tiempo [s].
- Δx longitud de una celda de la malla [m].

El número de *Courant-Friedrichs-Lewy* es una medida de qué tan rápido atraviesa la información (u) una celda de cuadrícula computacional (Δx) en un intervalo de paso de tiempo dado (Δt). El valor de CFL_{max} típicamente utilizado en la mayoría de *solvers* es 1, de esta manera, sabiendo o estimando la velocidad u y sabiendo la longitud de una celda de la malla Δx , se puede estimar un valor de intervalo de paso de tiempo idóneo para computar la solución.

3.3.6. Post-procesado y visualización de los resultados

El último paso en un problema de *CFD* es el denominado post-procesado y constituye el

momento en el cual el usuario puede visualizar los resultados de la simulación.

Dentro de la información que el usuario puede solicitar se encuentran un gran número de variables físicas de interés para los problemas de fluido-dinámica como lo son la presión, la velocidad o los esfuerzos cortantes entre muchas otras. También son muy variados la cantidad de métodos o formas de visualizar dichas variables, como lo son los gráficos de contornos, los gráficos de vectores o los *renders*.

Como particularidad a destacar, en las simulaciones en régimen transitorio se dispone de soluciones en distintos instantes de tiempo que pueden ser sustraídas de forma compacta en un clip si se desea. En estos casos, la cantidad de información que se desea visualizar, tanto qué variables se desea sustraer de la simulación como cuántos instantes de tiempo deben transcurrir para que se almacene la información de dichas variables, son parámetros que deben especificarse en el *setup* del problema. Esto responde a un criterio de eficiencia en el almacenaje, puesto que los intervalos temporales entre pasos de tiempo pueden ser de orden muy bajo y no resulta informativo obtener datos de las variables en cada uno de dichos pasos si no existen cambios significativos entre ellas. Por el mismo motivo también pueden seleccionarse cuáles son las variables de interés que posteriormente uno desea visualizar en el post-procesado.

4. Marco Práctico

El marco práctico de este trabajo está enfocado a la optimización y reformulación del modelo de bomba de agua marina propuesto por Eliecer Cabrera Fernández, para mejorar el rendimiento del dispositivo y verificar su funcionamiento en el lugar de instalación. Para tal fin se emplea la mecánica de fluidos computacional (*CFD*) a través del aplicativo *Fluent* ejecutable a partir del software *ANSYS 18.1*. De forma más específica, el marco práctico de este trabajo consta de los siguientes apartados:

- Descripción del problema y de los objetivos del proyecto.
- Estudio y análisis del histórico de sistemas undimotrices para la generación de energía.
- Revisión y evaluación de la memoria y propuestas de mejora de Eliecer Cabrera Fernández sobre el sistema de bombeo con energía undimotriz escogido para los objetivos del proyecto.
- Realizar una evaluación de la ubicación dónde se instalará el dispositivo a partir de información pública y inspección directa.
- Desarrollo, optimización y análisis mediante *CFD* de distintos modelos del dispositivo con el fin de verificar el funcionamiento del dispositivo en el lugar de instalación y poder encontrar un modelo con un funcionamiento óptimo.
- Presentar los progresos y resultados del modelo a escala real desarrollado por Philipp Englisch.
- Recomendaciones y proposiciones de un nuevos modelos de dispositivos undimotrices.

4.1. Descripción del problema y de los objetivos del proyecto

El proyecto *Dragón de Mar* nace de la necesidad de abastecer de agua a aquellas viviendas o lugares cercanos al mar que no disponen de conectividad con una red de agua ya sea porque pertenecen a poblaciones con un muy bajo nivel económico o porqué se encuentran lejos de los núcleos urbanos.

Para el desarrollo del proyecto la localización escogida es la punta de Curaumilla, a las afueras de Laguna Verde, provincia de Valparaíso, V Región de Chile (33°05'37.5"S 71°43'18.4"W). En esta ubicación no sólo existen un gran número de viviendas cercanas al mar sin posibilidad de conectarse a una red de agua, sino que también hay una granja marina que precisa de grandes cantidades de agua salada para su funcionamiento. Por el momento la granja marina utiliza una bomba de agua para bombear agua de mar a las piscinas que precisa para su funcionamiento, lo cual añade un gran coste al producto que se

termina vendiendo a la comunidad.

Con el afán de diseñar y construir un dispositivo que bombee agua a coste cero, en el marco del proyecto se pretende poder llegar a abastecer las piscinas de la granja marina, las cuales se encuentran a diferentes alturas y tienen distintas capacidades, dejando una configuración del problema como la siguiente:

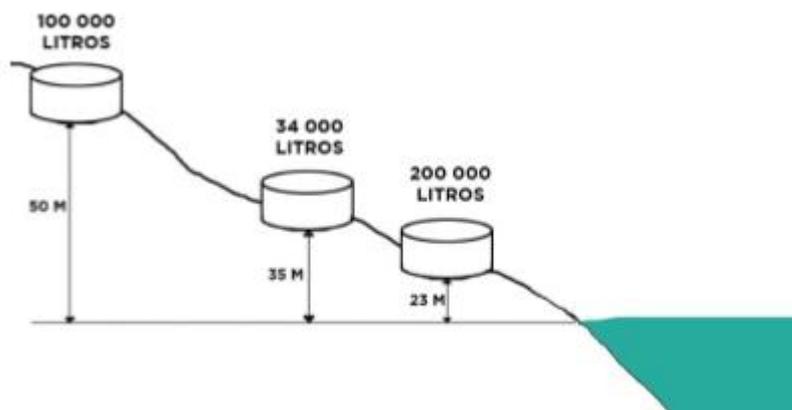


Figura 33 Esquema de la configuración de piscinas en la granja marina [32].

El dispositivo a diseñar e instalar tiene como objetivo el poder llegar a bombear agua del mar a las distintas piscinas que conforman la granja. Así pues el proyecto *Dragón de Mar* toma como referencia las piscinas de la granja marina para su objetivo principal. Posteriormente el uso del dispositivo debería de extenderse a poder facilitar agua sanitaria a las viviendas que lo precisen, lo cual debería hacerse a través de sistemas desalinizadores, problemática que no se trata en este documento porque no se encuentra en el alcance del trabajo. De forma concreta, y para el cumplimiento del objetivo global del proyecto *Dragón de Mar* esquematizado en la Figura 30, este trabajo en particular presenta los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar y analizar los sistemas existentes de bombeo de agua de mar funcionando con energía undimotriz.
- Seleccionar del sistema más adecuado para la costa de la punta Curaumilla con vista a la instalación de un prototipo.
- Optimizar la geometría del sistema elegido vía modelación numérica con el software Ansys-Fluent.
- Proponer un nuevo modelo de bomba de agua de mar funcionando con la energía de las olas.

4.2. Estudio y análisis del histórico de sistemas undimotrices para la generación de energía

La energía proveniente de las olas es una forma de energía renovable muy poco explotada y a día de hoy aún en fase de desarrollo. Por el momento la mayoría de dispositivos undimotrices existentes o en fase de desarrollo se han diseñado con la finalidad de, o bien producir energía eléctrica, o bien bombear directamente agua. En este apartado se presentan las tecnologías undimotrices existentes más relevantes, tanto para la generación eléctrica como para el bombeo de agua, con el fin de comprender qué tipo de formas existen hoy en día para sustraer la energía de las olas.

4.2.1. Dispositivos undimotrices para la generación de electricidad

En este subapartado se presentan las tecnologías más relevantes para la generación de electricidad a partir de energía undimotriz.

4.2.1.1. Sistemas con columna de agua oscilante

Los sistemas de columna de agua oscilante presentan una estructura apoyada en la costa que contiene una cámara de aire gracias al sello hidráulico que la misma estructura realiza con la superficie libre del agua del mar. El movimiento oscilatorio de las olas provoca que el aire del interior de la cámara entre también en movimiento y lo fuerza a través de una turbina para la generación de electricidad. Dicha generación de electricidad se genera en dos pasos: uno cuando la ola que entra en la estructura fuerza al aire de la columna a pasar por la turbina e incrementa la presión dentro de la columna, y segundo, cuando la ola que sale de la estructura hace que el aire vuelva a pasar por la turbina, debido a la disminución de la presión de aire en el lado del océano de la turbina, véase Figura 34. Para el correcto funcionamiento del sistema se precisa una turbina *Wells*, la cual gira siempre en la misma dirección independientemente de la dirección del flujo de fluido que genera su movimiento.

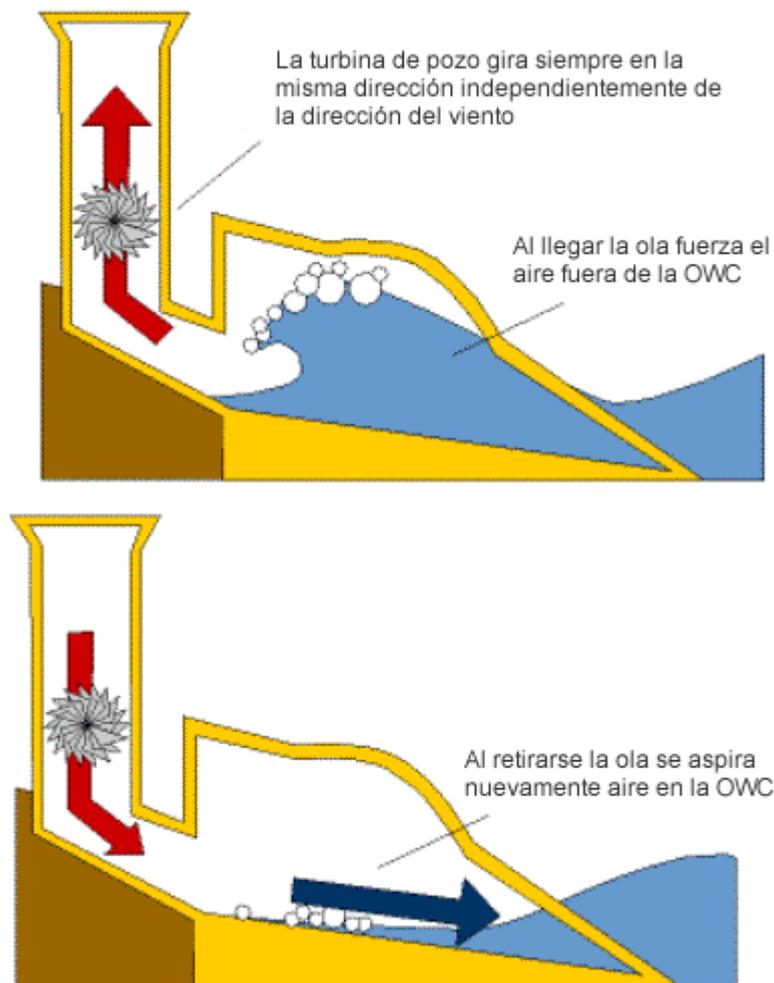


Figura 34 Esquema de funcionamiento de un sistema de columna de agua oscilante [34].

Hoy en día existen varios prototipos reales de estudio en los países europeos del norte con una potencia promedio de 250 Kw, la primera planta comercial con esta tecnología se encuentra en Mutriku, Euskadi y consta de 16 generadores. Esta tecnología es considerada estable y funcional, aunque los costos de las obras civiles encarecen los costos de inversión [35].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se pueden clasificar los sistemas undimotrices de columna de agua oscilante de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Columna agua oscilante</i>	Onshore apoyado	Terminador o totalizador	Diferencia de presión

Figura 35 Clasificación de los sistemas undimotrices de columna de agua oscilante. Elaboración propia.

4.2.1.2. Pelamis

El principio de diseño del sistema *Pelamis* es la resistencia a condiciones marinas adversas, lo cual es una problemática significativa en el funcionamiento de cualquier dispositivo undimotriz.

El dispositivo *Pelamis* consiste en una serie de secciones cilíndricas parcialmente sumergidas unidas a través de bisagras. El movimiento oscilatorio de las olas introduce un movimiento relativo entre dichas secciones cilíndricas activando así un sistema hidráulico que bombea aceite a presión a través de un sistema de motores hidráulicos. Los motores hidráulicos están acoplados a un generador eléctrico que es el responsable de generar electricidad. Se estima que cada sistema *Pelamis* es capaz de generar electricidad para 650 viviendas cada una con un consumo medio europeo, lo cual corresponde a una potencia promedio de 750 KW por dispositivo con un diámetro de 3,5 metros, un largo de 150 metros y un peso de 70 toneladas [37].



Figura 36 Modelos virtuales de dispositivos Pelamis [37].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el sistema undimotrices *Pelamis* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Pelamis</i>	Offshore flotante	Atenuador	Cuerpo flotante

Figura 37 Clasificación del sistema undimotriz *Pelamis*. Elaboración propia.

4.2.1.3. PowerBuoy

El sistema *PowerBuoy* consiste en una boya situada lejos de la costa que aprovecha el movimiento vertical y pendular de las olas para generar energía eléctrica. La energía mecánica que se desprende como combinación de ambos movimientos se traslada a una bomba hidráulica situada a la parte baja del cuerpo de la boya a través de un fluido que puede ser aceite. El acoplamiento de los motores hidráulicos con un generador eléctrico permite la generación de electricidad.

El dispositivo piloto desarrollado en Nueva Jersey, Estados Unidos, en el año 2002 tenía un diámetro de 5 m, una longitud de 14 m y era capaz de generar una potencia máxima de 50 KW [39].

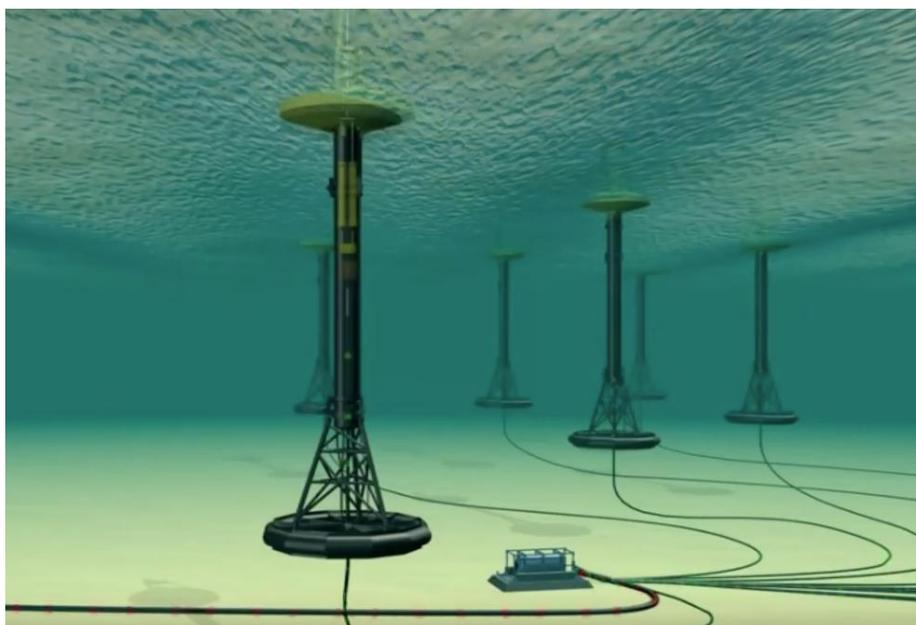


Figura 38 Modelos virtuales de sistemas *PowerBuoy* [39].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el sistema *PowerBuoy* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>PowerBuoy</i>	Offshore Flotante	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante

Figura 39 Clasificación del sistema undimotriz *PowerBuoy*. Elaboración propia.

4.2.1.4. WaveDragon

El sistema *WaveDragon* consiste en una estructura flotante situada lejos de la costa que esta elevada entre unos dos y tres metros del nivel del mar y que dispone de una rampa por dónde las olas rebosaran la estructura y dos brazos reflectores que enfocan las olas hacía la rampa. El agua que rebosa la estructura a través de la rampa se almacena en un reservorio con una única salida dónde se encuentran turbinas *Kaplan*, las cuales operan correctamente generando electricidad cuando grandes cabales de fluido a baja presión fuerzan su movimiento.

El proyecto piloto desarrollado en Nissum Bredning, Dinamarca, entre los años 2003 y 2005 tenía unas dimensiones de 58 x 33 m y generaba una potencia máxima de 20 KW.

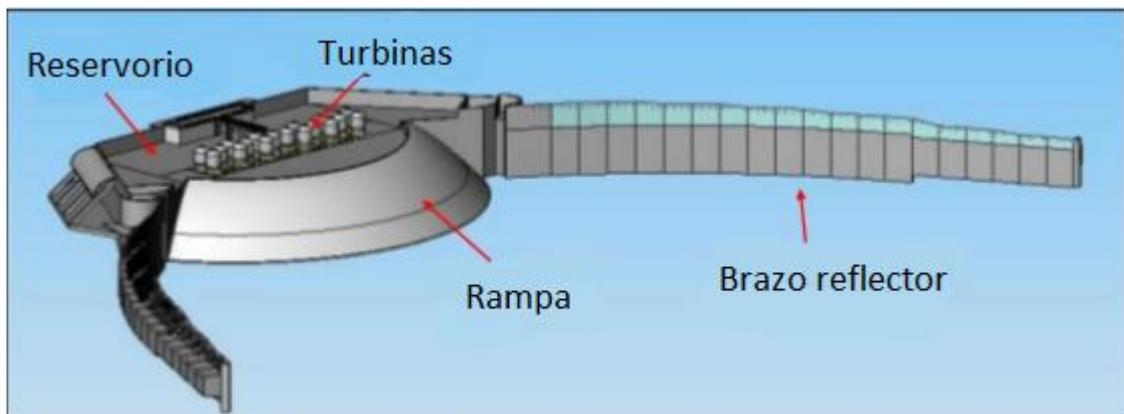


Figura 40 Esquema del dispositivo *WaveDragon* [40].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo *WaveDragon* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>WaveDragon</i>	Offshore flotante	Terminador o totalizador	Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Figura 41 Clasificación del sistema undimotriz *WaveDragon*. Elaboración propia.

4.2.1.5. Tapchan

El sistema de generación de energía eléctrica a partir de energía undimotriz *Tapchan* funciona de manera similar al dispositivo *WaveDragon* con la diferencia principal de que este se encuentra apoyado en la costa y no flotando en aguas profundas. El *Tapchan* utiliza el principio de rebosamiento para llenar un depósito de agua para su posterior turbinaje a través de una turbina *Kaplan*. Para conseguir el rebosamiento el *Tapchan* utiliza canal estrechado que convierte la energía cinética de la ola en energía potencial. Actualmente existe un modelo instalado en Noruega con una potencia máxima de generación eléctrica de 350 KW [35].

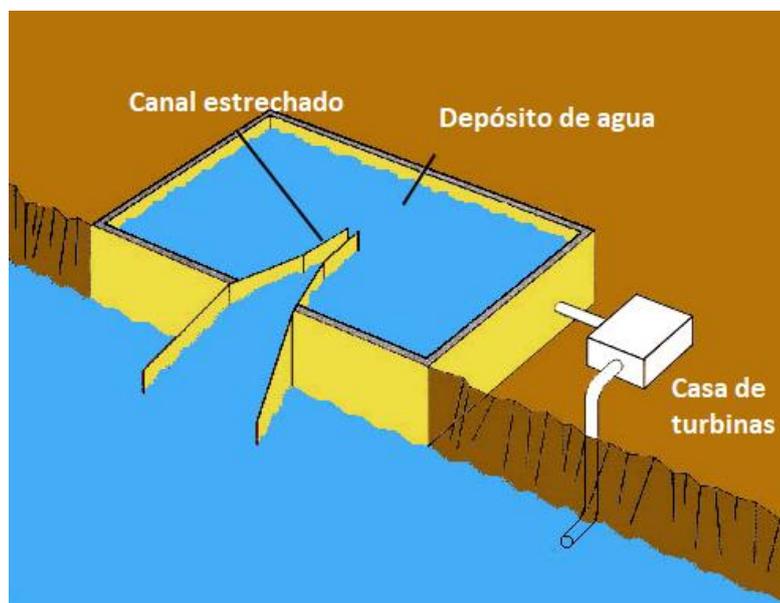


Figura 42 Esquema de funcionamiento del *Tapchan* [35].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo *Tapchan* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Tapchan</i>	Onshore apoyado	Terminador o totalizador	Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Figura 43 Clasificación del sistema undimotriz *Tapchan*. Elaboración propia.

4.2.1.6. Coppe Subsea Technology

La tecnología *Coppe Subsea Technology* se ubica en la costa y consiste en una plataforma flotante de gran tamaño que aprovecha el movimiento vertical oscilante de las olas para impulsar un pistón oleo-hidráulico y generar electricidad. Es una tecnología diseñada en Brasil, la cual se encuentra operativa a 60 Km de Fortaleza, Ceará, Brasil, y puede generar una potencia máxima de 50 KW [41].



Figura 44 Imagen de *Coppe Subsea Technology* en Fortaleza [41].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo *Coppe Subsea Technology* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Coppe Subsea Technology</i>	Onshore apoyado	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante

Figura 45 Clasificación del sistema undimotriz Coppe Subsea Technology. Elaboración propia.

4.2.2. Dispositivos undimotrices para el bombeo directo de agua

A pesar de que las tecnologías que buscan generar electricidad de manera renovable son las más desarrolladas y buscadas, también existen dispositivos que utilizan la energía undimotriz no para la generación de electricidad sino para el bombeo directo de agua de mar. En este apartado se detallarán las tecnologías más destacadas que cumplen dicha función.

4.2.2.1. Aquabuoy

El dispositivo *Aquabuoy* se sitúa en aguas profundas y consiste en una boya que aprovecha el movimiento vertical oscilatorio de las olas para mover un pistón que se encarga del bombeo del agua. El pistón está conectado a un circuito de dos mangueras que permite el bombeo de agua tanto en el movimiento ascendente del mismo como en el movimiento descendente (véase Figura 46). A pesar de que este dispositivo puede usarse para el bombeo del agua también es cierto que los modelos piloto existentes incorporan una turbina *Pelton* en el cuerpo de la boya para la generación de electricidad. Las dimensiones del modelo piloto desarrollado en la Bahía de Makah, Estados Unidos, son de 6 metros de diámetro, 30 metros de longitud y capaz de generar una potencia eléctrica máxima de 250KW a través de la turbina *Pelton*.

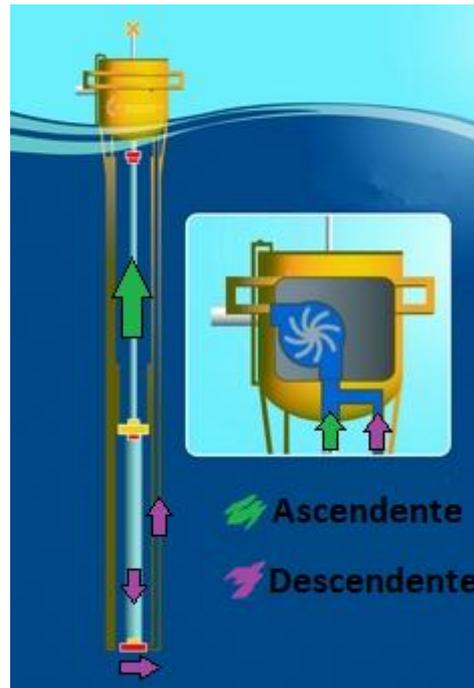


Figura 46 Esquema de funcionamiento de un dispositivo AquaBuoy. Elaboración propia.

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo *AquaBuoy* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>AquaBuoy</i>	Offshore Flotante	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante

Figura 47 Clasificación del sistema undimotriz AquaBuoy. Elaboración propia.

4.2.2.2. Lilypad

El Sistema *Lilypad* fue desarrollado en Suecia en los años 80 y es pionero en el bombeo de agua de mar, el dispositivo consiste en una manguera construida de un elastómero que permite el ingreso de agua al expandirse y el desplazamiento del agua al contraerse pasando por unas válvulas de retención.

En la actualidad existen varios prototipos instalados, pero no ha logrado un desarrollo comercial principalmente por su dificultad de resistir marejadas imprevistas [42].

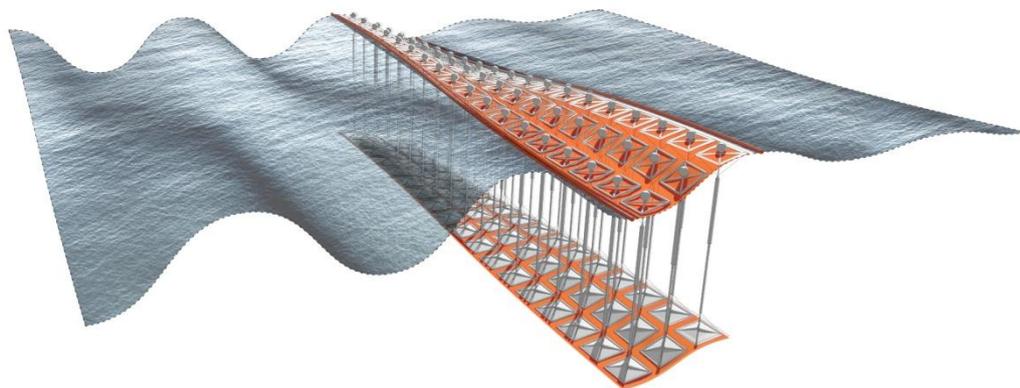


Figura 48 Imagen que muestra el funcionamiento del dispositivo Lilypad [42].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo *Lilypad* de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Lilypad</i>	Offshore Flotante	Terminador o totalizador	Cuerpo flotante

Figura 49 Clasificación del sistema undimotriz Lilypad. Elaboración propia.

4.2.2.3. Oyster

El sistema *Oyster* se sitúa cerca de la costa apoyado en el lecho marino a unos 15 metros de profundidad. Este dispositivo consigue bombear agua a partir de la energía de las olas que impactan sobre una plataforma oscilante de gran superficie y de pistones oleo-hidráulicos. Es una tecnología de éxito en la problemática de bombear agua a partir de energía undimotriz puesto que es una tecnología comercial.

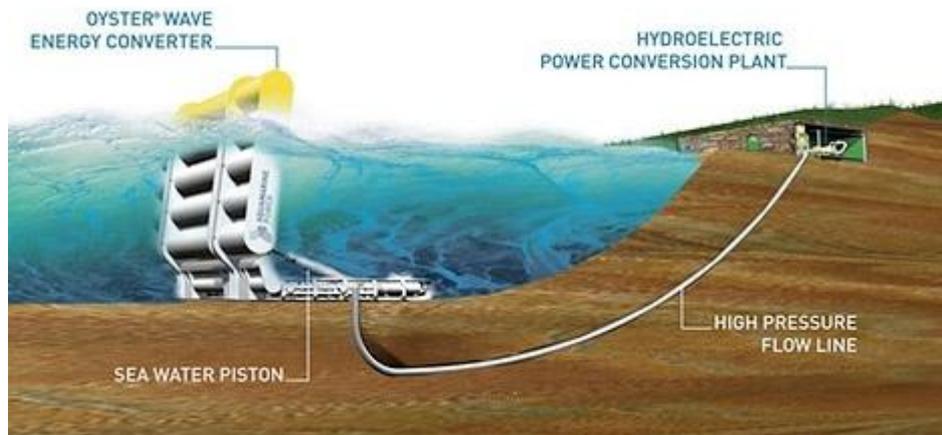


Figura 50 Esquema de funcionamiento del Oyster [35].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, se puede clasificar el dispositivo Oyster de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
Oyster	Nearshore Apoyado	Absorbedor puntual	Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Figura 51 Clasificación del sistema undimotriz Oyster. Elaboración propia.

4.2.3. Resumen del estado del arte de los dispositivos undimotrices

Este apartado está dedicado a resumir el estado del arte de los dispositivos undimotrices expuestos en los apartados anteriores. De forma compacta y según la clasificación de dispositivos undimotrices detallada en el apartado 3.2.3.2, los dispositivos presentados se clasifican de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
<i>Columna agua oscilante</i>	Onshore apoyado	Terminador o totalizador	Diferencia de presión
<i>Pelamis</i>	Offshore flotante	Atenuador	Cuerpo flotante
<i>PowerBuoy</i>	Offshore Flotante	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante
<i>WaveDragon</i>	Offshore flotante	Terminador o totalizador	Sistemas de rebosamiento y/o impacto
<i>Tapchan</i>	Onshore apoyado	Terminador o totalizador	Sistemas de rebosamiento y/o impacto
<i>Coppe Subsea Technology</i>	Onshore apoyado	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante
<i>AquaBuoy</i>	Offshore Flotante	Absorbedor puntual	Cuerpo flotante
<i>Lilypad</i>	Offshore Flotante	Terminador o totalizador	Cuerpo flotante
<i>Oyster</i>	Nearshore Apoyado	Absorbedor puntual	Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Figura 52 .Resumen de la clasificación de los distintos dispositivos undimotrices. Elaboración propia.

Esta tabla resumen pone de manifiesto la gran variedad de formas y combinaciones que existen de extraer energía de las olas pero también pone de manifiesto que la obtención de energía undimotriz se encuentra en una fase muy poco avanzada, puesto que no existe una convergencia en tecnologías, sino que la gran variedad de dispositivos expuestos es muestra del fracaso a la hora de querer desarrollar un dispositivo rentable para comercializarlo.

4.3. Revisión y evaluación de la memoria y conclusiones de Eliecer Cabrera Fernández sobre el sistema de bombeo con energía undimotriz escogido para los objetivos del proyecto.

En este apartado se resumen las conclusiones de la memoria de titulación de Eliecer Cabrera Fernández titulada “Bombeo de agua de mar con energía undimotriz” (Mayo 2018)

y que supone los primeros pasos del proyecto *Dragón de Mar*. Como este trabajo supone la continuación de los avances realizados por Eliecer Cabrera Fernández en el proyecto, se expondrán los hechos más remarcables de su desarrollo para dar constancia de sus conclusiones y del punto de partida de este trabajo.

4.3.1. Selección del diseño conceptual

En su memoria titulada “*Bombeo de agua de mar con energía undimotriz*”, Eliecer Cabrera Fernández realiza una evaluación del estado del arte de las tecnologías undimotrices seguido de un ejercicio de comparación entre diversos de los sistemas para la elaboración de un diseño conceptual de la bomba de agua. Dicho ejercicio consiste en comparar diferentes diseños conceptuales de dispositivos y ponderarlos en función de diferentes características para acabar seleccionando el dispositivo más apropiado. En dicho ejercicio se comparan los cuatro modelos conceptuales de bomba de agua que siguen: sistema de columna de agua oscilante con boya tipo pistón, sistema de columna de agua oscilante con boya tipo diafragma, sistema de bombeo directo de agua marina comeolas y un sistema comeolas combinado con una bomba de ariete. Los conceptos y/o características utilizadas en la comparación son: la originalidad, el coste, la dificultad constructiva, la confiabilidad y el impacto ambiental. El resultado del ejercicio es el que sigue:

	Originalidad	Costos	Dificultad de construcción	Confiabilidad	Impacto Ambiental	Ponderación
OWC de boya con pistón	1	1	2	1	1	6
OWC de boya con diafragma	3	2	1	3	2	11
Bomba de ariete marina	4	3	3	2	3	15
Comeolas	2	4	4	4	4	18

Figura 53 Ejercicio de ponderación realizado por Eliecer Cabrera Fernández en su memoria [32].

Los dos diseños conceptuales escogidos para implementar una bomba de agua con energía undimotriz son el dispositivo comeolas y el mismo con una bomba de ariete por ser los diseños conceptuales con una mayor ponderación.

4.3.1.1. Dispositivo de bombeo comeolas

El comeolas tiene un funcionamiento simple que consiste en un ducto para capturar las olas y direccionar el fluido por medio de una válvula de retención, en teoría el fluido alcanzaría una altura equivalente a la energía cinética y potencial que transporta la ola [32] (véase apartado 3.1.3).

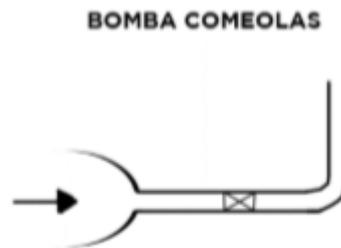


Figura 54 Esquema del dispositivo de bombeo directo comeolas [32].

4.3.1.2. Sistema de bombeo directo comeolas con bomba de ariete

Actualmente las bombas de ariete están despertando un interés por su potencial para abastecer agua a bajo costo y de manera simple a comunidades centroamericanas y africanas. En las últimas décadas se ha logrado investigar y optimizar estos sistemas para distintos usos, aunque no se han utilizado para impulsar agua de mar probablemente por el desconocimiento que se tiene de estas bombas. El dispositivo consistiría en un ducto que canalizaría las olas incidentes que cerrarían una válvula provocando una sobrepresión [32].

La principal desventaja de este sistema es que el nivel del mar no es idéntico en la pleamar y bajamar lo que dificultaría su funcionamiento las 24 horas para esto lo ideal sería la construcción de una parte flexible con flotador que garantice que las olas incidentes sean canalizadas óptimamente [32].

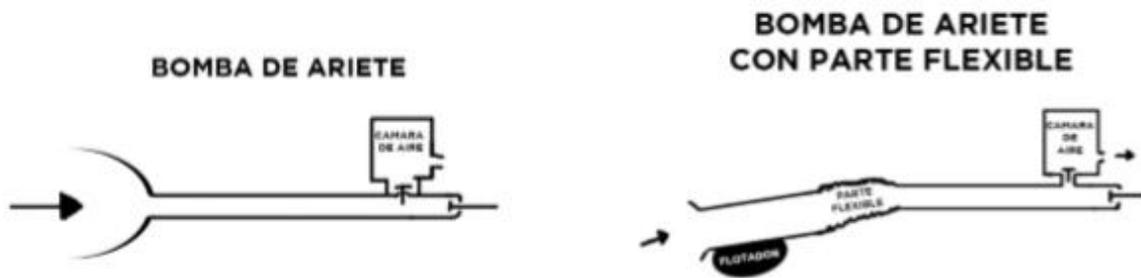


Figura 55 Esquema del dispositivo de bombeo directo con comeolas y bomba de ariete [32].

4.3.2. Desarrollo del diseño conceptual

Para ambos diseños conceptuales escogidos, Eliecer Cabrera Fernández desarrolla dos diseños o modelos conceptuales para la bomba directa de agua comeolas y con bomba de ariete. En ambos diseños su funcionamiento consiste en la captura del oleaje por medio de una estructura para atrapar las olas llevándolas a una tubería. El objetivo de los diseños es maximizar la altura de la columna de agua impulsada por medio de una válvula de retención.



Figura 56 Esquema del prototipo experimental de Eliecer Cabrera Fernández [32].

El dispositivo consta de dos fases:

- **Primera fase:** en esta fase el fluido entra por la estructura atrapa olas y es impulsado con una reducción del área hasta que traspase la válvula de retención hasta que las presiones cinemática y potencial sean iguales [32].
- **Segunda fase:** en esta fase el fluido es direccionado por una sobrepresión formada por la energía cinética que permite impulsar una columna de agua [32].

Los elementos que forman el dispositivo de bombeo comeolas son los siguientes:

- **Atrapa-olas:** el atrapa-olas consiste en una estructura que genera una reducción del área transversal de la ola y que acelera el fluido que entra a la tubería.
- **Ducto principal:** el ducto principal tiene dos funciones, la primera consiste en funcionar como estructura del prototipo y la segunda consiste en trasladar el fluido buscando las menores pérdidas por fricción [32].
- **Válvula de retención:** la válvula de retención retiene el fluido para que una vez que se origina la sobrepresión este no se devuelva [32].
- **Ducto secundario:** el ducto secundario consiste en el ducto por el cual se buscará contener la columna de agua elevada por la sobrepresión [32].
- **Bomba de ariete:** la cual aparece solo en el modelo conceptual de comeolas con bomba de ariete y se agrega al ducto principal. Es el elemento encargado de generar la sobrepresión para la elevar la columna de agua gracias al fenómeno *golpe de ariete*.

ESQUEMA PROTOTIPO EXPERIMENTAL FINAL

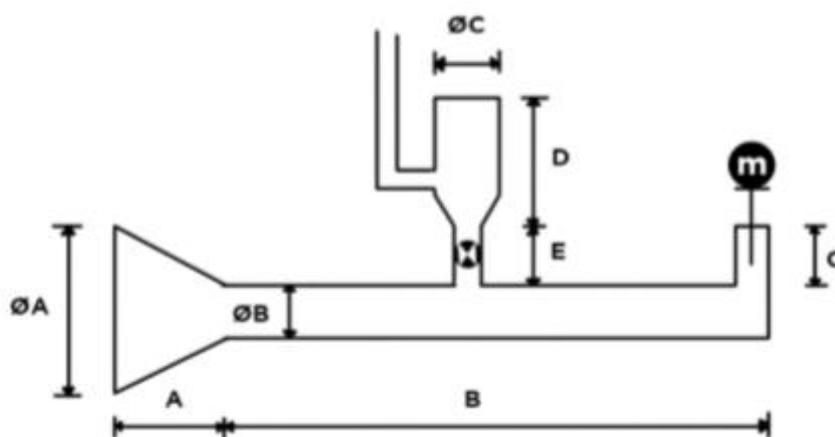


Figura 57 Esquema del prototipo experimental final de Eliecer Cabrera Fernández [32].

Según la clasificación de dispositivos undimotrices establecida en el apartado 3.2.3.2 ambos diseños conceptuales de dispositivos comeolas pueden clasificarse de la siguiente manera:

Sistema	Clasificación según su...		
	Ubicación	Tamaño y orientación	Principio de captación
Comeolas	Onshore apoyado/flotante	Terminador o totalizador	Sistemas de rebosamiento y/o impacto

Figura 58 Clasificación del sistema undimotriz comeolas. Elaboración propia.

4.3.3. Construcción y análisis de los prototipos a pequeña escala

Una vez definido el diseño conceptual de la bomba de agua, Eliecer Cabrera Fernández elaboró dos prototipos a pequeña escala, con y sin la bomba de ariete, para testear su funcionamiento en el canal de olas de la Universidad Técnica Federico Santa María en Santiago. En las siguientes imágenes pueden verse los planos generales de los modelos a pequeña escala y los resultados de su construcción.

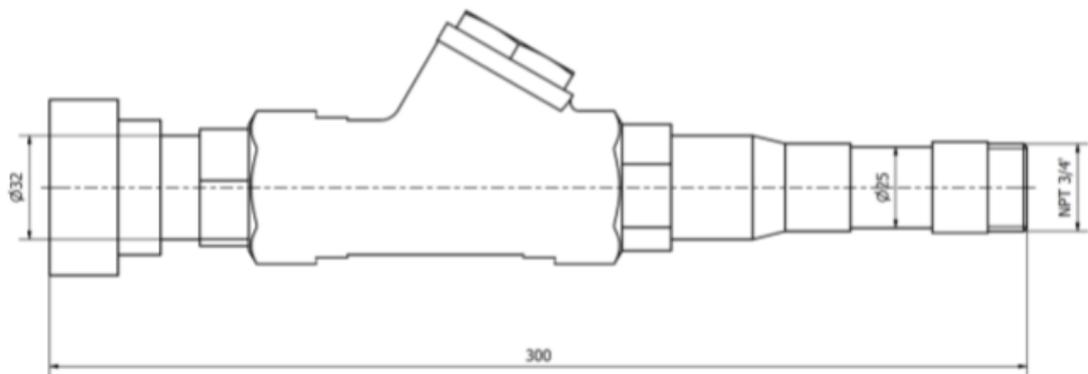


Figura 59 Plano general del modelo a pequeña escala sin bomba de ariete elaborado por Eliecer Cabrera Fernández [32].

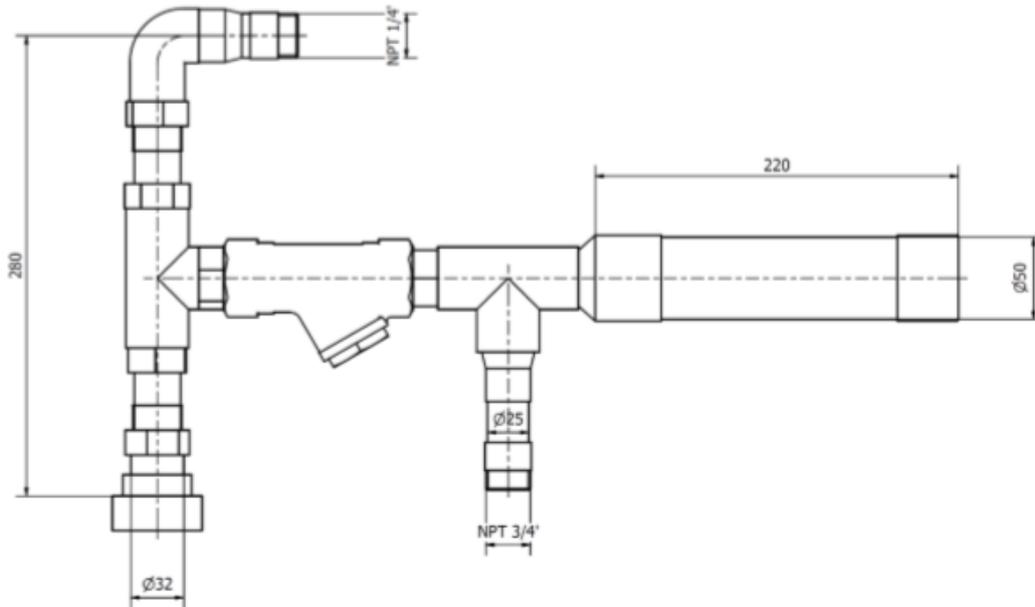


Figura 60 Plano general del modelo a pequeña escala con bomba de ariete elaborado por Eliecer Cabrera Fernández [32].



Figura 61 Resultado de la construcción del modelo a pequeña escala sin bomba de ariete de Eliecer Cabrera Fernández [32].



Figura 62 Resultado de la construcción del modelo a pequeña escala con bomba de ariete de Eliecer Cabrera Fernández [32].

Los modelos de las Figura 61 y Figura 62 incorporan una pieza a la que se le puede acoplar el atrapa-olas, el cual no aparece representado en las imágenes, y que consistió en el cuello de una botella plástica en los ensayos en el canal de olas. Véase las siguientes imágenes de las pruebas en el canal de olas.

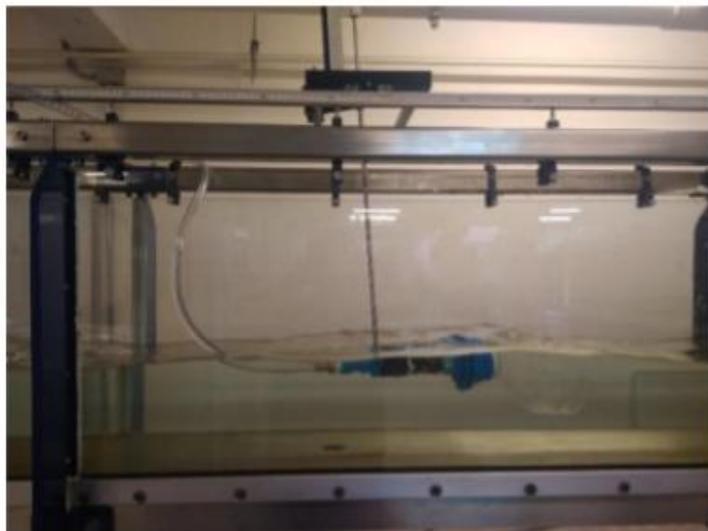


Figura 63 Ensayo del modelo a pequeña escala sin bomba de ariete en el canal de olas [32].



Figura 64 Ensayo del modelo a pequeña escala con bomba de ariete en el canal de olas [32].

Los resultados obtenidos en ambas experimentaciones están representados en los siguientes gráficos donde el primero muestra la altura de elevación de la columna de agua bombeada en función de la amplitud de la ola generada para el dispositivo sin bomba de ariete; y el segundo, correspondiente al dispositivo con bomba de ariete, muestra la altura de elevación de la columna de agua bombeada para diferentes amplitudes de ola en función de la masa de la válvula de choque, que es un componente fundamental en el fenómeno de golpe de ariete.

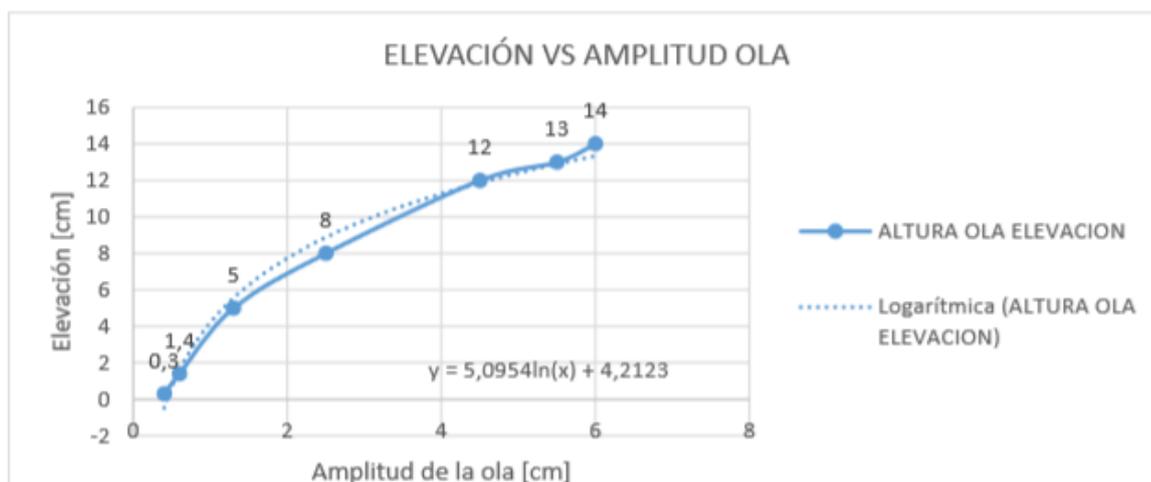


Figura 65 Resultados de la experimentación en el canal de olas del dispositivo sin bomba de ariete [32].

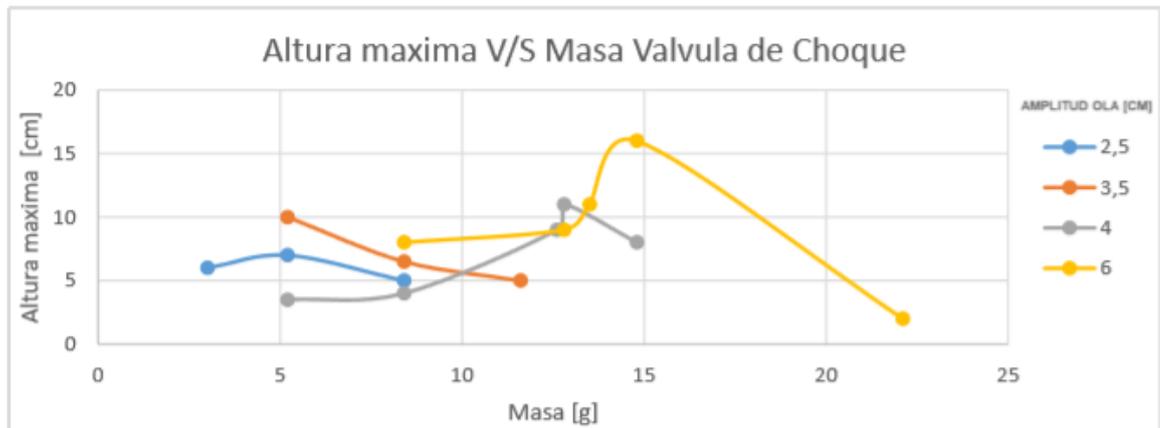


Figura 66 Resultados de la experimentación en el canal de olas del dispositivo con bomba de ariete [32].

En ambas experimentaciones se puede observar que la altura máxima alcanzada es de alrededor de 15 centímetros en el mejor de los casos.

A partir de un análisis fluido-dinámico de semejanza, Eliecer Cabrera Fernández traslada los resultados obtenidos en las experimentaciones en el canal de olas a las magnitudes correspondientes a modelos a escala real para ambos dispositivos, con y sin bomba de ariete. La geometría de dichos modelos a escala real se elaboró bajo una serie de condiciones del emplazamiento y del oleaje, dando el siguiente resultado:

- Diámetro del atrapa-olas de 5,6 metros.
- Diámetro del ducto principal de 400 milímetros.
- Largada del ducto principal de 4 metros para asegurar un perfil de velocidades desarrollado, véase apartado 3.1.6.

Tras el análisis de semejanza para los modelos a escala real expuestos, Eliecer Cabrera Fernández realiza un estudio del modelo a través de *CFD* para verificar los resultados obtenidos en la experimentación en el canal de olas. Los resultados de todo el proceso para ambos modelos a escala real son los siguientes:

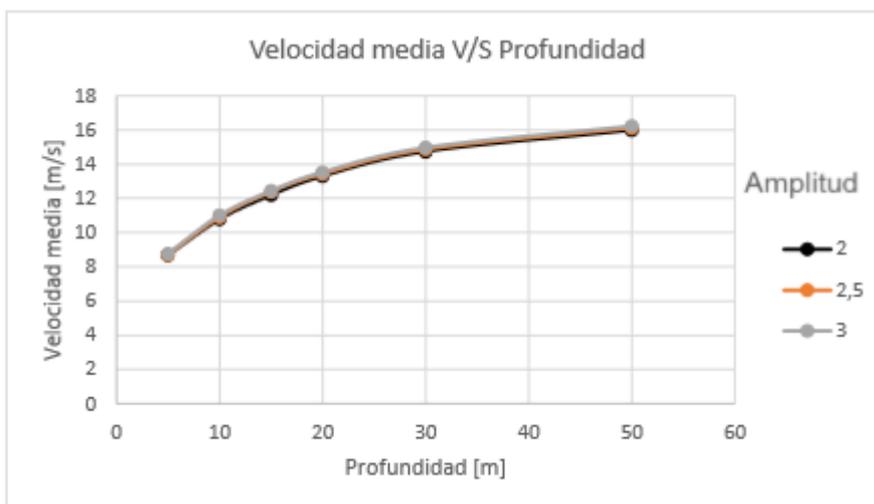


Figura 67 Resultados de velocidad del fluido vs la profundidad del emplazamiento para diferentes amplitudes de ola del dispositivo undimotriz sin bomba de ariete [32].

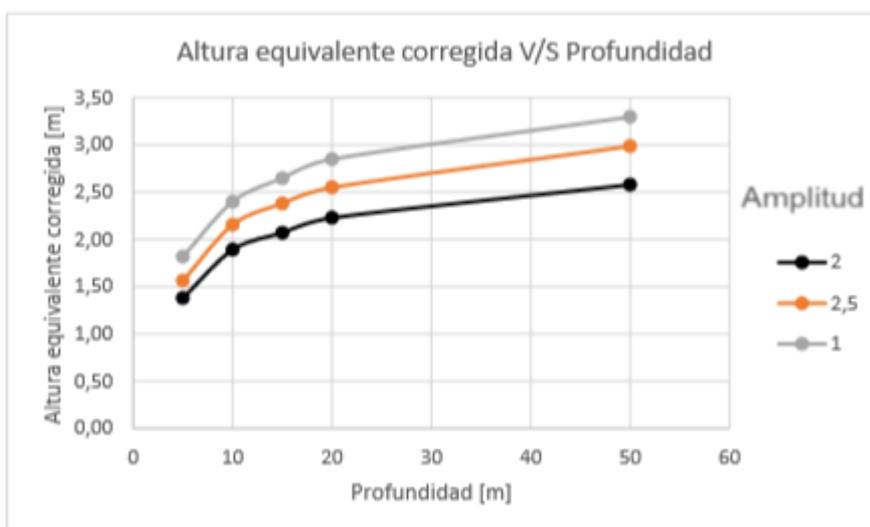


Figura 68 Resultados de la altura de bombeo vs la profundidad del emplazamiento para diferentes amplitudes de ola del dispositivo undimotriz con bomba de ariete [32].

4.3.4. Propuestas de mejora de Eliecer Cabrera Fernández

En su memoria Eliecer Cabrera Fernández apunta que existen al menos cuatro áreas en donde es necesario investigar y desarrollar para mejora el rendimiento de ambos dispositivos, estos son materialidad, emplazamiento, geometría del atrapa-olas y

optimización de la válvula de choque. Entre todas estas propuestas de mejora se destaca la optimización de la geometría del atrapa-olas como cuello de botella en pos de conseguir un dispositivo de bombeo undimotriz comeolas capaz de bombear agua a gran altura.

4.4. Evaluación del la ubicación dónde se instalará el dispositivo undimotriz de bombeo

Tal y como se ha indicado en el apartado 4.1, la ubicación dónde se pretende instalar el dispositivo undimotriz es la punta de Curaumilla, a las afueras de Laguna Verde, provincia de Valparaíso, V Región de Chile ($33^{\circ}05'37.5''S$ $71^{\circ}43'18.4''W$). Se escoge dicha ubicación por su proximidad con la granja marina que se pretende alimentar, por las condiciones favorables del oleaje y por sus condiciones geológicas, puesto que en dicha ubicación el oleaje está limitado por ambos lados en forma de estrechamiento, por un lado por el acantilado costero y por el otro por un islote, lo cual facilitará la maniobrabilidad y instalación del dispositivo.



Figura 69 Mapa satélite de la ubicación dónde se pretende instalar el dispositivo. En verde la ubicación del estrechamiento, en marrón la ubicación de la granja marina [43].



*Figura 70 Estrechamiento natural donde se pretende instalar el dispositivo undimotriz.
Elaboración propia.*

La descripción geométrico-estadística del oleaje en Laguna Verde (véase apartado 3.2.2.4) puede encontrarse en el web del atlas del oleaje de Chile [16]. Las distribuciones de alturas significantes y del período medio del oleaje a lo largo de la costa chilena quedan reflejadas en la siguiente figura:

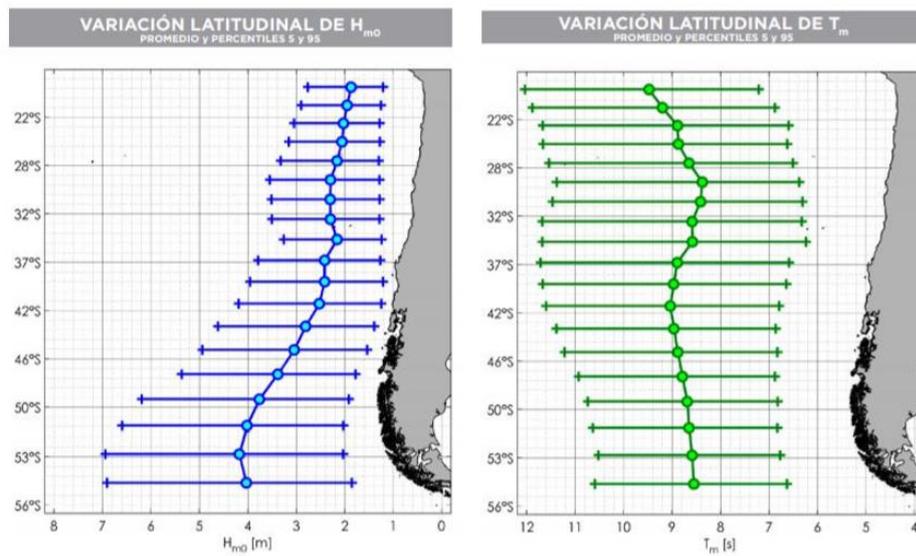


Figura 71 Distribuciones de alturas significantes y del período medio del oleaje a lo largo de la costa chilena [16].

En la costa de Valparaíso se tiene una altura significativa de 2,30 metros y un periodo medio de 8,6 segundos [16], mientras que en la costa de Laguna Verde la altura significativa asciende a 2,6 metros y el período medio a 10 segundos [32]. En lo referente a la longitud de la ola en la zona de Laguna Verde, ésta se reduce a medida que aumenta la interacción de la costa, véase apartado 3.2.2. Dicha interacción queda representada en la siguiente figura:

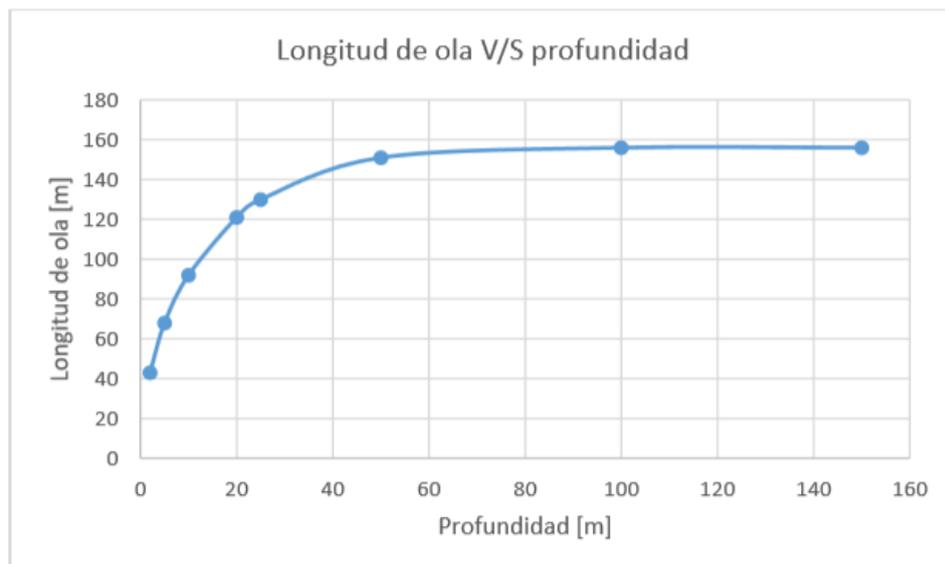


Figura 72 Interacción entre la longitud de la ola y su profundidad [32].

Por inspección directa del propio lugar de emplazamiento se determina que su profundidad es cercana a los 5 metros, por lo que la longitud de la ola resulta en 50 metros según el gráfico de la Figura 72. Atendiendo a que el período medio en Laguna Verde es de 10 segundos y su longitud de 50 metros la ola debe viajar a 5 metros por segundo para satisfacer la expresión (31).

Las condiciones del oleaje concretas del emplazamiento escogido para el dispositivo undimotriz son difíciles de predecir puesto que tanto la forma geológica de estrechamiento como la poca profundidad del lugar generan mucha influencia e interacción sobre el oleaje, por ello, la información que se puede encontrar en el atlas del oleaje de Chile sobre el oleaje en laguna verde puede no ser del todo representativa del oleaje existente exactamente en el emplazamiento de instalación. Aún así, y puesto que no se dispone de equipos de medición con el fin de determinar las condiciones exactas del oleaje en el emplazamiento de instalación, la información proporcionada por el atlas del oleaje de Chile será usada con criterio en esta parte práctica del trabajo.

4.4.1. Dominio de simulación

El arte de la simulación en *CFD* está repleto de simplificaciones que facilitan tanto el cálculo como la convergencia de las soluciones. Un paso fundamental y el cual conlleva usualmente simplificaciones es la definición del dominio de simulación. Bajo la imposibilidad de generar un dominio exactamente igual al emplazamiento donde se instalara el dispositivo undimotriz, ya bien sea por falta de los instrumentos necesarios como por el alcance del proyecto, se decide generar un dominio que sea lo más fiel a la realidad posible pero desde el punto de vista de la sencillez para facilitar tanto la configuración de las simulaciones como su resolución. Para ello se tienen en cuenta los siguientes puntos:

- La profundidad desde el suelo marino a la superficie libre es de 5 metros (véase apartado 4.4).
- La altura total del dominio se establece en 7,2 metros para que no haya interacción entre la cara superior del dominio y la ola generada.
- Cuanto más largo sea el dominio mejor para que la interacción de la ola que se genera en la cara de entrada y la ola que choca contra el dispositivo sea la mínima posible. Debido a la baja capacidad computacional disponible para los fines de este trabajo se asigna un valor de 5 metros a esta dimensión puesto que el coste computacional crece mucho al aumentarla.
- Por la misma razón que en el punto anterior, cuánta más distancia exista entre las caras laterales del dominio mejor será para la simulación puesto que se reduce la interacción que estas caras hacen sobre el problema. Debido a la baja capacidad computacional disponible para los fines de este trabajo se asigna un valor de 8

metros a esta dimensión puesto que el coste computacional crece mucho al aumentarla.

- En lo referente al dispositivo undimotriz, solo se representa el atrapa-olas y el ducto principal, lo cual obedece también a un criterio de simplificación. El ducto se encontrará siempre sumergido y será lo suficientemente largo como para que el perfil de velocidades en él se desarrolle completamente (véase apartado 3.1.6 y Figura 5).
- El suelo marino se representará de forma plana, sin relieve y con una profundidad constante.
- En aras de simplificar muchísimo el coste computacional que acarrear la simulación, se divide el dominio por la mitad, cara dónde se aplica una condición de contorno de simetría (véase apartado 3.3.4), lo cual reduce el coste computacional casi a la mitad sin afectar a los resultados obtenidos.

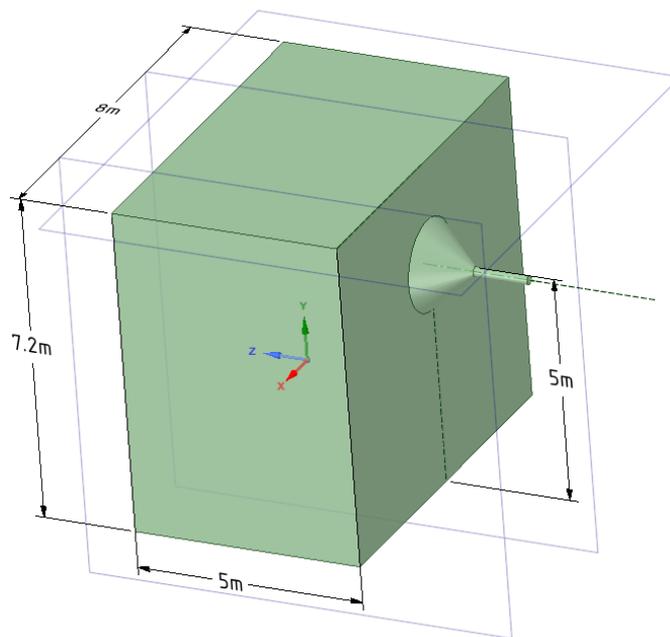


Figura 73 Dominio de la simulación sin simplificación por simetría. Elaboración propia.

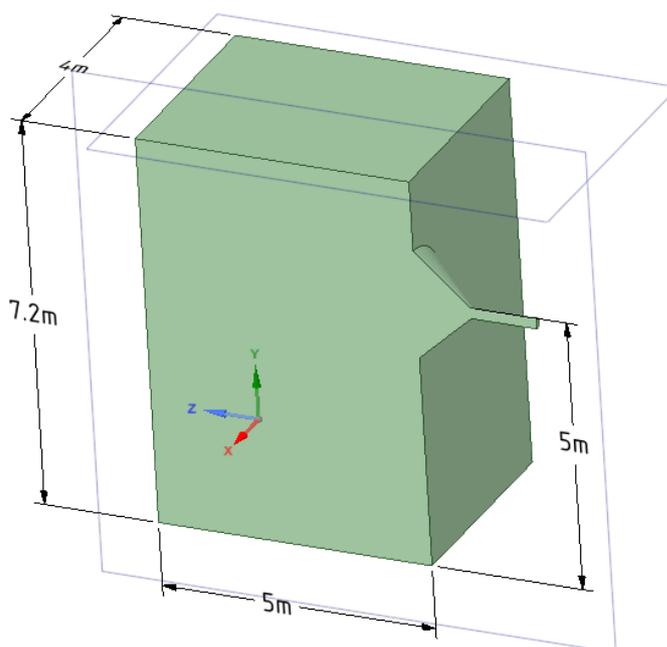


Figura 74 Dominio de la simulación con simplificación por simetría. Elaboración propia.

4.5. Optimización del atrapa-olas mediante CFD

Tal y como se ha comentado en el apartado 4.3.4, la optimización de la geometría del atrapa-olas es una tarea fundamental para conseguir que el dispositivo de bombeo con energía undimotriz ofrezca unos resultados que le otorguen una real funcionalidad y rentabilidad. En este apartado, que es el núcleo central de la parte práctica del trabajo, se usa el aplicativo *Fluent* del software *ANSYS* para la optimización de dicha geometría.

Las simulaciones de *CFD* no ofrecen la fiabilidad de predecir exactamente el comportamiento real del fluido ni la altura a la cual se podría bombear el agua de mar, ya sea por las simplificaciones adoptadas en el análisis como por la dificultad de intentar representar digitalmente la realidad cambiante y aleatoria del oleaje, aún así son una herramienta muy útil para realizar análisis comparativos entre modelos y para tener una primera estimación del comportamiento del fluido, lo que posteriormente debería verificarse a través de modelos a pequeña escala en el laboratorio o a escala real. Así pues se usa la herramienta *ANSYS* para elaborar una serie de modelos de atrapa-olas, intentando que cada modelo que suceda al anterior incorpore mejoras cualitativas, es decir, que sea capaz de bombear agua de mar cada vez a mayor altura. Con esta metodología donde entre simulaciones sólo varía la geometría del atrapa-olas se pretende poder obtener una

geometría del atrapa-olas optimizada en comparación a la propuesta por Eliecer Cabrera Fernández en su memoria.

4.5.1. Configuración de las simulaciones de CFD con ANSYS Fluent

En este apartado del trabajo se detalla con precisión la configuración de todos los análisis *CFD* que se realizan en el marco de la memoria que sigue el esquema detallado en el apartado 3.3 y en la Figura 26. Este apartado tiene dos funciones:

- En primer lugar para informar al lector del tipo de análisis que se realiza para que el mismo ponga en tela de juicio tanto la idealidad de las decisiones adoptadas como la fiabilidad de los resultados presentados.
- En segundo lugar, y considerando que las simulaciones de olas con el *software ANSYS Fluent* no son triviales, para hacer al lector conocedor de la configuración requerida para desarrollar una simulación similar.

Por ambos de los motivos expuestos se expone la configuración de las simulaciones de la forma más detallada posible para que el lector no pierda el hilo de toda acción desarrollada.

4.5.1.1. Geometría

El primer paso para configurar la simulación del dispositivo undimotriz con el *software ANSYS Fluent* es abrir el *Workbench* de *ANSYS* en la versión que se disponga, en el caso de este trabajo versión 18.1. En segundo lugar se arrastra el aplicativo *Fluid Flow (Fluent)* que aparece en la caja de herramientas al esquema del proyecto. Si no aparece el aplicativo *Fluid Flow (Fluent)* en la caja de herramientas puede deberse a que la misma no está visible o que el aplicativo no está instalado y por ello no disponible. A este punto se tiene una situación como la del la Figura 26, con las diferentes partes de la simulación debidamente representadas así como su estado.

Para proceder debe pincharse la pestaña de geometría y a continuación se abrirá el editor de geometrías del *software ANSYS* donde se pueden llevar a cabo dos acciones:

- Utilizar el editor de geometrías de *ANSYS* para generar una geometría.
- Importar una geometría creada a partir de cualquier *software* de diseño asistido por ordenador.

En la definición de la geometría cabe destacar que todo sólido creado será dividido en subdominios para la posterior discretización de las ecuaciones de gobierno en él (véase apartado 3.3), por ello, si se quiere simular una tubería de debe crearse un sólido cilíndrico y

no una superficie cilíndrica hueca. En otras palabras, todo el dominio que quiera definirse como el espacio por dónde circula el fluido debe ser sólido. Un ejemplo de geometría para el problema que se trata en el marco del trabajo es el de la Figura 74.

Una vez creada la geometría se cierra el editor y se actualiza la pestaña de geometría en el esquemático del proyecto del *Workbench de ANSYS*.

4.5.1.2. Mallado o *mesh*

La siguiente fase de la configuración del problema de *CFD* con *ANSYS* consiste en definir el mallado de la geometría que se acaba de generar. El mallado consiste en discretizar todo el dominio sólido en el cual consiste la geometría generada, véase apartado 3.3.2.

Pinchando en la pestaña *Mesh* en el esquemático del proyecto se abre el editor de mallado de *ANSYS*. Llegados a este punto, y de forma específica para los análisis realizados en el marco de este trabajo, se procede de la siguiente forma:

- Se usan elementos tetraédricos para el mallado en toda la geometría atendiendo a su complejidad, véase apartado 3.3.2.
- Se regula el tamaño y número de elementos en los cuáles se discretiza la geometría a partir de un método de mallado *sizing* (véase apartado 3.3.2.1). Dentro de dicho método, los parámetros que se usan para la regulación son el tamaño máximo de los tetraedros (*Max Tet size*) y el tamaño máximo de las caras de los mismos (*Max Face size*). El valor que se les atribuye a estos parámetros se determinará mediante un análisis de sensibilidad del mallado, véase apartado 3.3.2.
- Se regula la interacción líquido-sólido (véase apartado 3.1.6) para que el parámetro *y-plus* tome valores acordes al modelo de turbulencia que se use (véase apartado 3.3.3.3) a través de el método de mallado *inflation*. Dicho método se aplica a lo largo de toda la superficie del atrapa-olas ya que permite determinar la proximidad del primer nodo a la pared para así regular la interacción líquido-sólido (véase apartado 3.3.2.1). Los parámetros numéricos que precisa el método se determinarán mediante un análisis de sensibilidad del mallado.

En esta fase del proceso deben definirse también nombres para las caras fronterizas del dominio que se ha discretizado, en pos de poder asignarles posteriormente las condiciones de contorno de forma adecuada. Para tal fin debe seleccionarse la cara en cuestión, pinchar con el botón derecho y seleccionar la opción “*Create named selection*” Para los problemas en el marco de este trabajo se definen los siguientes nombres para los distintos contornos:

- **Inlet:** cara frontal del dominio y por donde entra la ola.
- **Outlet:** cara trasera del dominio por donde la ola escapa.
- **Outlet atm:** cara superior del dominio por donde escapa el aire atmosférico.
- **Ground:** cara inferior del dominio correspondiente al suelo marino.
- **Symetry:** cara correspondiente al plano de simetría utilizado para la simplificación del dominio.
- **Lado:** cara correspondiente al otro costado del dominio que no es el plano de simetría.
- **Dragon:** cara correspondiente al conjunto de superficies del atrapa-olas y ducto principal.
- **Outlet dragon:** cara trasera del ducto principal por dónde escapa el agua de mar que entra al atrapa-olas.

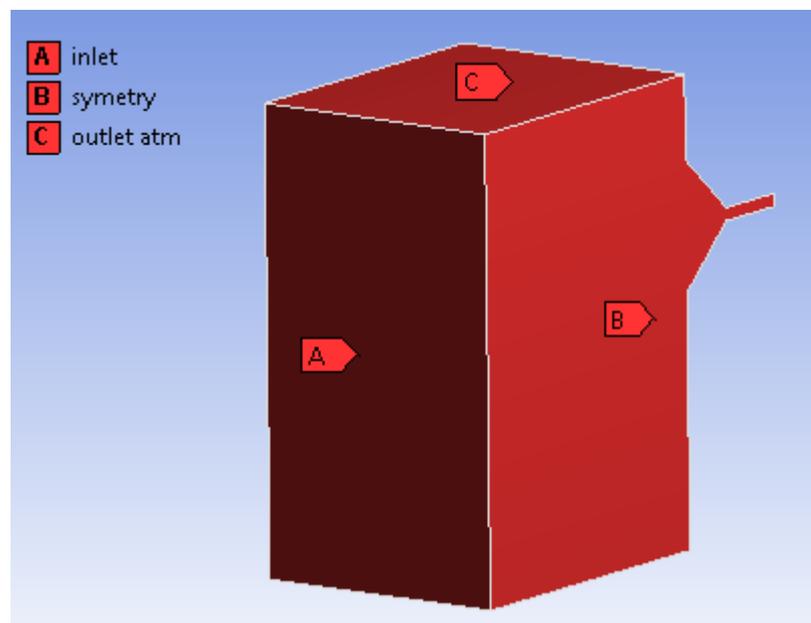


Figura 75 Nombres otorgados a las diferentes fronteras del dominio. Elaboración propia.

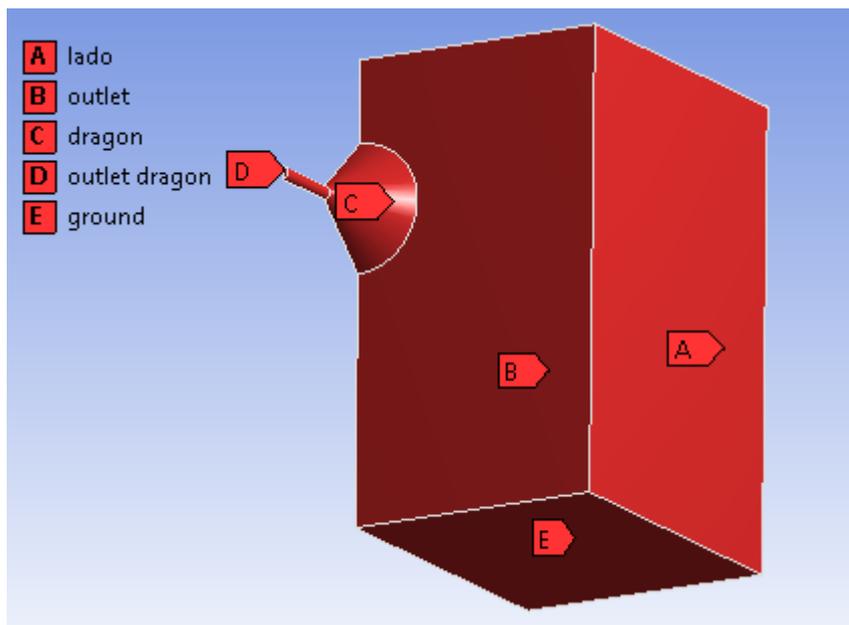


Figura 76 Nombres otorgados a las diferentes fronteras del dominio. Elaboración propia.

4.5.1.3. Setup

Después de actualizar el mallado que se ha definido, el próximo paso es pinchar en la pestaña de *Setup* dónde se define la tipología del problema, los modelos matemáticos, las condiciones de contorno y la configuración de la solución.

Para el problema que se ocupa en este trabajo, el primer paso es activar la casilla de análisis transitorio (*transient*) que se encuentra en la pestaña *General* en la interface del *Setup*. Posteriormente, como la tipología del problema lo requiere, se debe activar la pestaña de gravedad (*Gravity*) que se encuentra en el mismo apartado, así como indicar su valor, dirección y sentido. En el caso particular de la geometría que se ha definido en la Figura 74, este parámetro debe valer $9,81 \text{ m/s}^2$ en la dirección del eje *y* y sentido negativo.

Para definir los modelos matemáticos se despliega la pestaña *Models* de la interfaz del *Setup*. Para la correcta simulación del problema que se presenta en este trabajo se requiere activar dos modelos matemáticos. En primer lugar el modelo *Volume of Fluid* puesto que se simulan dos fases fluidas diferentes aire y agua dando lugar a una superficie libre entre ambas (véase apartado 3.3.3.1). Para hacerlo se pincha en *Multiphase* y se activa el modelo en cuestión. Como acciones complementarias se activan las siguientes casillas pertenecientes al modelo: *Open Channel Flow*, *Open Channel Wave BC*, *Interfacial Anti-Diffusion* y *Implicit Body Force*, todo ello con el fin de poder integrar correctamente las olas a la simulación multifásica.

En segundo lugar se activa un modelo matemático para el tratamiento del fenómeno físico de la turbulencia (véase apartado 3.3.3.2). Por ser una opción de uso bastante concurrente en el ámbito ingenieril, por presentar características intermedias entre los modelos k-epsilon y k-omega y por ofrecer un buen tratamiento de la turbulencia por a un coste computacional razonable (véase apartado 3.3.3.5) se decide utilizar el modelo k-omega SST para tratar la turbulencia en todas la simulaciones que se llevaran a cabo en el marco del trabajo. Para activar dicho modelo debe pincharse en la pestaña *Viscous* accesible desde el desplegable *Models* y pinchar en el modelo k-omega. Aparecen a continuación el listado de modelos k-omega que ofrece el *software* donde se selecciona el modelo SST.

Una vez definidos los modelos matemáticos se deben indicar las dos fases con las que queremos simular, puesto que se ha escogido un modelo multifásico. Para ello se pincha en la pestaña *Materials* y posteriormente en la opción *Create/Edit*, en la ventana que se abre a continuación debe buscarse el material *water-liquid (h2o<l>)* que se encuentra en la base de datos de *Fluent (Fluent Database)* y que se abrirá como una nueva ventana. Una vez seleccionado dicho material se pincha en la opción *Copy*, se cierra la ventana de la base de datos de *Fluent* pinchando en *Close*. De nuevo en la primera ventana que se abrió se pincha en *Change/Create* y para acabar se pincha otra vez en *Close* para cerrarla.

Una vez cargado el material *water-liquid (h2o<l>)* para su uso en la simulación este debe asignarse a alguna de las dos fases que el modelo *Volume of Fluid* trata. Para ello se pincha en la pestaña *Setting Up Physics* que se encuentra en la parte superior de la interfaz. Posteriormente se despliega la pestaña *Phases*, se selecciona *List/Show All* y al aparecer una ventana con las dos fases del modelo se le asigna a la segunda fase el material *water-liquid*.

En la pestaña de *Cell Zone Conditions* se editan las condiciones de operación pinchando en *Operating Conditions*. Donde se establece la presión atmosférica de referencia a 101325 Pa y un punto de referencia que puede ser cualquier punto del dominio ocupado por la fase no líquida, por el aire atmosférico. Adicionalmente se activa la casilla *Specified Operating Density* para trabajar con la densidad del aire constante y se establece a 1,225 Kg/m³ puesto que por la naturaleza del problema en cuestión los cambios de densidad en el aire atmosférico no son significativos.

Pinchando en la pestaña *Boundary Conditions* aparecen todas superficies fronterizas del dominio listadas en el apartado 4.5.1.2. A estas superficies de les asignan las siguientes condiciones de contorno (véase apartado 3.3.4):

- **Inlet:** se le asigna *velocity-inlet*.
- **Outlet:** se le asigna *pressure-outlet*.
- **Outlet atm:** se le asigna *pressure-outlet*.

- **Ground:** se le asigna *wall*.
- **Symetry:** se le asigna *symetry*.
- **Lado:** se le asigna *symetry*.
- **Dragon:** se le asigna *wall*.
- **Outlet dragon:** se le asigna *pressure-outlet*.

Para una correcta generación de las olas en el dominio se edita la condición de contorno *velocity-inlet* que se le asigna a la frontera *Inlet* de la siguiente manera:

- Se activa la casilla *Open Channel Wave BC*.
- En la opción *Averaged Flow Specification Method* se selecciona la opción *Magnitude and Direction*, se introduce una velocidad de la ola de 5 m/s (véase apartado 4.4) y se introduce el vector que indica la dirección de la ola, como por ejemplo (0, 0, -1).
- En la opción *Free Surface Level* se introduce la altura de la superficie libre que es de 5 metros (véanse apartados 4.4 y 4.5.1.1).
- Se genera una ola de 50 metros de *Wave Length* y un metro de *Wave Height* que corresponde a una ola de 50 metros de largo y 2 metros de amplitud (véase apartado 4.4).
- Atendiendo a las características del emplazamiento (véase apartado 4.4), de su oleaje (véase apartado 4.4), y de la geometría del dominio utilizada para las simulaciones (véase apartado 4.5.1.1), se introduce *Short Gravity Waves* en la opción *Wave BC Options* y se selecciona *Wave Theories* en la pestaña *Wave Modeling Options*. Se selecciona *Second Order Stokes* en *Wave Theory* por ser la teoría del oleaje que mejor se adapta a las condiciones del oleaje que se simula (véase apartado 3.2.2 y Figura 13).

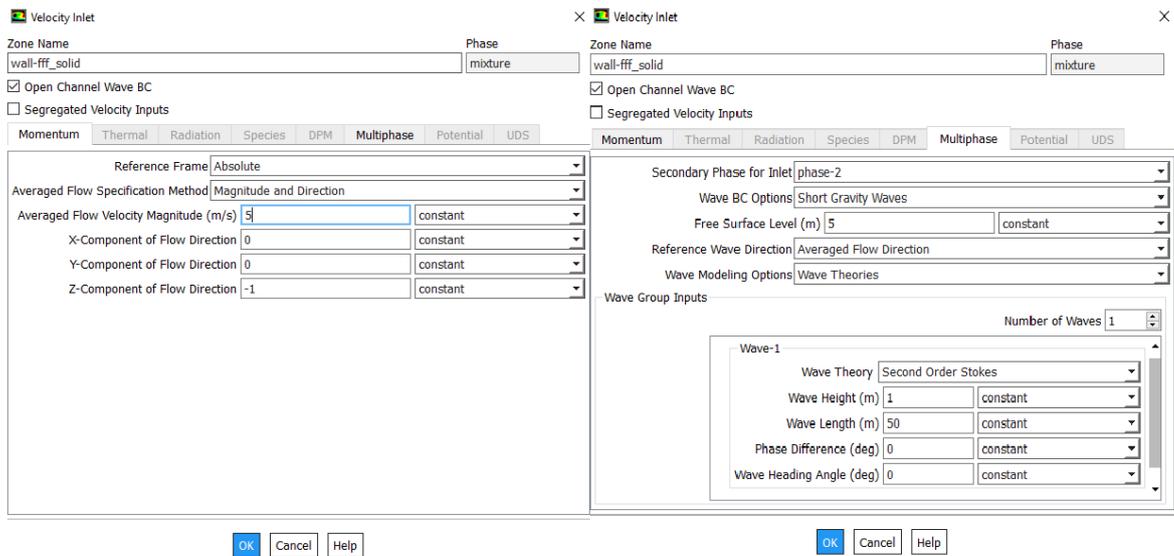


Figura 77 Parámetros de la condición de contorno velocity-inlet para la simulación de la ola. Elaboración propia.

Los parámetros de la ola que se ha configurado para la simulación responden a un ejercicio iterativo de introducir las condiciones del oleaje en el lugar de emplazamiento (véase 4.4) y ejecutar el comando “//define/boundary-conditions/open-channel-wave-settings” (véase apartado 3.3.4.1) el cual entrega información sobre la idoneidad del conjunto de la ola que se quiere generar con la teoría escogida para generarla. Es por este motivo que los parámetros característicos de la ola no se ajustan al ciento por ciento con los consultables en el atlas del oleaje chileno sobre Laguna Verde (véase apartado 4.4). Una vez realizado este ejercicio iterativo, cuando se ejecuta el comando en cuestión aparece un sumario de las características de la ola y el siguiente mensaje que da constancia de la idoneidad de la ola programada con su correspondiente teoría para generarla en el dominio del problema:

```
Checks : passed
Selected wave theory is appropriate for application.
```

Figura 78 Mensaje que aparece en la consola de ANSYS cuando la ola que se quiere simular es idónea para tal fin. Elaboración propia.

Las caras cuya condición de contorno se le asigna *pressure-outlet* se deben editar también para una correcta simulación del problema. Pinchando en la pestaña *Multiphase* en la ventana de edición de dicha condición de contorno se activa la opción *Open Channel* y se introduce la altura de la superficie libre, la cual es 5 metros (véanse apartados 4.4 y 4.5.1.1).

El próximo paso que se debe hacer es selecciona el método con el cual resolver la

dependencia entre presión y velocidad en las ecuaciones de gobierno en forma discretizada, véase apartado 3.3.5. Con tal fin se pincha en la pestaña *Methods* del apartado *Solution* y en la casilla *Pressure-Velocity coupling* se selecciona la opción *PISO*, ya que es un método muy recomendable para todos los cálculos de flujo transitorio, especialmente cuando desea utilizar un paso de tiempo grande. Ofrece resultados más estables y acarrea menos coste computacional (véase apartado 3.3.5).

En todo problema con resolución iterativa las variables deben inicializarse para que se pueda empezar con el cómputo iterativo. Para ello se pincha en la pestaña *Initialization*. Para la simulación en cuestión se selecciona un método híbrido de inicialización, para ello se selecciona *Hybrid Initialization*. Tratándose de una simulación de oleaje se debe seleccionar en la casilla *Compute From* la frontera *Inlet* y en la casilla *Open Channel Initialization Method* se escoge la opción *Flat*. Este tipo de inicialización provocará que se genere una ola en el momento de iniciar la simulación partiendo de una situación sin oleaje, donde la superficie del agua está plana. Para terminar con el proceso de inicialización se debe pinchar en el botón *Initialize*.

El siguiente paso a tener en cuenta en una simulación transitoria como la que se desarrolla es la cantidad de información que se desea extraer. Los pasos de tiempo pueden llegar a ser muy pequeños para que no haya divergencia en el cómputo de la solución y puede llegar a ser contraproducente almacenar información sobre muchas variables de interés en cada paso de tiempo puesto que los valores de las mismas pueden no cambiar de forma significativa en pasos tan pequeños, lo que no resulta informativo (véase apartado 3.3.5). Para controlar este fenómeno se pincha en la pestaña *Calculation Activities* y en la ventana con nombre *Automatic Export* se presiona *Create* y posteriormente *Solution Data Export*. En la ventana que se abre se debe seleccionar en la pestaña *File Type* la opción *CFD-Post Compatible*. Seguidamente se seleccionan las superficies de interés y el tipo de información que se desea de dichas superficies. Por último se selecciona la frecuencia con la que se desea guardar la información que se acaba de seleccionar. Dicha frecuencia dependerá de la precisión que desee el usuario sobre las soluciones así como del paso de tiempo (*Time-step*) que se seleccione para el cómputo de la solución.

Por último se pincha en la pestaña *Run Calculation*, en la cual hay 3 parámetros importantes a ajustar:

- **Time step size:** es el tamaño del paso de tiempo, que se calcula a partir de la condición de *Courant-Friedrichs-Lewy* (véase apartado 3.3.5). Para una velocidad media de 5 m/s estimada en el ducto principal de la simulación y una longitud media de las celdas de la malla estimada como mínimo de 5 milímetros, se tiene un *time step size* de 0,001 segundos según la condición de *Courant-Friedrichs-Lewy*.
- **Number of time steps:** es el número de pasos de tiempo, el cual junto con el

tamaño del paso de tiempo determinarán la duración total de la simulación. Para los propósitos de las simulaciones en este trabajo basta con una simulación de 1,5 segundos, por ello se escogen 1500 pasos para la simulación.

- **Max Iterations/Time Step:** es el número máximo de iteraciones permitidas para resolver cada paso de tiempo. Dicho número de iteraciones se alcanza siempre en cada paso de tiempo a excepción de si los residuales cumplen el criterio de convergencia que por defecto es de 0,001. De forma empírica a partir de la resolución de varias simulaciones de prueba realizadas en el contexto de este trabajo se ha determinado que 70 iteraciones por cada paso de tiempo es un número adecuado, puesto que los residuales en cada paso de tiempo han sido de orden muy bajo (entre 0,01 y 0,001) y en muchos de los casos los residuales han alcanzado el criterio de convergencia antes de este número (véase apartado 3.3.5).

Determinadas estas condiciones de cómputo de solución y atendiendo a la dinámica del problema en cuestión se establece que la frecuencia de almacenaje de información debe ser cada 50 pasos de tiempo, lo que es lo mismo que 0,05 segundos.

Los pasos para configurar la simulación llegan a su fin, por último sólo se debe pinchar en la pestaña *Calculate* en la pestaña *Run Calculation*. Si toda la configuración de la simulación es la adecuada cuando esta termine los resultados de la misma se podrán visualizar desde la pestaña *Results* del esquemático del proyecto en el *Workbench*.

4.5.2. Análisis de sensibilidad

Los análisis de sensibilidad son una parte fundamental en las simulaciones de *CFD* puesto que dan información sobre que tan bueno es el mallado que se ha hecho para la geometría desde diferentes puntos de vista:

- Des del punto de vista de cuan precisa es la malla, es decir, si se debe refinar con elementos más pequeños para obtener información verdaderamente fiable de la simulación.
- Des del punto de vista de cuan óptima es la malla, puesto que refinar una malla por encima de cierto valor no añadirá fiabilidad a los resultados pero si incrementará muchísimo el coste computacional lo cual no es deseado.

La metodología para llevar a cabo dicho análisis de sensibilidad consiste en elaborar varias simulaciones con diferentes mallados del mismo modelo, unas mallas más cargadas de elementos o más refinadas en puntos clave del problema que en otras, y comparar los resultados de dichas simulaciones para ver qué diferencias presentan, poniendo así en tela

de juicio qué mallado es más óptimo en relación con la fiabilidad de los resultados y el coste computacional que acarrea. Para este análisis de sensibilidad se tendrán en cuenta los siguientes parámetros de mallado:

- Número de elementos.
- Número de nodos.
- Ancho de la primera capa: distancia entre la superficie sólida del dragón y el primer nodo de la malla que se controla a través del método de mallado *interpolation* (véase apartado 3.3.2.1)
- Calidad Ortogonal y calidad ortogonal media (véase apartado 3.3.2).
- Oblicuidad media (véase apartado 3.3.2).

Las variables de interés que se tienen en cuenta para el análisis de sensibilidad son las siguientes:

- Velocidad media en la frontera *outlet dragon* [m/s].
- Presión total media en la frontera *outlet dragon* [Pa]. La presión total en ANSYS o *total pressure* se define de la siguiente forma: $Total\ pressure = operating\ pressure + static\ pressure + dynamic\ pressure$.
- Y-plus medio en la frontera de interés *Dragon* (véase apartado 3.3.3.3).

Se someten al análisis de sensibilidad dos mallados. El mallado denominado A presenta 1.181.665 elementos y para llevarlo a cabo se aplica un método de mallado *sizing* en todo el dominio donde el parámetro *Max Face Size* vale 65 mm y el parámetro *Max Tet Size* 130 mm. A parte de esta técnica de mallado también se aplica un *inflation* para controlar el ancho de la primera capa. El *inflation* es del tipo *First Layer Thickness* con un valor de ancho de primera capa de 1,4 milímetros y un *growth rate* de 1,2.

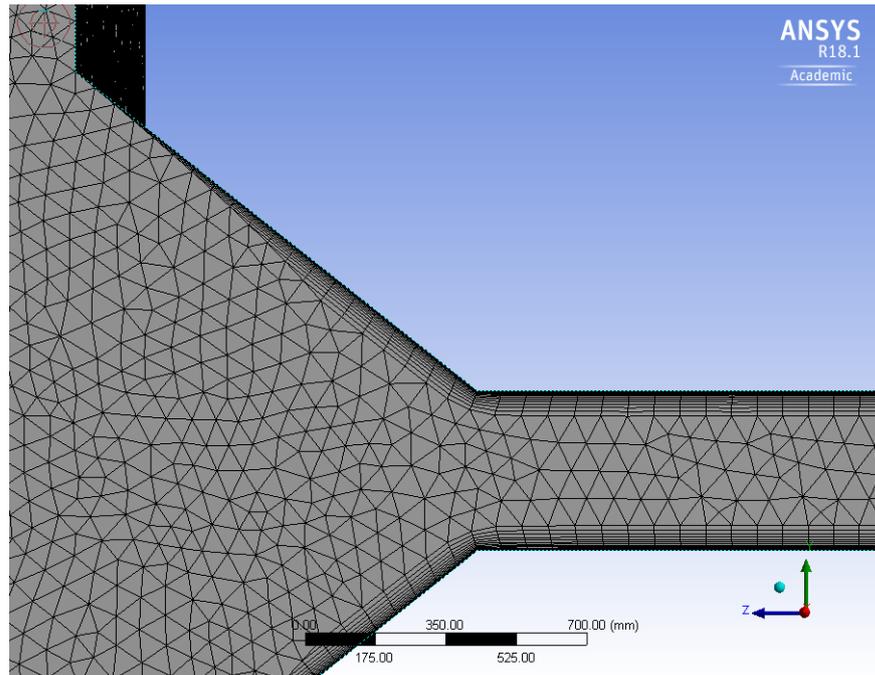


Figura 79 *Mallado A. Atrapa-olas y ducto principal visto desde la cara de simetría. Elaboración propia.*

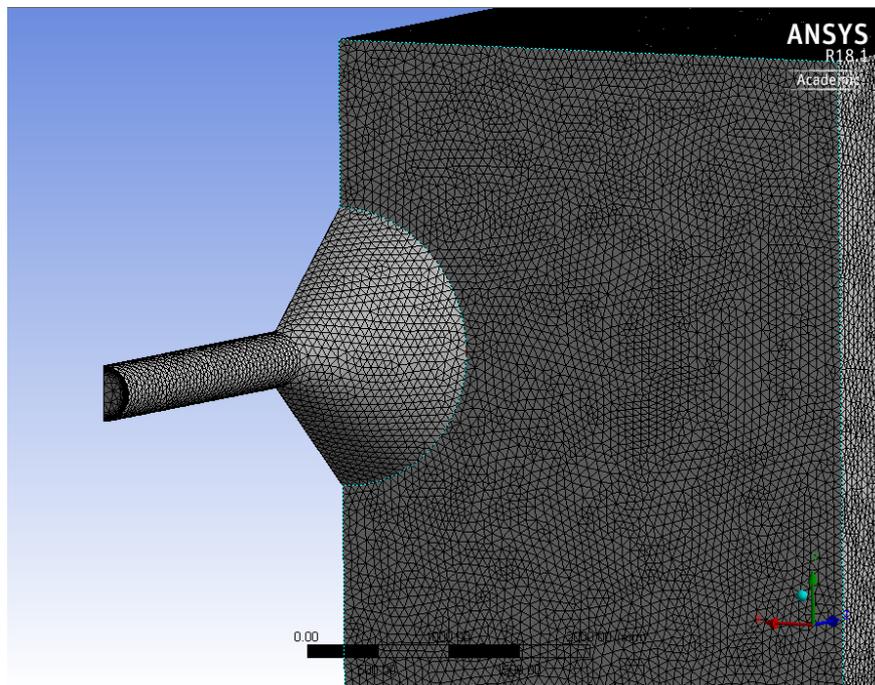


Figura 80 *Mallado A. Atrapa-olas, ducto principal y parte del dominio donde se generan las olas. Elaboración propia.*

El mallado *B* tiene 2.051.396 elementos. Para llevarlo a cabo se aplica un método de mallado *sizing* en todo el dominio dónde el parámetro *Max Face Size* vale 50 milímetros y otro método *sizing* específicamente en la cara *dragon* asignando un valor de 20 milímetros al parámetro *Element Size*. A parte de esta técnica de mallado también se aplica un *inflation* para controlar el ancho de la primera capa. El *inflation* es del tipo *First Layer Thickness* con un valor de ancho de primera capa de 1 milímetro y un *growth rate* de 1,2.

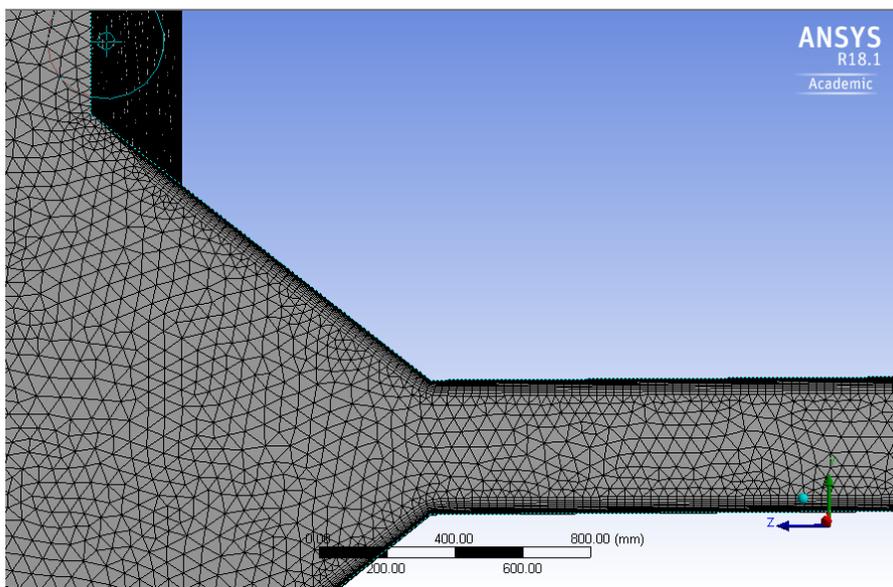


Figura 81 Mallado B. Atrapa-olas y ducto principal visto desde la cara de simetría. Elaboración propia.

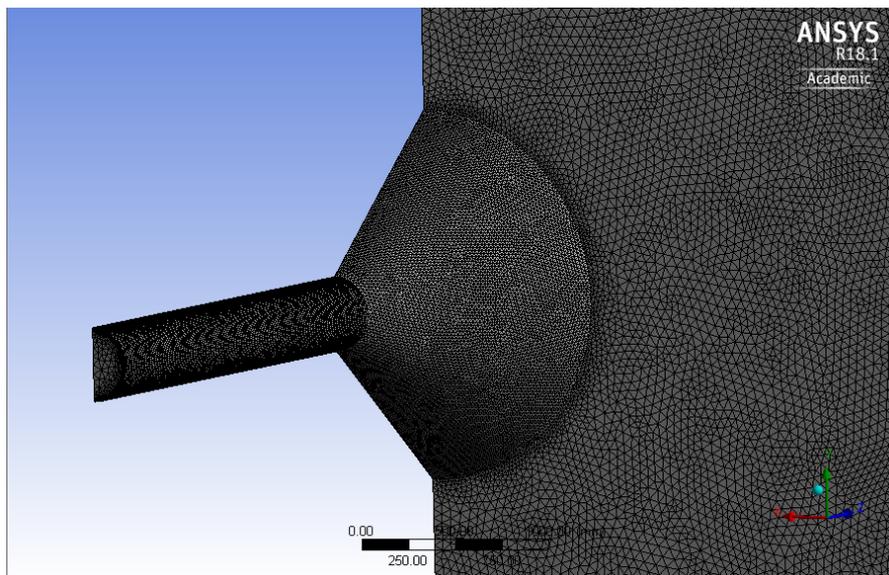


Figura 82 Mallado A. Atrapa-olas, ducto principal y parte del dominio donde se generan las olas. Elaboración propia.

La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros de las diferentes mallas que se han sometido a análisis de sensibilidad:

Malla	Parámetros de malla					
	N° elementos	N° nodos	Ancho de primera capa en mm	Calidad ortogonal media	Calidad ortogonal mínima	Oblicuidad media
A	1181665	227155	1,4	0,77533	1,54E-02	0,22313
B	2051396	476178	1	0,78322	3,31E-02	0,21525
Diferencia en %	73,60%	109,63%	28,57%	1,02%	114,56%	3,53%

Figura 83 Tabla resumen de los parámetros de diferentes mallas para el análisis de sensibilidad. Elaboración propia.

Los valores que toman las variables de interés para ambas mallas en el segundo 0,45 de simulación son los siguientes:

Malla	Variables de interés				Coste temporal por paso de tiempo [minutos]	Coste temporal por simulación [días aprox.]
	Velocidad media outlet dragon [m/s]	Presión total media outlet dragon [Pa]	Y-plus medio en el dragon			
A	1,49	3152,13	68,55		25	26,04
B	1,51	3130,54	32,39		45	46,88
Diferencia en %	1,34%	0,68%	52,76%		80,00%	80,00%

Figura 84 Tabla resumen de los valores que toman las variables de interés de diferentes mallas para el análisis de sensibilidad. Elaboración propia.

Analizando la Figura 83 y la Figura 84 se ve a simple vista que a pesar que entre la malla A y la malla B hay una clara diferencia en cuanto a parámetros de mallado, esta diferencia no repercute de forma significativa en los resultados de las variables de interés, al menos no en la velocidad media ni en la presión total en el *outlet del dragon*. El *y-plus* medio es una variable de interés que en cambio sí que se ve afectada, lo cual está estrechamente relacionado en que en el mallado A el ancho de primera capa sea 1,2857 veces superior al del mallado B. Para entender mejor este fenómeno se analiza más a fondo:

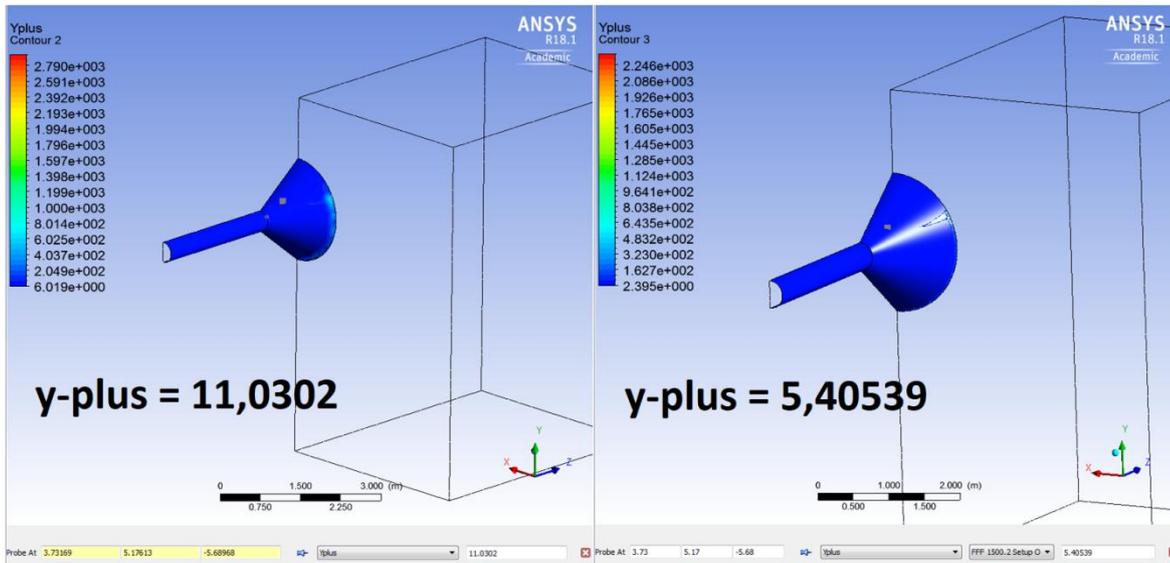


Figura 85 Comparación de valores de *y-plus* en el punto (X:3.73, Y:5.17, Z:-5.68) del dominio. La imagen de la izquierda corresponde a la malla A, la de la derecha a la B. Elaboración propia.

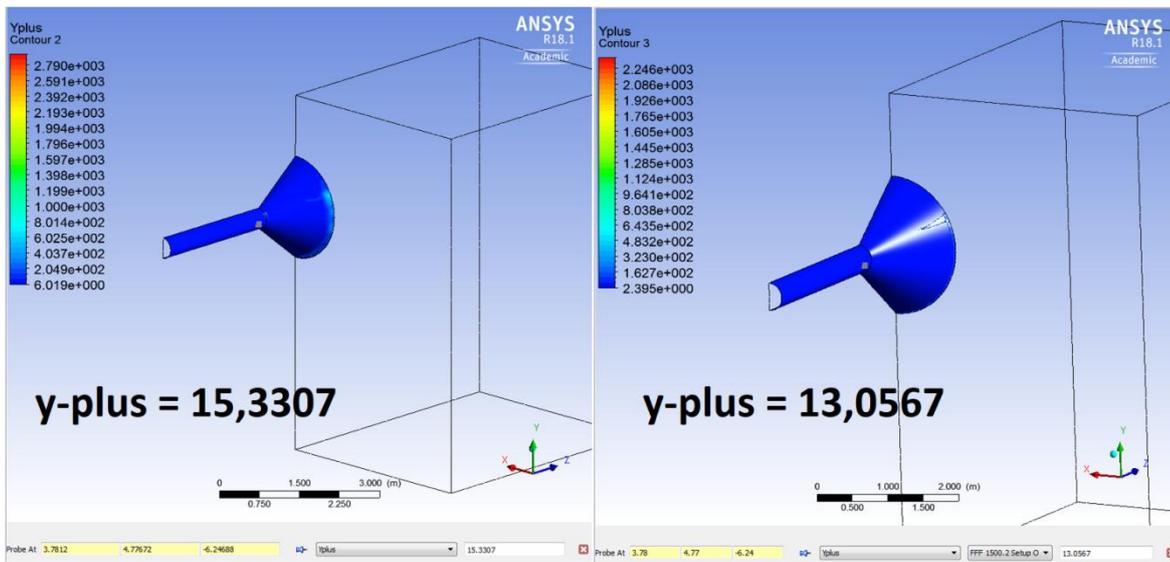


Figura 86 Comparación de valores de *y-plus* en el punto (X:3.78, Y:4.77, Z:-6.24) del dominio. La imagen de la izquierda corresponde a la malla A, la de la derecha a la B. Elaboración propia.

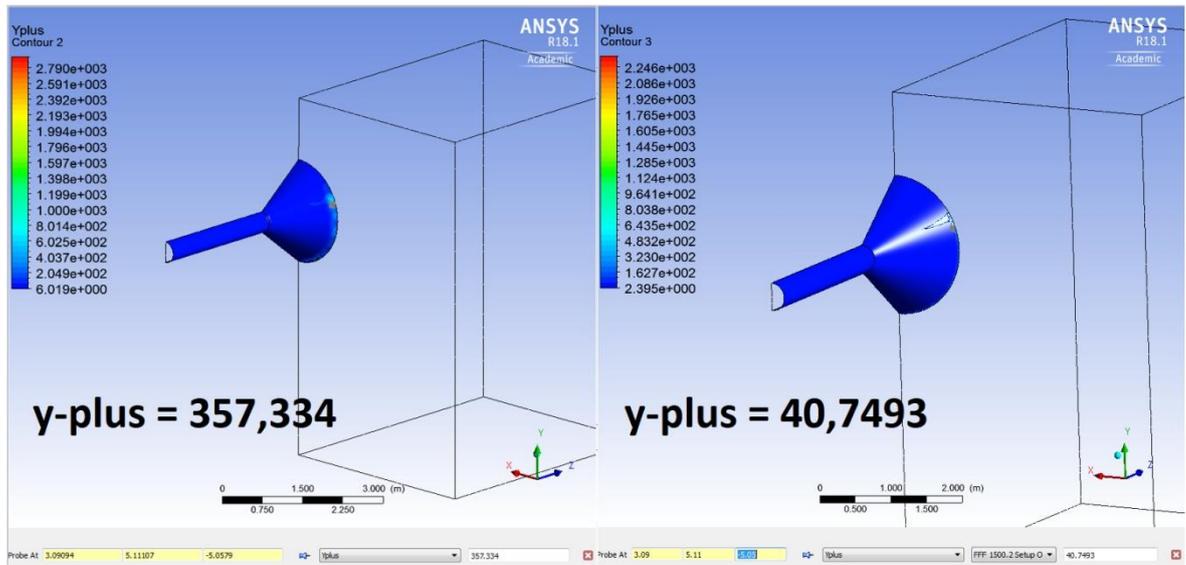


Figura 87 Comparación de valores de *y-plus* en el punto (X:3.09, Y:5.11, Z:-5.05) del dominio. La imagen de la izquierda corresponde a la malla A, la de la derecha a la B. Elaboración propia.

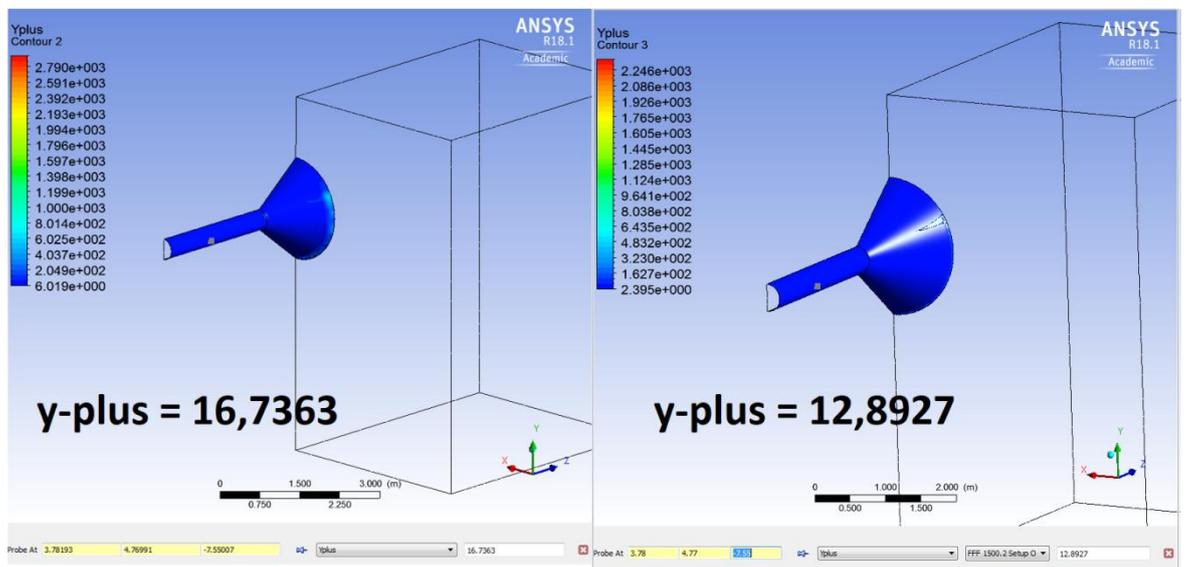


Figura 88 Comparación de valores de *y-plus* en el punto (X:3.78, Y:4.77, Z:-7.55) del dominio. La imagen de la izquierda corresponde a la malla A, la de la derecha a la B. Elaboración propia.

Examinando las figuras que se han expuesto, se ve claramente como la diferencia de *y-plus*

entre ambos mallados no es realmente del 52,76% tal y como sugiere la Figura 84. La explicación de este fenómeno se encuentra en la Figura 87, ya que para el mallado A existen unos pocos subdominios en la entrada del atrapa-olas dónde los valores de $y-plus$ se disparan, haciendo así que la media de $y-plus$ a lo largo de la frontera *dragon* también lo haga mientras en todos los subdominios restantes los valores de $y-plus$ no son tan distintos. Este hecho es debido a la combinación de dos factores:

- El método de mallado *inflation* se degrada en la región de entrada del atrapa-olas, dando un peor control del ancho de primera capa en dicha región tal y como se puede ver en la Figura 79 y la Figura 81.
- El mallado A tiene un menor número de elementos, por ende tiene elementos más grandes, más aún cuando el mallado B tiene un método *sizing* aplicado solamente a la frontera *dragon*.

Los dos factores expuestos hacen que en la entrada del atrapa-olas el mallado B sea de mayor calidad que el mallado A. Aún así en el resto del atrapa-olas los valores de $y-plus$ son más que aceptables a fin de utilizar un modelo matemático k-omega SST (véase 3.3.3.5).

Por otra parte, el coste temporal estimado (Figura 84) lo proporciona ANSYS y normalmente el valor real es un poco inferior en tanto que el valor que ofrece corresponde al cómputo temporal de todas las iteraciones que se han indicado por paso de tiempo, pero en realidad hay muchos pasos de tiempo en los que los residuales cumplen el criterio de convergencia, momento en el cual el programa salta a calcular el siguiente paso de tiempo. Se resalta que este coste computacional depende no solo de la complejidad del problema a resolver sino del procesador del cual se dispone. Las simulaciones que se realizan en el marco de este trabajo no son triviales, puesto que son simulaciones en régimen transitorio con olas y que incluyen dos modelos matemáticos, uno para la interacción entre fases y el otro para la interacción líquido-sólido. Por este mismo motivo y por la baja capacidad computacional de la cual se dispone para los fines del trabajo el coste temporal de simular un segundo y medio del problema asciende aproximadamente a 26 días en el caso de la malla A y 47 días en el caso del mallado B. Estos altos costes temporales suponen un desafío en el marco del trabajo por el alcance del mismo, por este mismo motivo se concentran muchos esfuerzos a obtener resultados fiables sobre las simulaciones al menor coste computacional posible, lo cual implica en muchas ocasiones dificultades a la hora de calcular la solución, ya sea porque el paso de tiempo escogido es demasiado grande o porque la malla tiene demasiados pocos elementos.

Como conclusión final de este análisis de sensibilidad se tienen los siguientes puntos:

- El número y tamaño de elementos de la malla A es suficiente como para obtener resultados fiables de las variables de interés a un coste computacional asumible

para el alcance de este trabajo.

- Con la finalidad de mejorar los valores de *y-plus* en la entrada del atrapa-olas como en todo el mismo se decide que el valor de ancho mínimo de primera capa no debe ser superior a 1 milímetro.

4.5.3. Dragón de mar 1.0

El primer diseño de atrapa-olas sigue las pautas de los diseños elaborados por Eliecer Cabrera Fernández en su memoria pero adaptándolo a las circunstancias y al oleaje del punto de instalación en punta Curaumilla. Atendiendo a las características del oleaje en el lugar de emplazamiento dónde la amplitud de la ola que se simula tiene 2 metros se decide por ende que el diámetro del atrapa-olas debe ser también de 2 metros para aprovechar al máximo la energía contenida en la misma. Con esta condición y la de que el ducto principal debe ser lo suficientemente largo como para que el perfil de velocidades sea completamente desarrollado (véase apartado 253.1.6) se genera la siguiente geometría de atrapa-olas para el primer modelo bautizado como *Dragón de mar 1.0*.

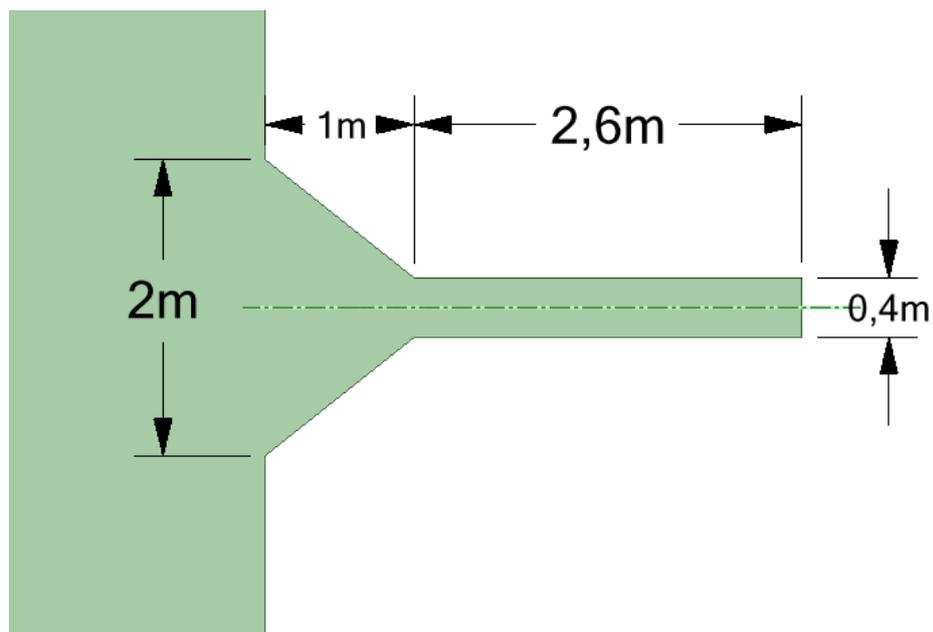


Figura 89 Geometría del modelo Dragón de mar 1.0. Elaboración propia.

Para el mallado de la geometría de la Figura 89 se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation First Layer Thickness			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	1	13	1,2	1 182 274

Figura 90 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 1.0. Elaboración propia.

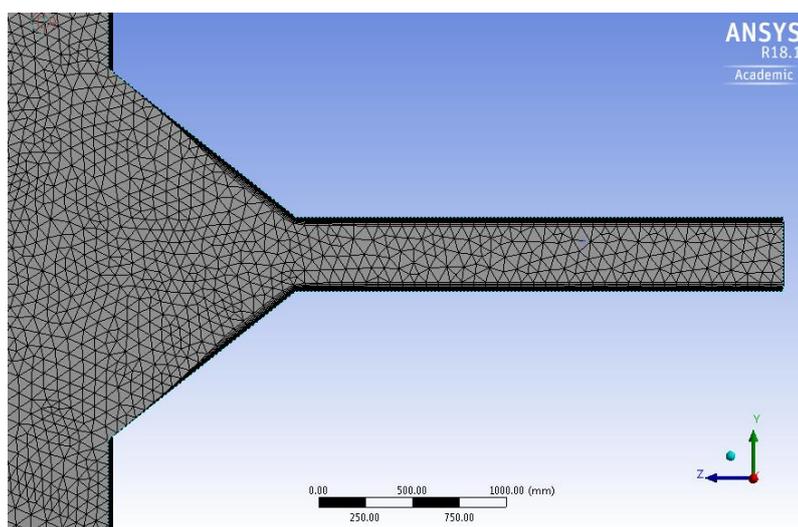


Figura 91 Malla resultante del Dragón de Mar 1.0. Elaboración propia.

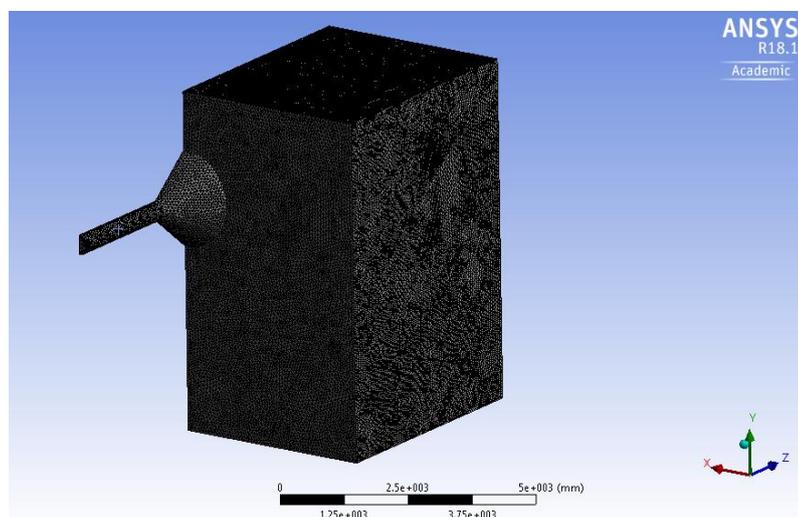


Figura 92 Malla resultante del Dragón de Mar 1.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo donde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los

siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
13038,4	8986,54	4,44	3,69	44,17

Figura 93 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 1.0. Elaboración propia.

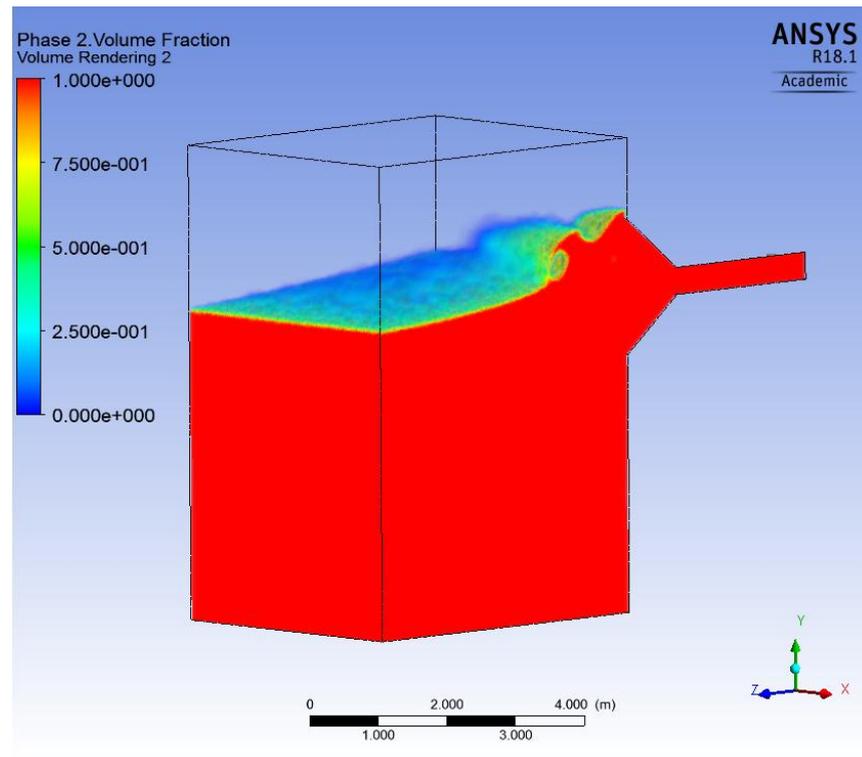


Figura 94 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

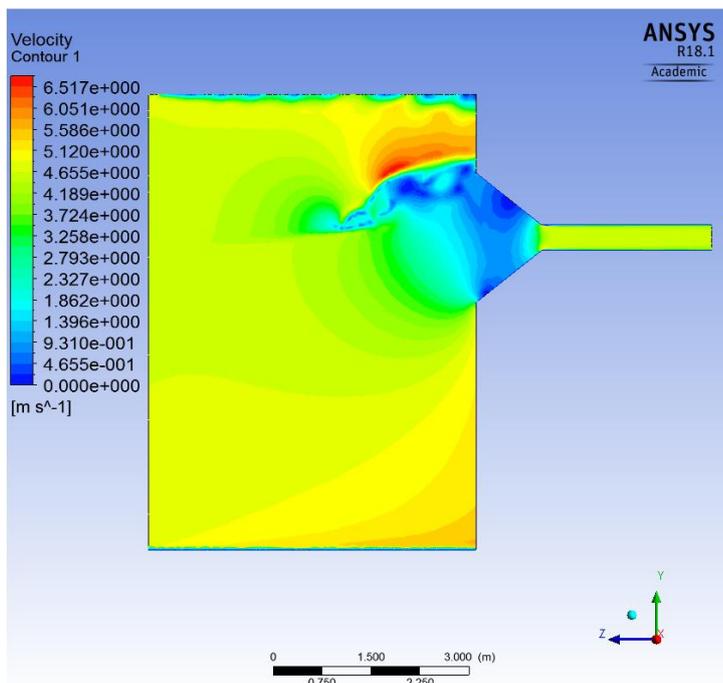


Figura 95 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

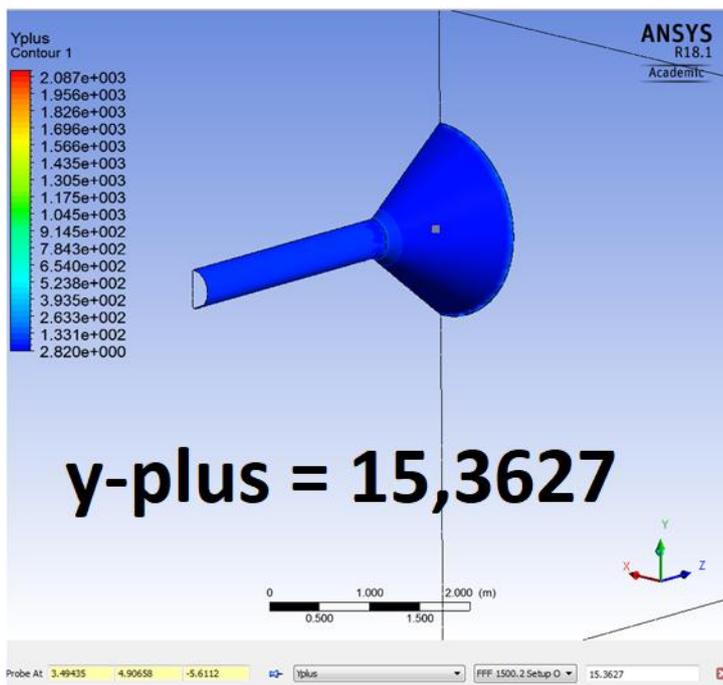


Figura 96 Gráfico de contornos del y-plus en la frontera dragon y el valor del y-plus en el punto del dominio (3,46; 4,95; -5,61). Elaboración propia.

Como aspecto a recalcar sobre el resultado de las simulaciones es que el y -plus medio en la frontera *dragon* es de 44,17 (véase Figura 93) lo cual es un valor bastante alto, pero de hecho tal y como se ve en la Figura 96 este valor de y -plus medio es debido a que en la entrada del atrapa-olas el método de mallado *inflation* se degrada dando como resultado valores muy altos de y -plus en la entrada del atrapa-olas pero no en las otras regiones (véase apartado 4.5.2).

Para estimar la altura de bombeo de una ola en el modelo *Dragón de mar 1.0* se utiliza la ecuación de conservación de la energía (17) primeramente de forma ideal, es decir, sin tener en cuenta las pérdidas por fricción ni por singularidades. Considerando el flujo fluido como estacionario se aplica la ecuación de *Bernoulli* para el cálculo de dicha altura de bombeo. Se utilizan la velocidad media del fluido y la presión total media del fluido en la frontera *outlet dragon*. De esta manera se tiene:

$$z_2 = \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{P_1}{g \cdot \rho} = 1,61 \text{ m} \quad (83)$$

Seguidamente y atendiendo a que idealmente el flujo fluido va a elevarse una altitud de 1,61 metros se calculan las pérdidas por fricción que acarrea el bombeo de agua a dicha altura. Para hacerlo se utiliza la Figura 7 para hallar el factor de fricción adimensional de Darcy y la expresión (29) para el cálculo propio de las pérdidas por fricción teniendo en cuenta que:

- La rugosidad de las paredes de PVC con la cuales se construye el modelo real tienen un coeficiente de rugosidad de $1,5 \cdot 10^{-6}$ m.
- Aplicando la expresión (26) con los valores obtenidos de la simulación se tiene un valor de número de *Reynolds* de 1500000.

De esta manera el factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,011 y las pérdidas por fricción en el ducto de 0,031 m.c.f. Así la altura media real estimada de bombeo de este dispositivo es de 1,58 metros.

4.5.4. Dragón de mar 2.0

Para optimizar el modelo de atrapa-olas propuesto en la memoria de Eliecer Fernández Cabrera se decide empezar por aumentar la longitud del atrapa-olas puesto que en el análisis de los resultados del modelo *Dragón de mar 1.0* se aprecia como la ola impacta fuertemente contra el dispositivo hecho que puede generar muchas pérdidas de energía. Por este motivo se genera la siguiente geometría con una longitud de atrapa-olas de 2 metros:

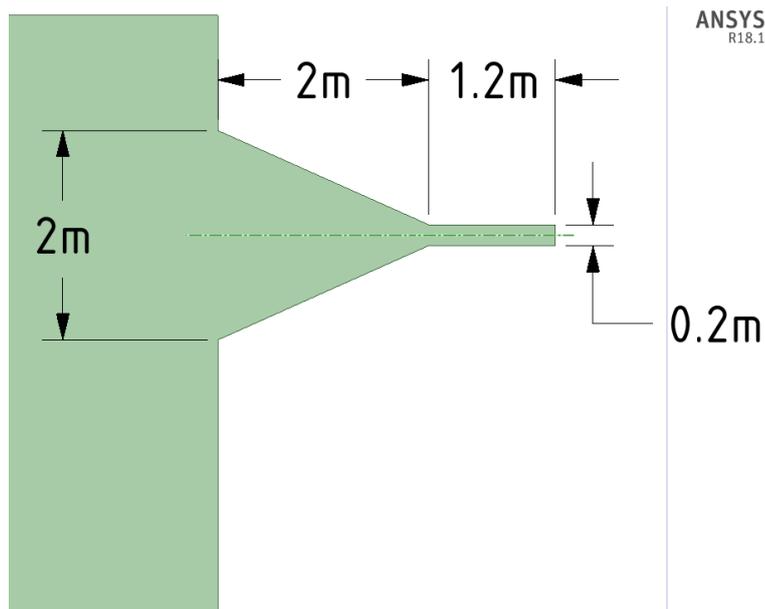


Figura 97 Geometría del modelo Dragón de mar 2.0. Elaboración propia.

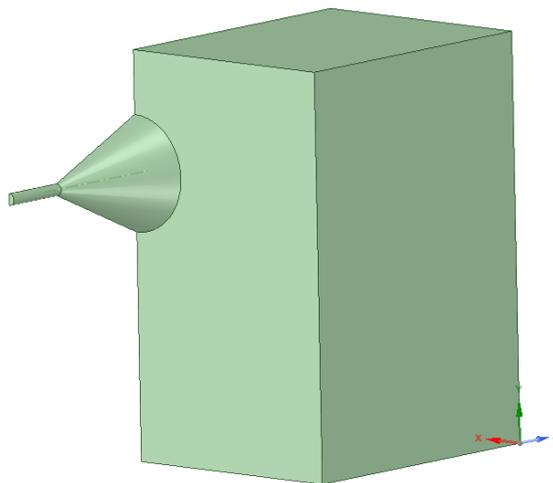


Figura 98 Geometría del modelo Dragón de mar 2.0. Elaboración propia.

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation First Layer Thickness			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	1	11	1,2	1 184 470

Figura 99 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 1.0. Elaboración propia.

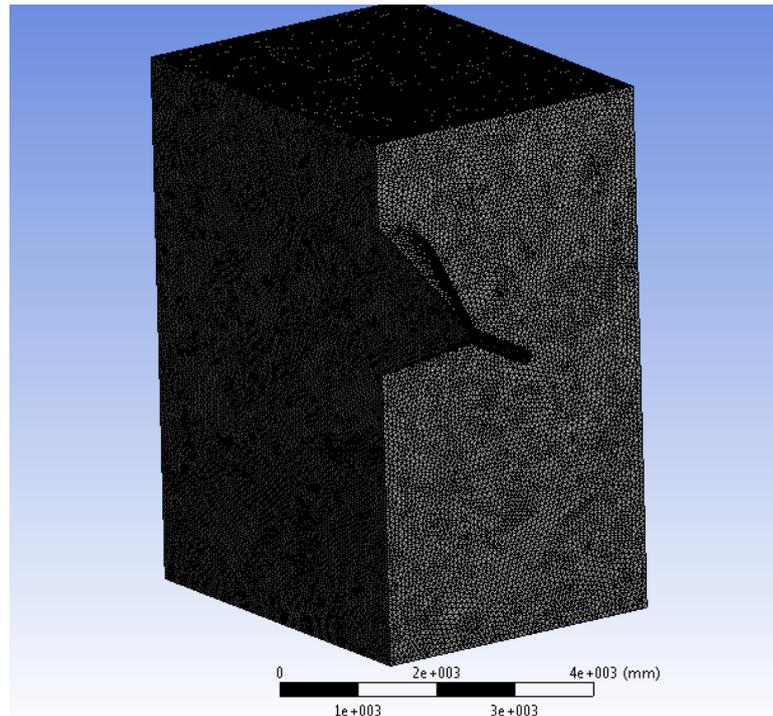


Figura 100 Malla resultante del Dragón de Mar 2.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 1,05 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera
16026,4	11756,3	5,40	4,52	52,06

Figura 101 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 2.0. Elaboración propia.

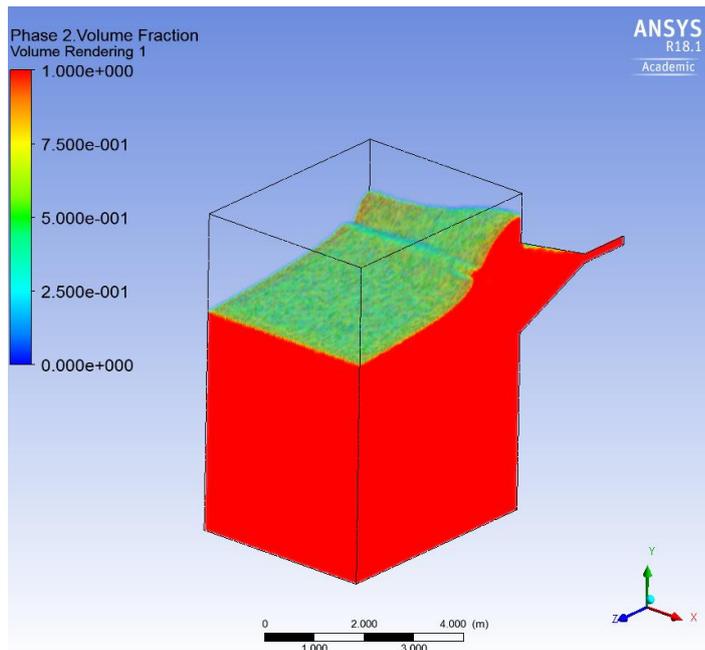


Figura 102 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

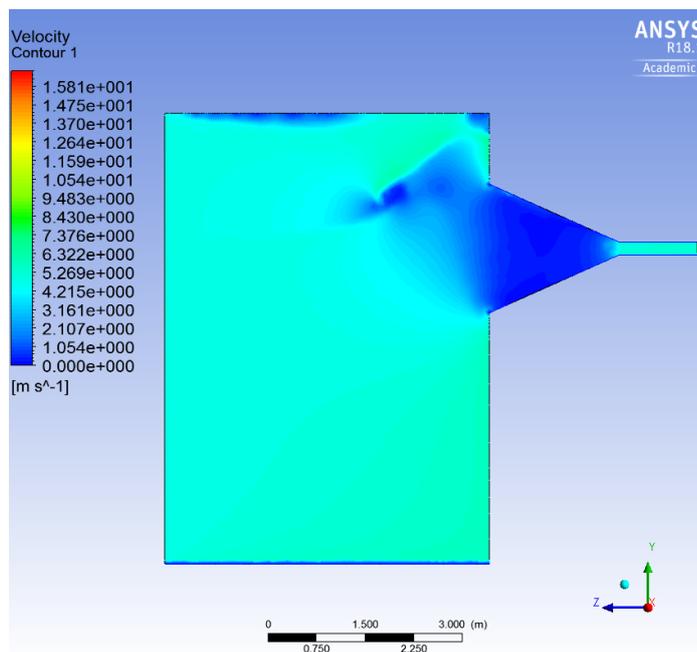


Figura 103 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

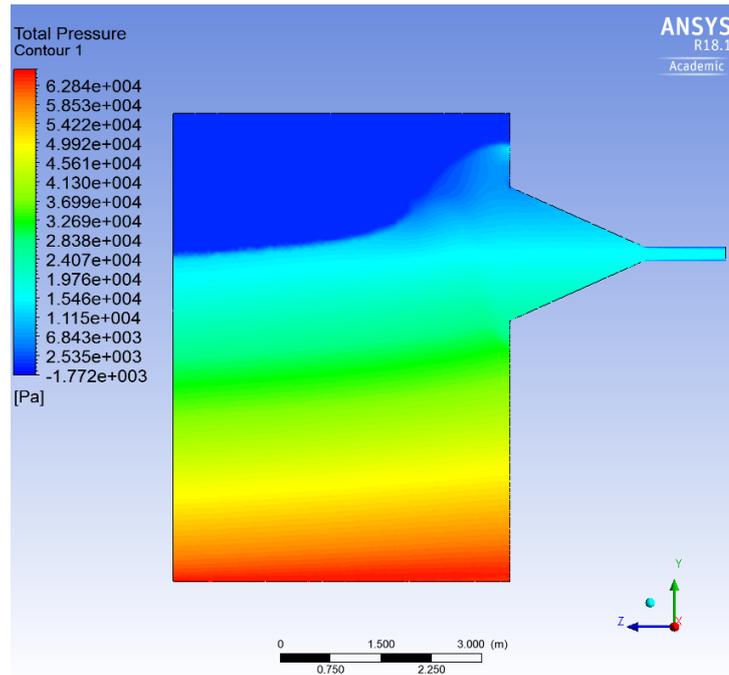


Figura 104 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

Si se establece una comparación entre los resultados de las variables de interés del modelo *Dragón de Mar 1.0* con el modelo *Dragón de Mar 2.0* se tiene:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 1.0	13038,4	8986,5	4,44	3,69
Dragón 2.0	16026,4	11756,3	5,40	4,52
Diferencia en %	22,92%	30,82%	21,55%	22,48%

Figura 105 Comparación de los resultados de los modelos *Dragón de Mar 1.0* y *Dragón de Mar 2.0*. Elaboración propia.

Los resultados del modelo *Dragón de Mar 2.0* son favorables puesto que tanto el valor de la velocidad como la presión en la frontera *outlet dragon* son significativamente superiores que en el modelo *Dragón de mar 1.0*. Todo apunta a que cuan más largo sea el atrapa-olas menos impactará la ola contra el dispositivo, perdiéndose entonces menos energía por el choque y siendo capaz de bombear agua a mayor altura. Aún así un atrapa-ola excesivamente largo podría ser contraproducente por la fricción que experimentan las olas con las paredes del mismo. La altura estimada de bombeo para una ola en este caso y de forma ideal es de 2,24 metros según la expresión (78) y utilizando los valores medios de la

presión y velocidad en la frontera *outlet dragon*. Aplicando el mismo procedimiento que en el apartado anterior para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 900000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,14 m.c.f

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 2,10 metros.

4.5.5. Dragón de Mar 3.0

Para ver como interactúa la relación de diámetros existente entre los extremos del atrapa-olas se decide elaborar un diseño igual al *Dragón de Mar 1.0* pero con un diámetro de ducto principal inferior. De esta manera se le asigna un valor de 200 milímetros al ducto principal teniendo la siguiente geometría:

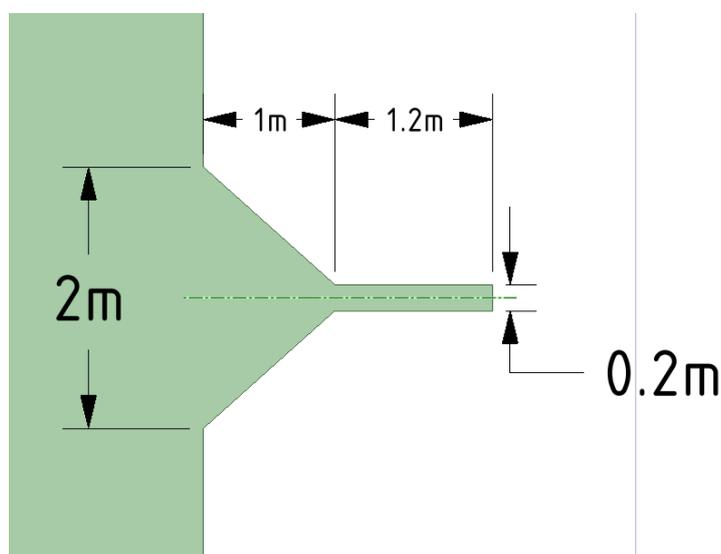


Figura 106 . Geometría del modelo Dragón de mar 3.0. Elaboración propia.

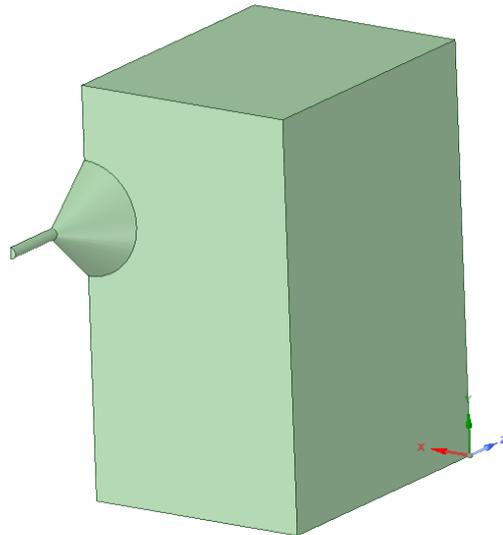


Figura 107 Geometría del modelo Dragón de mar 3.0. Elaboración propia.

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los modelos anteriores ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	0,7	13	1,2	1 269 922

Figura 108 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 3.0. Elaboración propia.

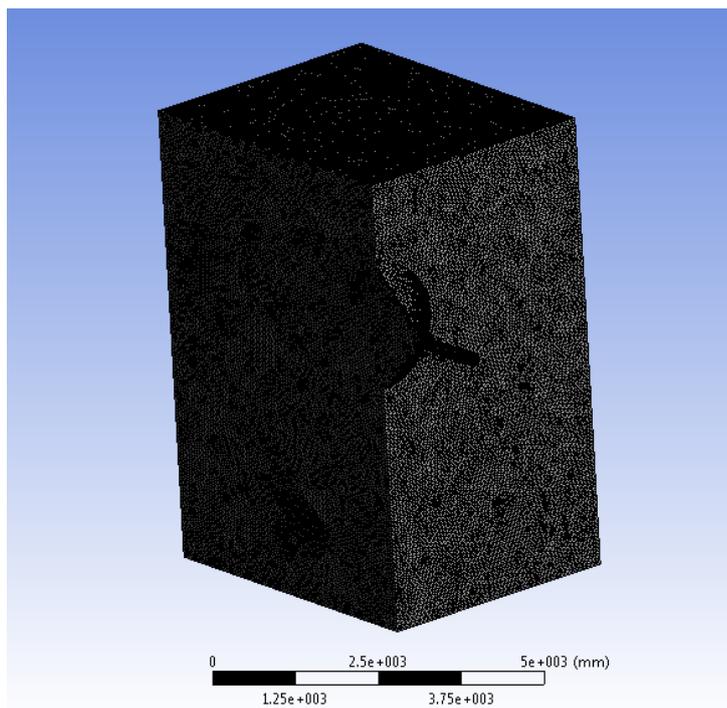


Figura 109 Malla resultante del Dragón de Mar 3.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 1 segundo dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
16349,4	10781,1	5,47	4,29	61,85

Figura 110 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 3.0. Elaboración propia.

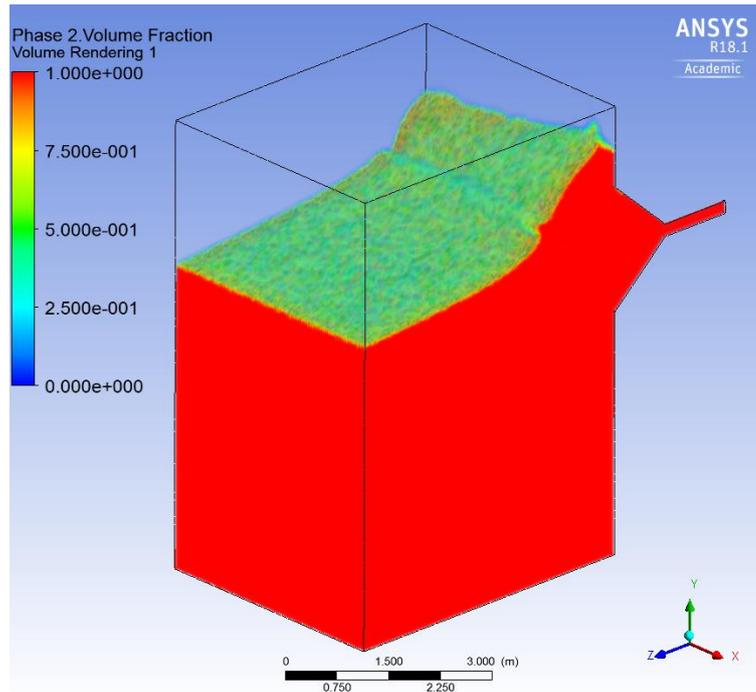


Figura 111 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

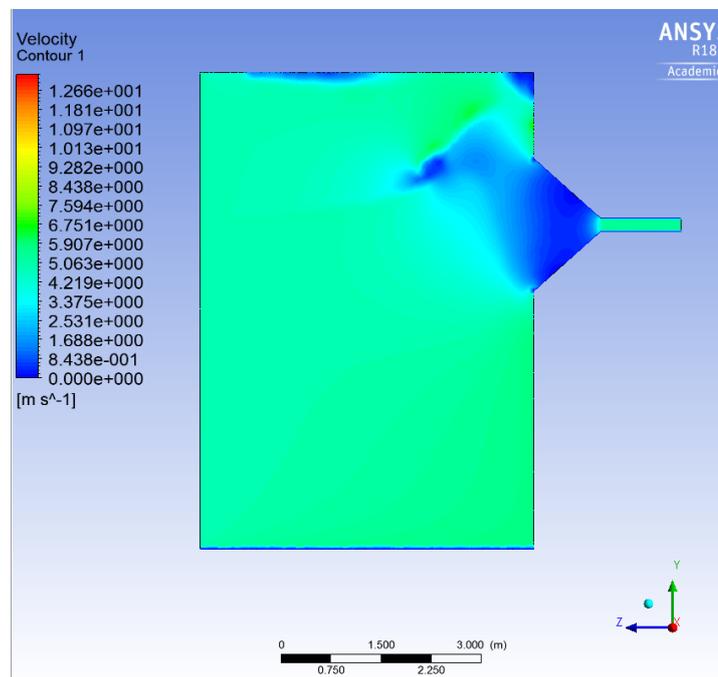


Figura 112 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

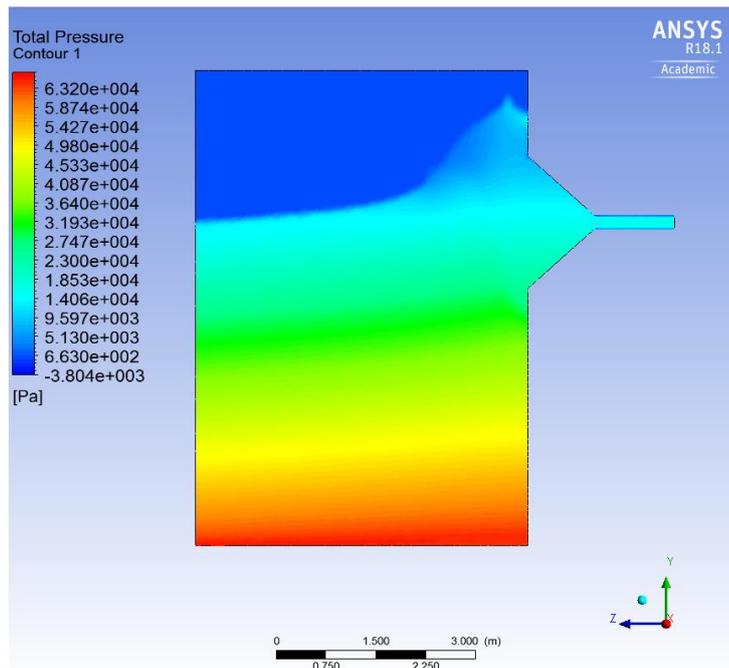


Figura 113 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

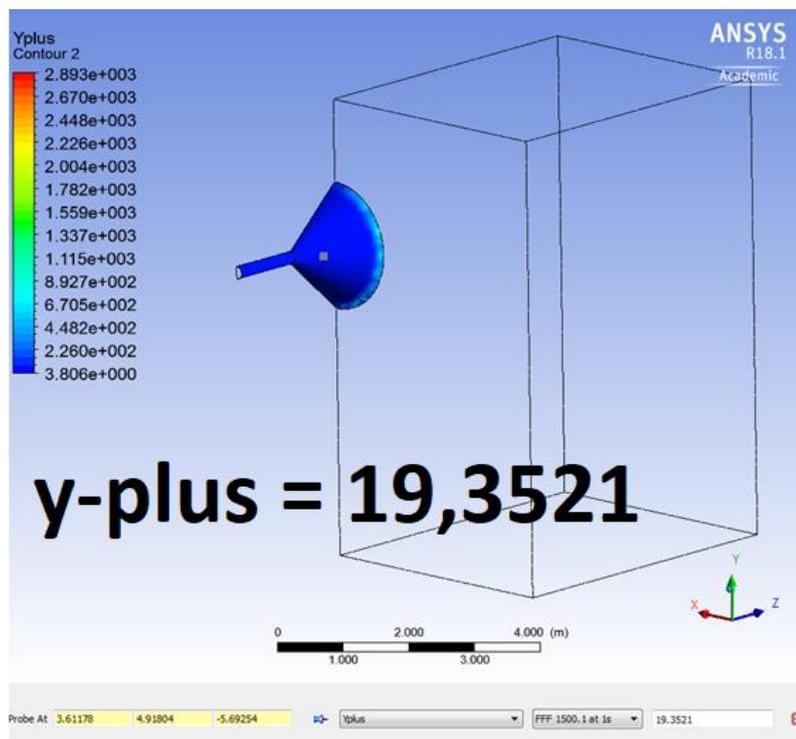


Figura 114 Gráfico de contornos del y-plus en la frontera dragon y el valor del y-plus en el punto del dominio (3,61; 4,91; -5,69). Elaboración propia.

Si se establece una comparación entre los resultados de las variables de interés del modelo *Dragón de Mar 1.0* con el modelo *Dragón de Mar 3.0* se tiene:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 1.0	13038,4	8986,5	4,44	3,69
Dragón 3.0	16349,4	10781,1	5,47	4,29
Diferencia en %	25,39%	19,97%	23,18%	16,37%

Figura 115 Comparación de los resultados de los modelos *Dragón de Mar 1.0* y *Dragón de Mar 3.0*. Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos para el *Dragón de Mar 3.0* y aplicando la expresión (78) con los valores de velocidad media y presión total media se obtiene una altura de bombeo ideal para una ola de 2,04 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 850000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,115 m.c.f.

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 1,92 metros.

La reducción de la sección del ducto principal afecta positivamente tanto a la velocidad como a la presión total del fluido pero negativamente en cuanto a las pérdidas de carga por fricción puesto que han aumentado considerablemente en comparación al *Dragón de Mar 1.0* a causa del estrechamiento del ducto.

4.5.6. Dragón de Mar 4.0

El siguiente paso que se da en pos de optimizar la geometría del dispositivo es convertir la transición recta entre atrapa-olas y ducto principal en una transición suavizada a través de un redondeo con radio de 2,866 metros. El objetivo de esta simulación es lograr determinar si una transición más suave entre atrapa-olas y ducto principal es beneficiosa en cuanto a minimizar las pérdidas que se producen cuando la ola choca con el dispositivo de bombeo.

Se introducen a la geometría todos los cambios que han probado ser beneficiosos en las simulaciones anteriores, es decir, un atrapa-olas de 2 metros de largo con un ducto principal de 200 milímetros de diámetro. Así geometría resultante del *Dragón de Mar 4.0* es la siguiente:

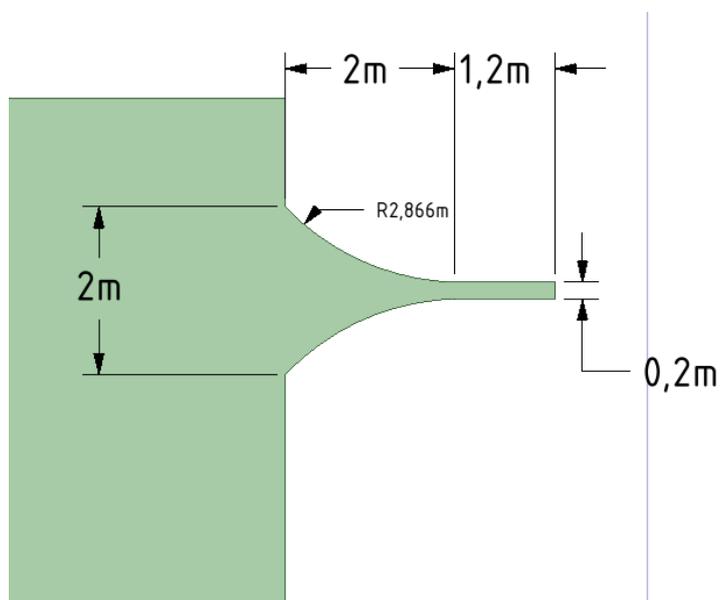


Figura 116 Geometría del modelo Dragón de mar 4.0. Elaboración propia.

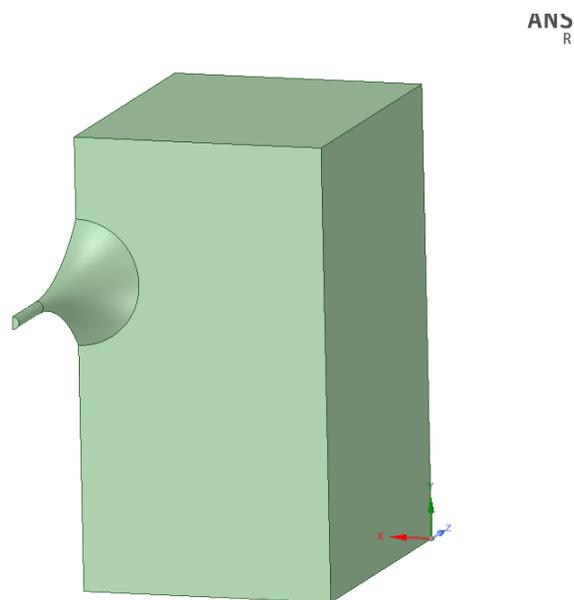


Figura 117 Geometría del modelo Dragón de mar 4.0. Elaboración propia

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo también se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los primeros modelos ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	0,7	13	1,2	1 223 666

Figura 118 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 4.0. Elaboración propia.

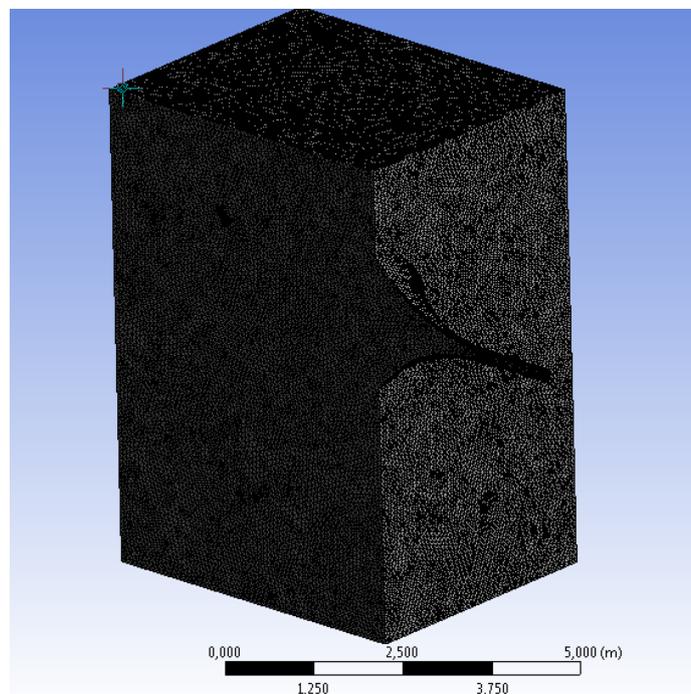


Figura 119 Malla resultante del Dragón de Mar 4.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 0,95 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
14484,7	10622,7	5,35	4,32	62,33

Figura 120 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 4.0. Elaboración propia.

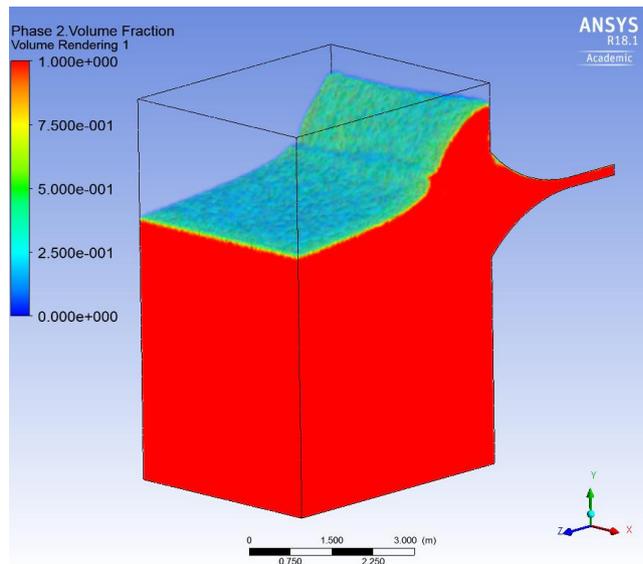


Figura 121 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

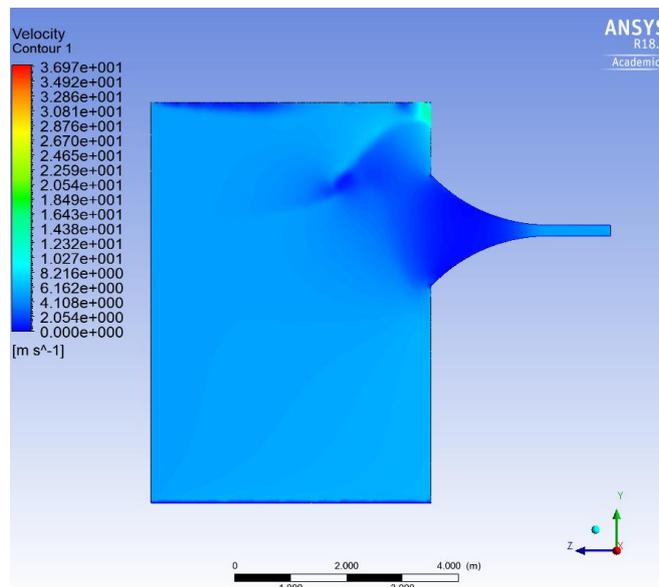


Figura 122 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

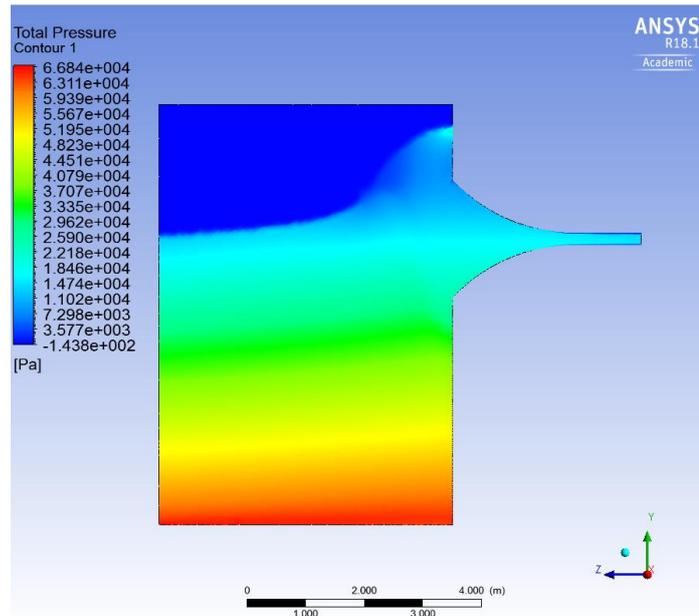


Figura 123 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

Al ser el *Dragón de Mar 4.0* un modelo híbrido entre los modelos 2.0 y 3.0 se hace una comparación del mismo entre ambos. Los resultados son los que siguen:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 2.0	16026,4	11756,3	5,40	4,52
Dragón 4.0	14484,7	10622,7	5,35	4,32
Diferencia en %	-9,62%	-9,64%	-0,91%	-4,42%

Figura 124 Comparación de los resultados de los modelos *Dragón de Mar 2.0* y *Dragón de Mar 4.0*.Elaboración propia.

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 3.0	16349,4	10781,1	5,47	4,29
Dragón 4.0	14484,7	10622,7	5,35	4,32
Diferencia en %	-11,41%	-1,47%	-2,21%	0,60%

Figura 125 Comparación de los resultados de los modelos *Dragón de Mar 3.0* y *Dragón de Mar 4.0*.Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos para el *Dragón de Mar 4.0* y aplicando la expresión (78) con los valores de velocidad media y presión total media se obtiene una altura de bombeo ideal para una ola de 2,03 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 860000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,116 m.c.f.

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 1,92 metros, la cual es inferior a la altura estimada de bombeo de los modelos 2.0 y 3.0.

4.5.7. Dragón de Mar 5.0

En vista de los malos resultados obtenidos en el modelo *Dragón de Mar 4.0*, se pretende dar un nuevo enfoque a la misma idea de mejorar la transición entre atrapa-olas y ductor principal. Para este nuevo enfoque se somete a simulación la siguiente geometría:

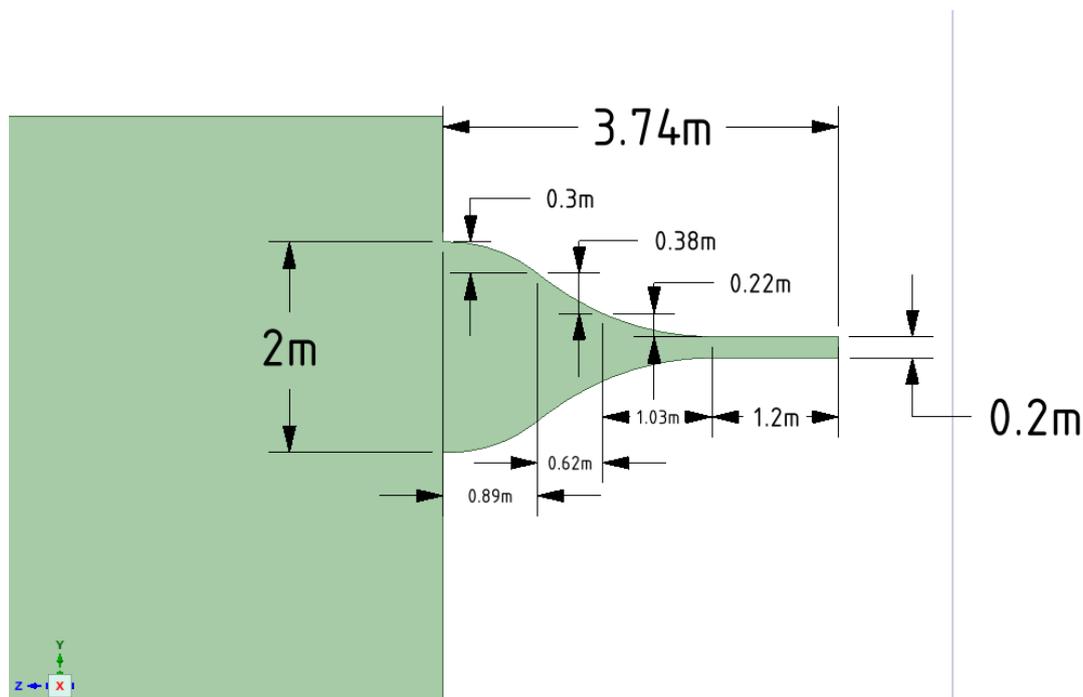


Figura 126 Geometría del modelo Dragón de mar 5.0. Elaboración propia.

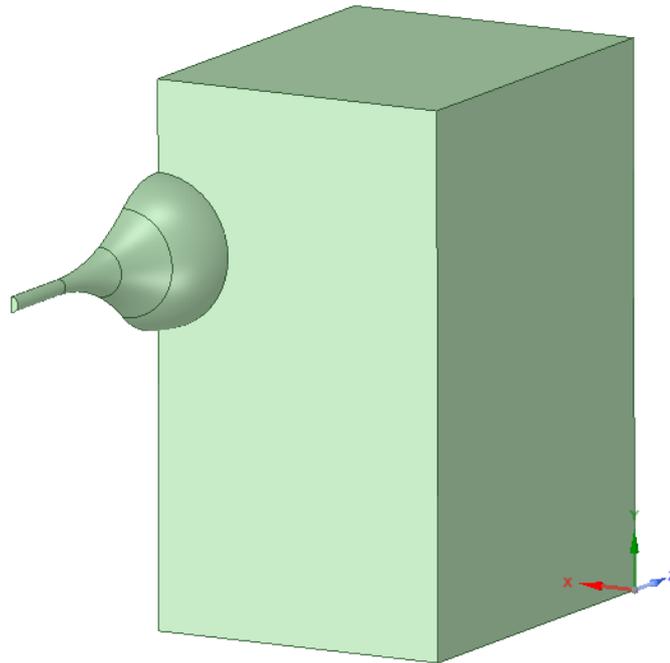


Figura 127 Geometría del modelo Dragón de mar 5.0. Elaboración propia

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo también se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los primeros modelos ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	60	120	0,7	13	1,2	1 565 647

Figura 128 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 5.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 1,15 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
15202,5	10894,5	5,21	4,34	41,17

Figura 129 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 5.0. Elaboración propia.

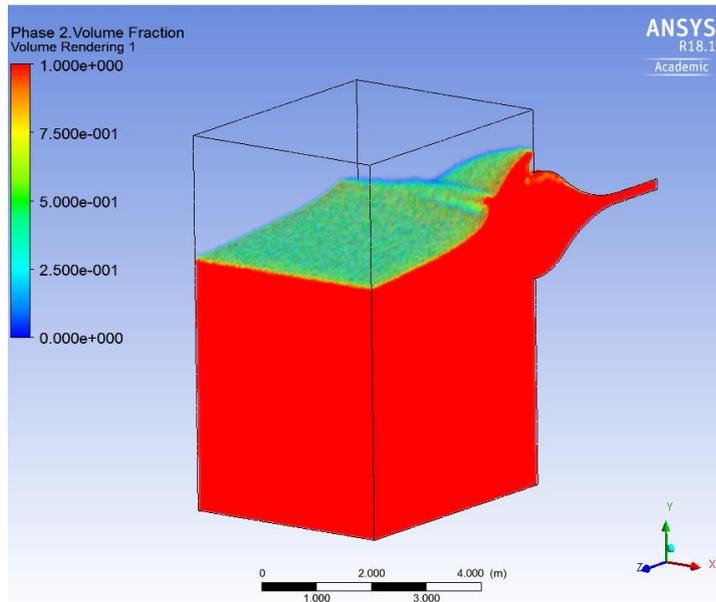


Figura 130 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

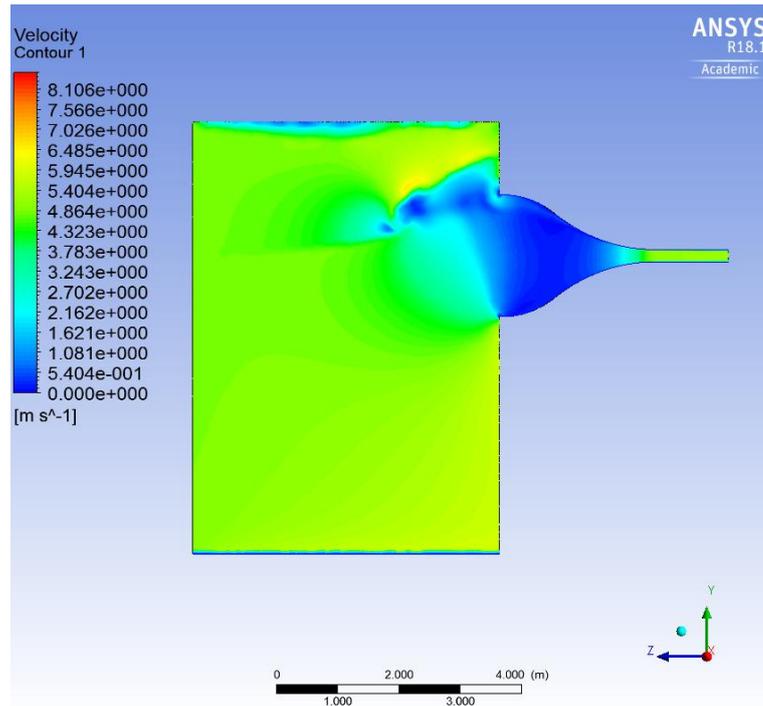


Figura 131 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

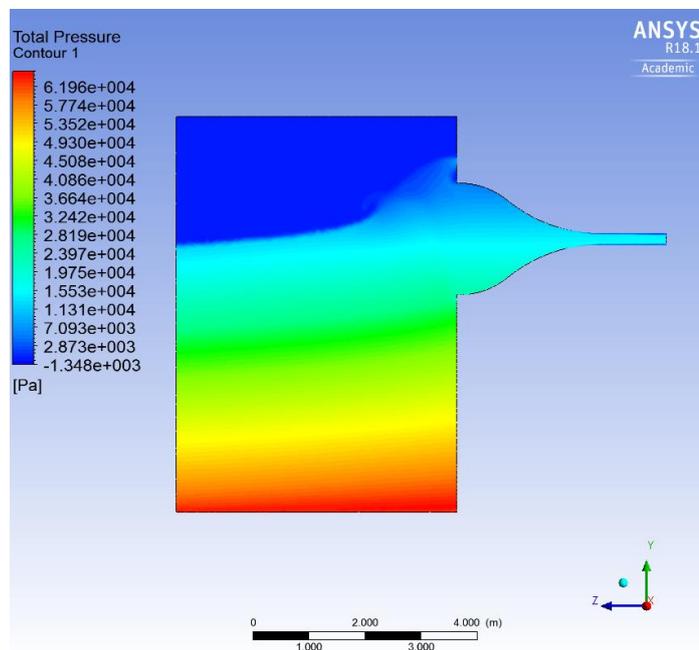


Figura 132 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

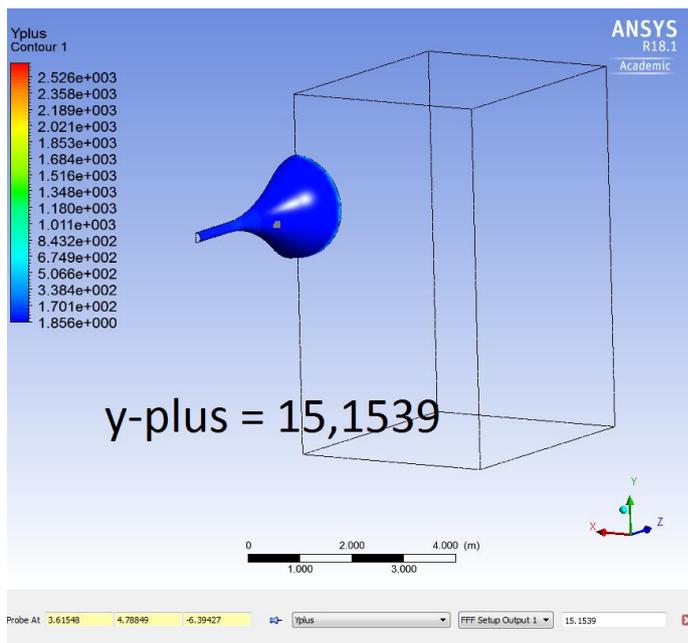


Figura 133 Gráfico de contornos del y-plus en la frontera dragon y el valor del y-plus en el punto del dominio (3,61; 4,78; -6,39). Elaboración propia.

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 2.0	16026,4	11756,3	5,40	4,52
Dragón 5.0	15202,5	10894,5	5,21	4,34
Diferencia en %	-5,14%	-7,33%	-3,57%	-3,95%

Figura 134 Comparación de los resultados de los modelos Dragón de Mar 2.0 y Dragón de Mar 5.0. Elaboración propia.

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 4.0	14484,7	10622,7	5,35	4,32
Dragón 5.0	15202,5	10894,5	5,21	4,34
Diferencia en %	4,96%	2,56%	-2,69%	0,49%

Figura 135 Comparación de los resultados de los modelos Dragón de Mar 4.0 y Dragón de Mar 5.0. Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos para el *Dragón de Mar 5.0* y aplicando la expresión (78) con

los valores de velocidad media y presión total media se obtiene una altura de bombeo ideal para una ola de 2,07 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 860000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,119 m.c.f

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 1,95 metros.

El modelo *Dragón de Mar 5.0* a pesar de presentar ventajas respecto al modelo 4.0 no son mejoras significativas y por ello la altura de bombeo estimada de ambos modelos es similar. Las carencias del modelo 5.0 se hacen aún más visibles si lo comparamos con el modelo 2.0 que por ahora sigue siendo el mejor con diferencia.

4.5.8. Dragón de Mar 6.0

Con la finalidad de poner a prueba una idea más atrevida y usando como inspiración el dispositivo undimotriz *Tapchan* (véase apartado 0), el cual cuenta con un atrapa olas que aumenta la energía potencial de la ola a partir de su energía cinética, se desarrolla la siguiente geometría que consta de un atrapa-olas tubular cuadrado que da paso posteriormente a una tubería circular.

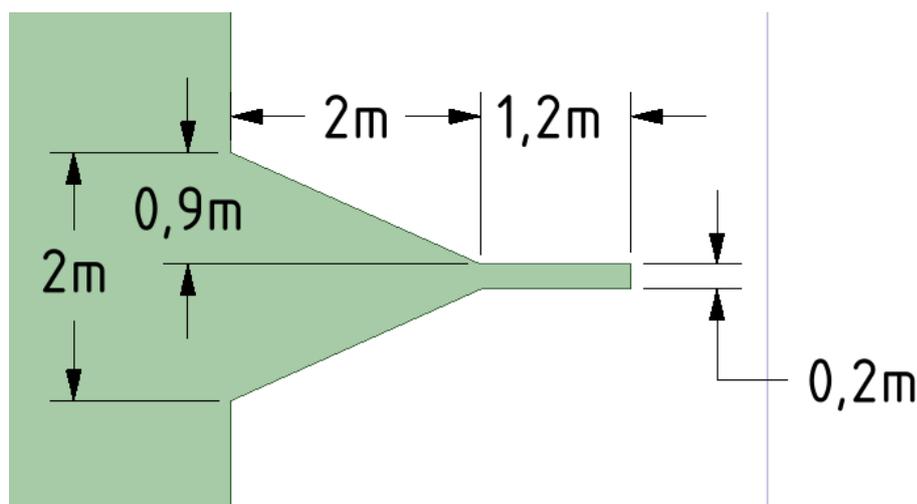


Figura 136 Geometría del modelo Dragón de mar 6.0. Elaboración propia.

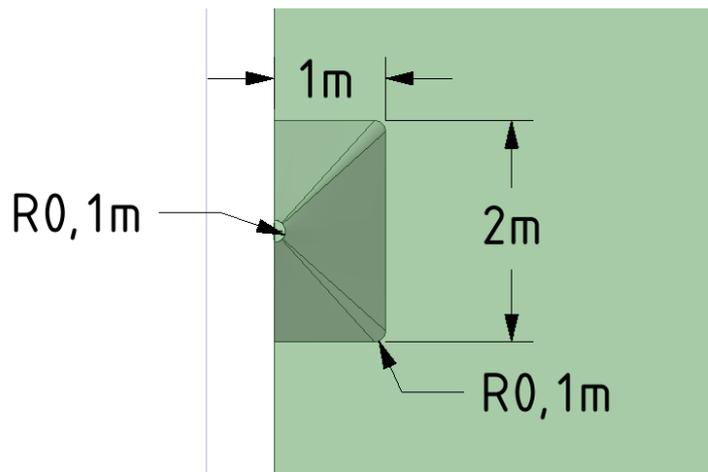


Figura 137 Geometría del modelo Dragón de mar 6.0. Elaboración propia

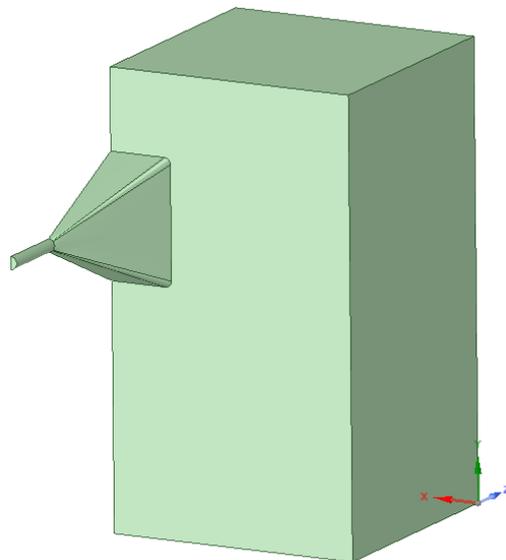


Figura 138 Geometría del modelo Dragón de mar 6.0. Elaboración propia

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo también se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los primeros modelos ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	0,7 mm	13	1,2	1 190 000

Figura 139 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 6.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 0,9 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
17128,7	12241,1	5,61	4,61	26,93

Figura 140 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 6.0. Elaboración propia.

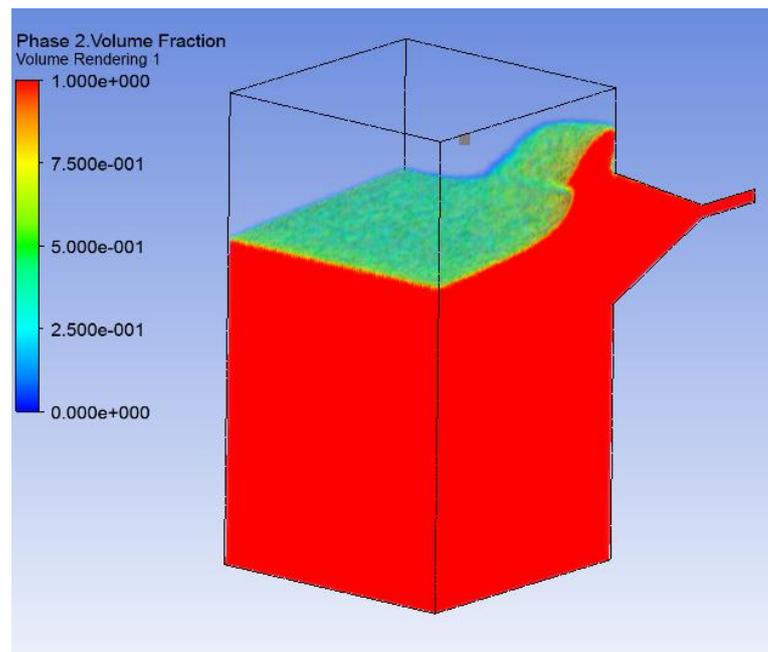


Figura 141 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

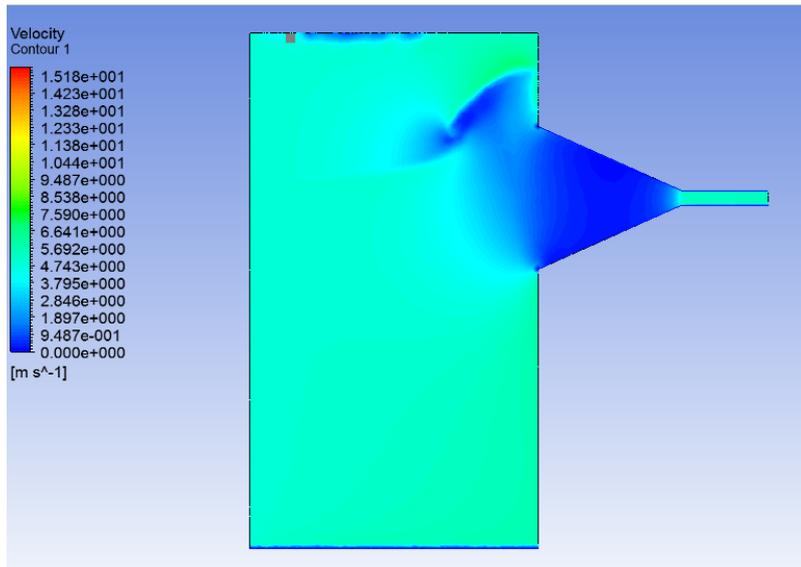


Figura 142 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

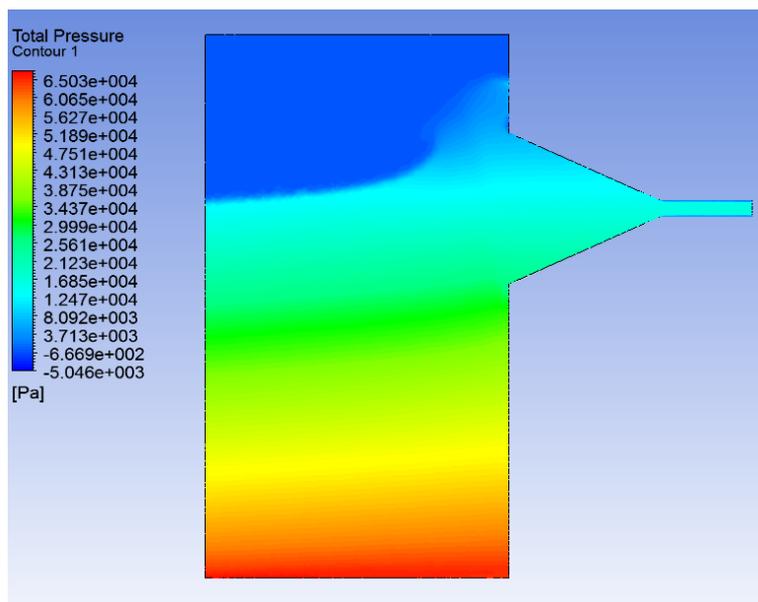


Figura 143 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

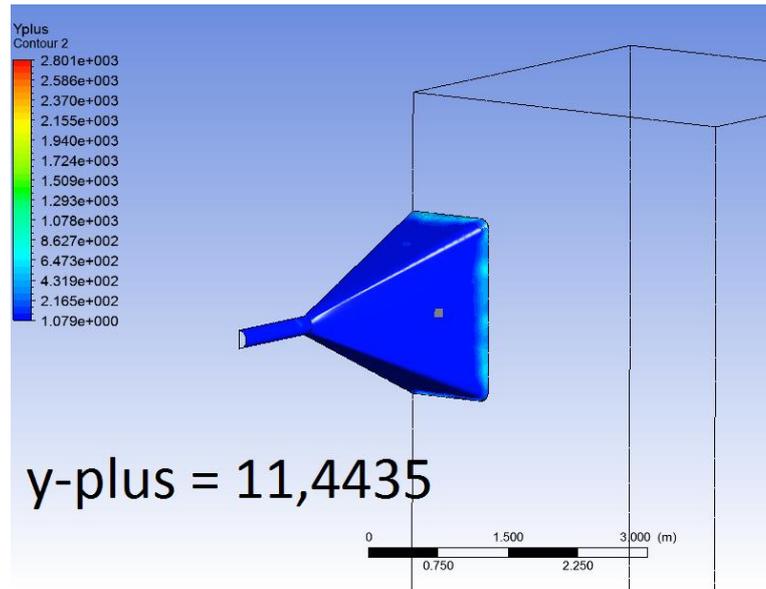


Figura 144 Gráfico de contornos del y -plus en la frontera dragon y el valor del y -plus en un punto de la frontera dragon. Elaboración propia.

Si comparamos los resultados obtenidos para el modelo 6.0 con el mejor modelo hallado hasta el momento, *Dragón de Mar 2.0*, se tiene lo siguiente:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 2.0	16026,4	11756,3	5,40	4,52
Dragón 6.0	17128,7	12241,1	5,61	4,61
Diferencia en %	6,88%	4,12%	3,87%	2,04%

Figura 145 Comparación de los resultados de los modelos *Dragón de Mar 2.0* y *Dragón de Mar 6.0*. Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y aplicando la expresión (78) con los valores de velocidad media y presión total media se estima una altura de bombeo ideal para una ola de 2,33 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 920000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,152 m.c.f.

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 2,18 metros.

El *Dragón de Mar 6.0* con un atrapa-olas en forma de tubo cuadrado presenta mejores resultados que el mejor modelo por el momento, el *Dragón de Mar 2.0*, aunque no sean significativamente muy superiores. Este pequeño aumento en la altura de bombeo puede ser debido a que la sección de paso del modelo 6.0 es un poco superior a la del modelo 2.0, pudiendo atrapar así una mayor cantidad de masa de agua y por ende de energía.

4.5.9. Dragón de Mar 7.0

El modelo *Dragón de Mar 7.0* es como el modelo 4.0 pero con un diámetro del atrapa-olas y una longitud superiores. El objetivo de esta simulación es ver cuánto aumenta o disminuye la altura estimada de bombeo debida al aumento del diámetro del atrapa-olas de 2 metros a 3,6 metros y al aumento de su longitud de 2 metros a 3 metros. Véase la siguiente geometría:

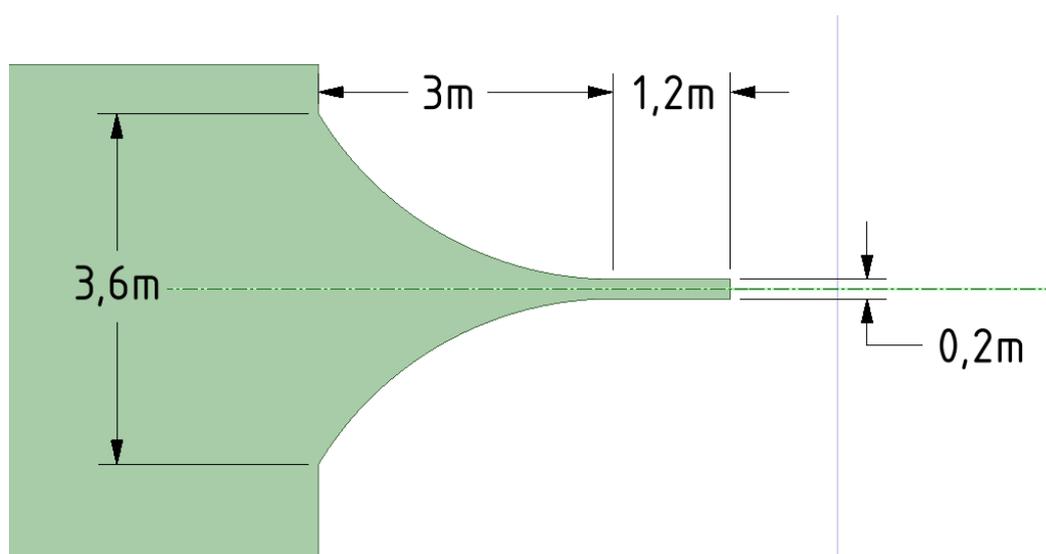


Figura 146 Geometría del modelo Dragón de mar 7.0. Elaboración propia.

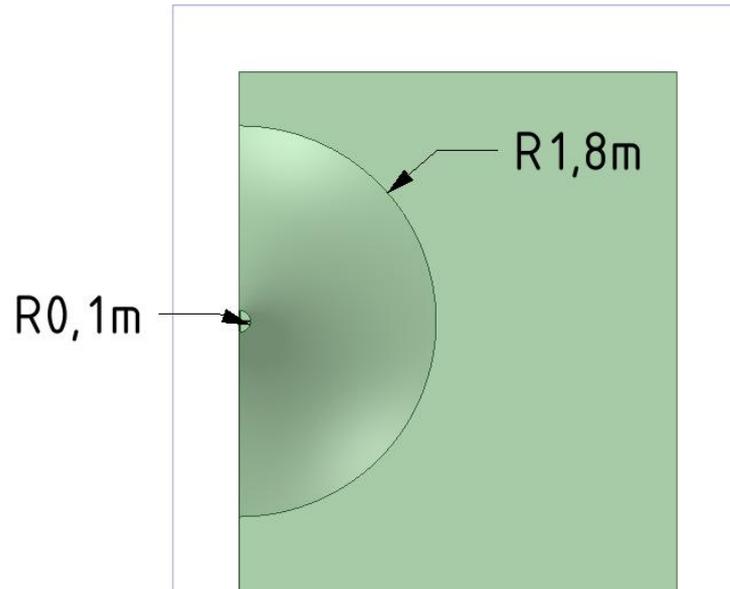


Figura 147 Geometría del modelo Dragón de mar 7.0. Elaboración propia

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo también se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los primeros modelos ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	65	130	0,7 mm	13	1,2	1 078 846

Figura 148 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 7.0. Elaboración propia.

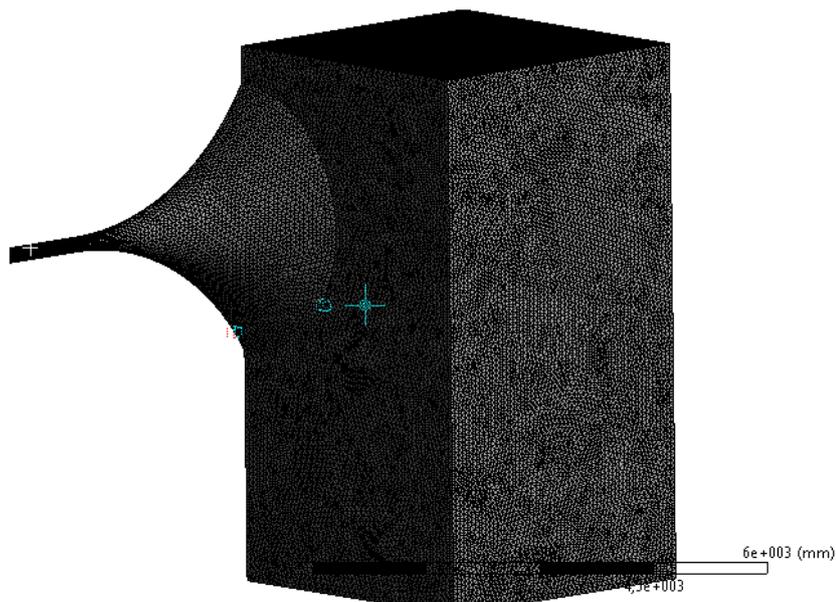


Figura 149 Malla resultante del Dragón de Mar 7.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 0,9 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
18204,9	12950,1	7,46	4,84	74,57

Figura 150 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 7.0. Elaboración propia.

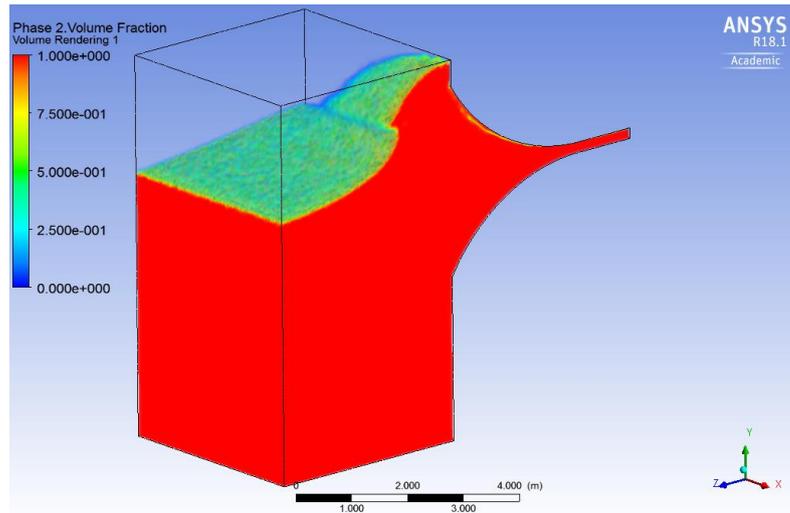


Figura 151 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

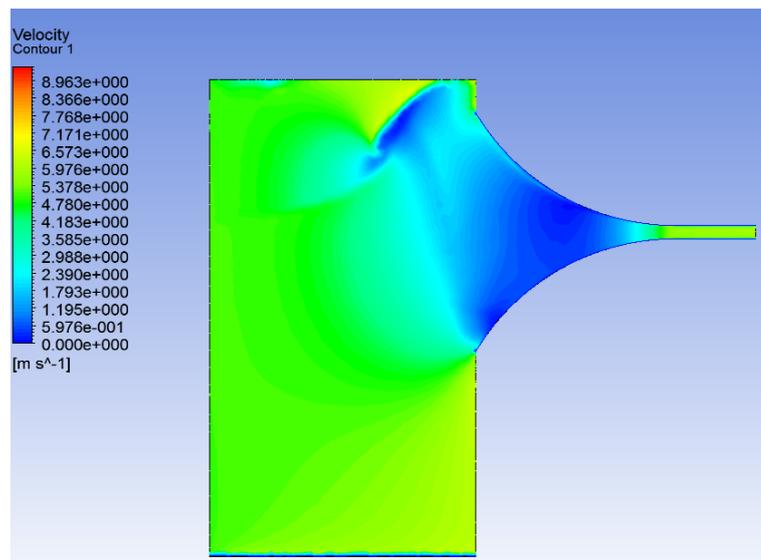


Figura 152 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

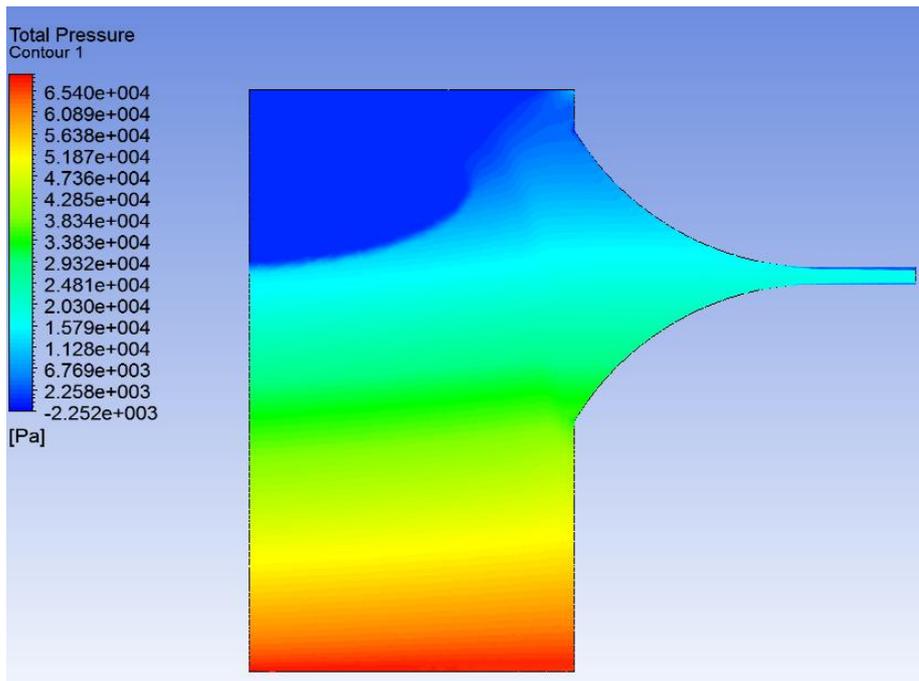


Figura 153 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

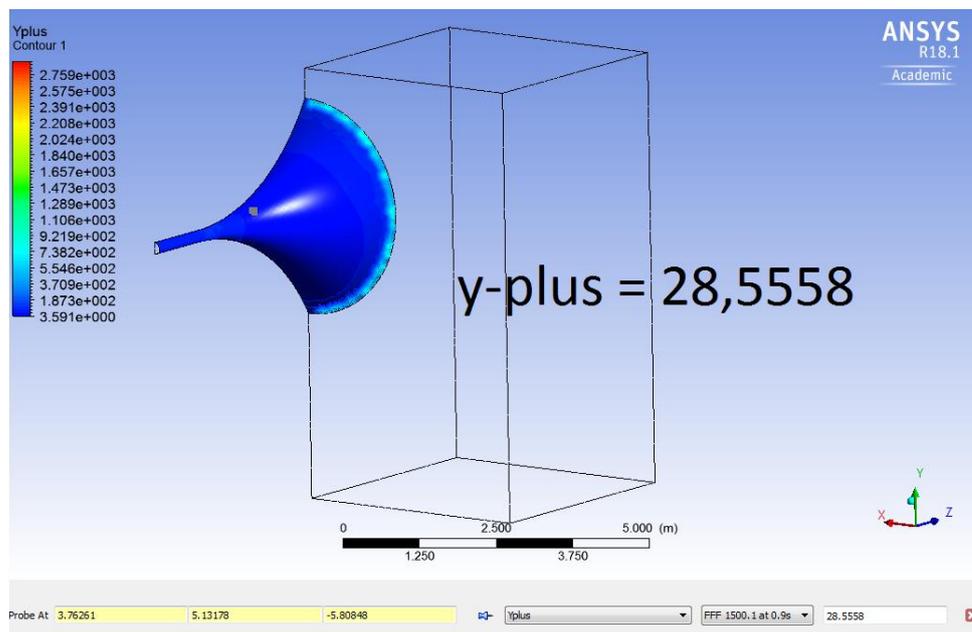


Figura 154 Gráfico de contornos del y-plus en la frontera dragon y el valor del y-plus en el punto del dominio (3,76; 5,13; -5,80). Elaboración propia.

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 6.0	17128,7	12241,1	5,61	4,61
Dragón 7.0	18204,9	12950,1	7,46	4,84
Diferencia en %	6,28%	5,79%	33,04%	4,90%

Figura 155 Comparación de los resultados de los modelos Dragón de Mar 6.0 y Dragón de Mar 7.0. Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y aplicando la expresión (78) con los valores de velocidad media y presión total media se estima una altura ideal de bombeo para una de 2,51 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 960000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,180 m.c.f.

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 2,33 metros.

Los resultados del modelo 7.0 son mejores que el mejor modelo por el momento, el 6.0, aún así, pese a haber aumentado mucho las dimensiones del atrapa-olas la altura de bombeo estimada no ha cambiado de forma significativa, ya que a pesar que la velocidad máxima del fluido es muy superior en este modelo no lo es así la velocidad media del flujo fluido.

4.5.10. Dragón de Mar 8.0

El *Dragón de Mar 7.0* presenta buenos resultados, pero para saber si esta mejora es causa del ensanchamiento de la sección, de su aumento de altura o de ambas, se elabora la siguiente geometría elíptica con un trazado suave entre el atrapa-olas y el ducto principal en forma de radio de 2,672 metros desde los ejes menores de la elipse. La forma elíptica supone un ensanchamiento pero no un aumento de la altura de la sección del atrapa-olas, por ende, los resultados de la simulación revelarán qué relación existe entre la altura, la anchura y la altura de bombeo.

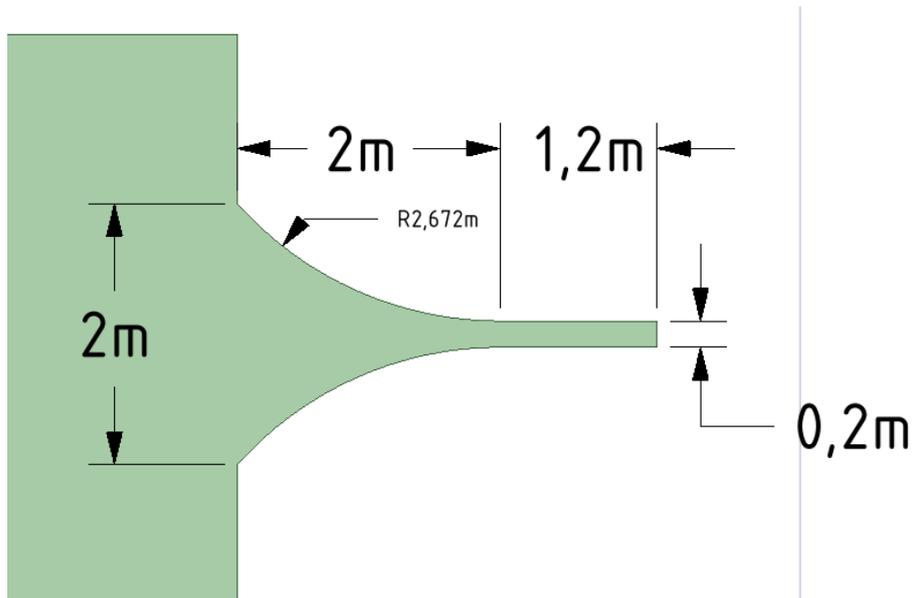


Figura 156 Geometría del modelo Dragón de mar 8.0. Elaboración propia.

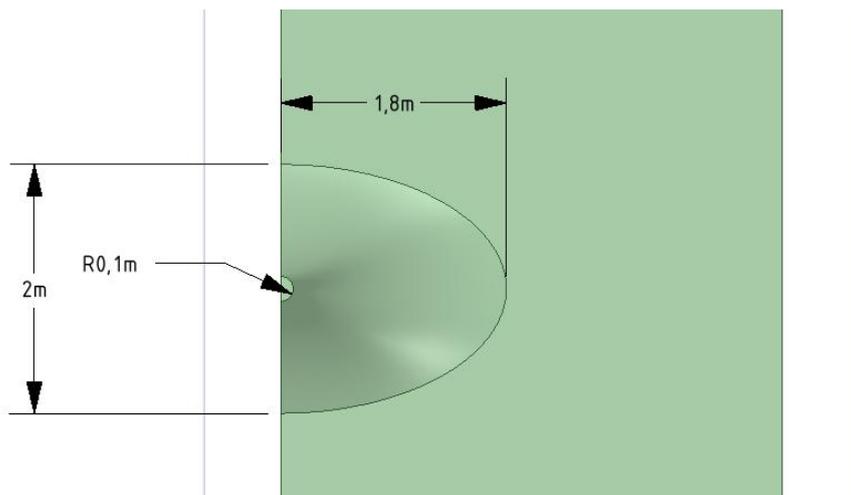


Figura 157 Geometría del modelo Dragón de mar 8.0. Elaboración propia

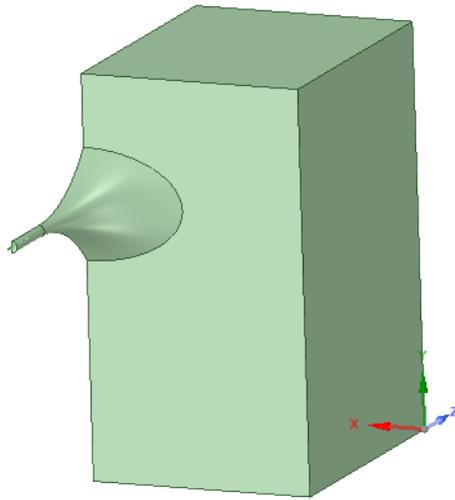


Figura 158 Geometría del modelo Dragón de mar 8.0. Elaboración propia.

Para el mallado de la geometría se aplica la información obtenida en el análisis de sensibilidad desarrollado en el apartado 4.5.2. En este modelo también se decide aplicar un método de mallado *Inflation* tipo *Smooth Transition* y no tipo *First Layer Thickness* como en los primeros modelos ya que así se mejoran los estimadores de calidad del mallado ayudando así a la convergencia de la solución. La siguiente figura resume los parámetros de mallado para dicha geometría:

Método	Sizing		Inflation Smooth transition			Nº Elementos
Parámetro	Max Face Size [mm]	Max Tet Size [mm]	Ancho de primera capa [mm]	Número de capas	Growth Rate	Nº Elementos
Valor	60	120	0,7	13	1,2	1 550 967

Figura 159 Resumen de los parámetros de mallado para el Dragón de mar 8.0. Elaboración propia.

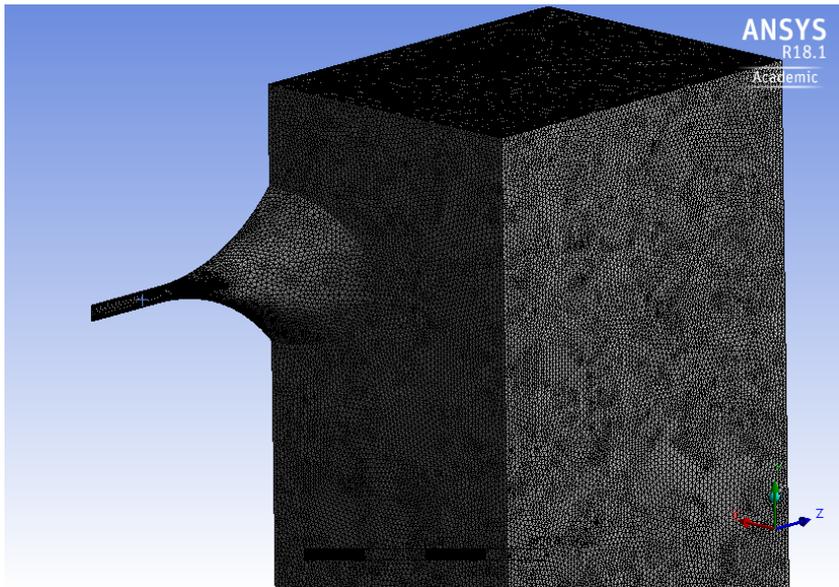


Figura 160 Malla resultante del Dragón de Mar 8.0. Elaboración propia.

Se configura la simulación tal y como se expone en el apartado 4.5.1.3. En la etapa de post-procesado se visualizan los resultados de las variables de interés para el instante de tiempo 1,05 segundos dónde se maximiza la captación de energía de la ola para el bombeo, obteniéndose los siguientes resultados:

Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Y-plus medio en la frontera dragon
16303,4	11889,7	5,43	4,54	54,79

Figura 161 Resultados de interés de la simulación del Dragón de Mar 8.0. Elaboración propia.

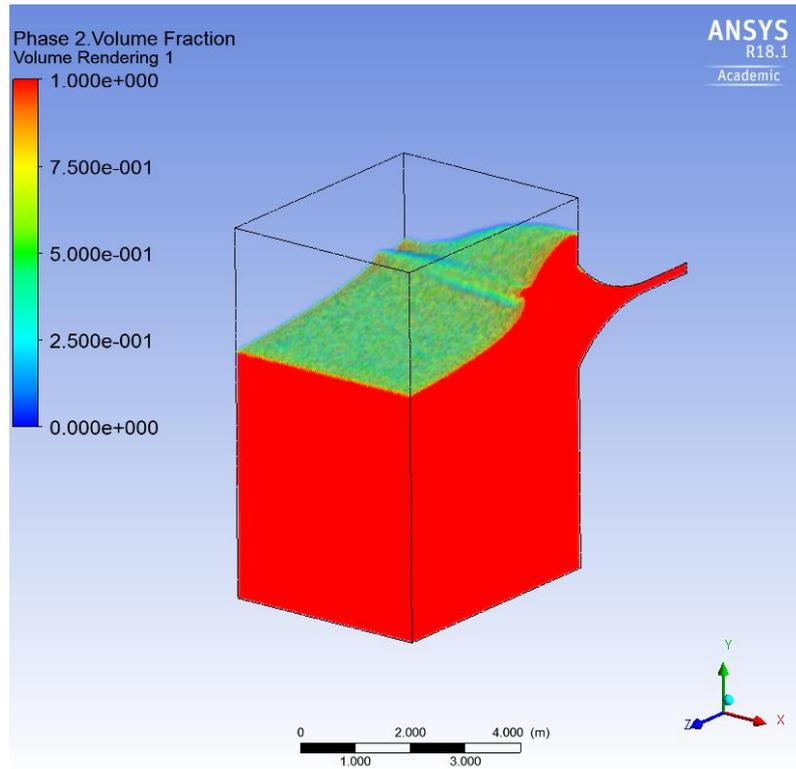


Figura 162 Render de la fase líquida en todo el dominio en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

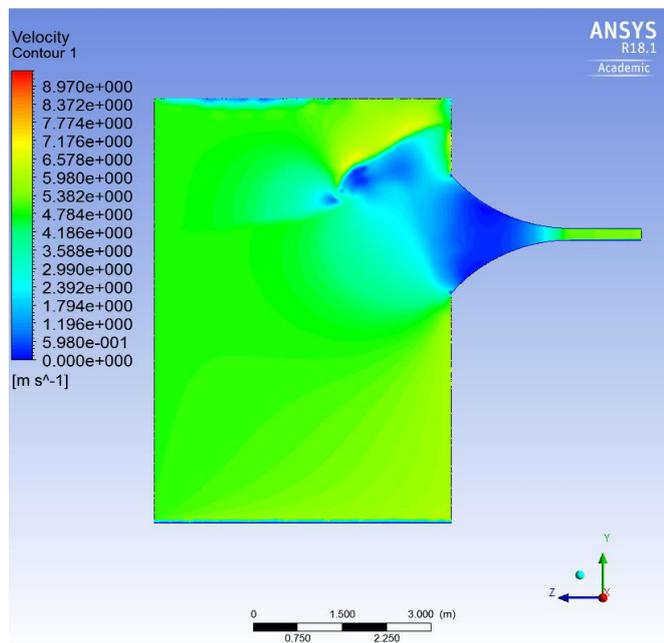


Figura 163 Gráfico de contornos de la velocidad en la frontera symetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

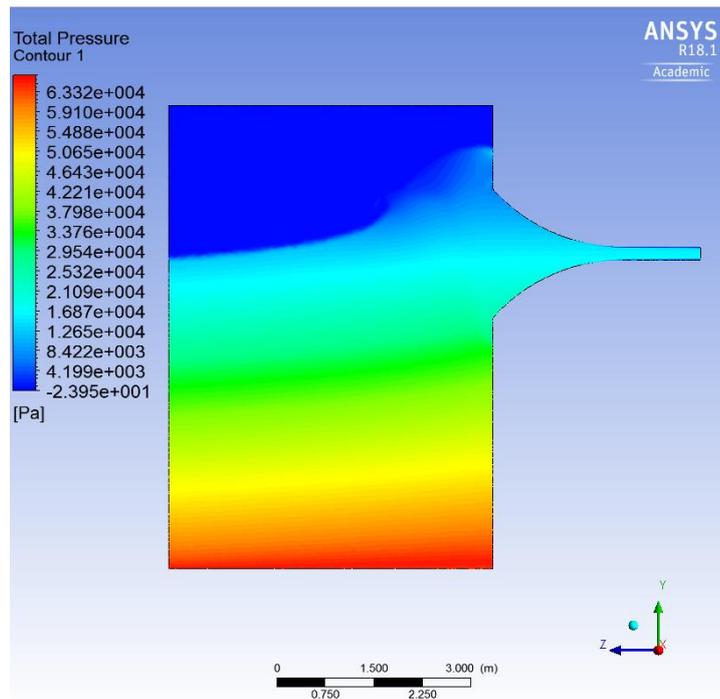


Figura 164 Gráfico de contornos de la presión total en la frontera symmetry en el momento dónde la captación de energía para el bombeo es máxima. Elaboración propia.

Con los resultados obtenidos y aplicando la expresión (78) con los valores de velocidad media y presión total media se estima una altura ideal de bombeo para una de 2,26 metros. Aplicando el mismo procedimiento que en los apartados anteriores para el cálculo de la altura real teniendo en cuenta las pérdidas por fricción se tiene que:

- El valor del número de *Reynolds* atendiendo a los valores de la simulación es de 910000.
- El factor de fricción adimensional de Darcy resulta en 0,012.
- Las pérdidas de carga por fricción resultan en 0,143 m.c.f.

De esta manera se estima que la altura de bombeo real del dispositivo para una ola es de 2,12 metros.

Comparando los resultados del modelo 8.0 con los de los modelos 4.0 y 7.0:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 4.0	14484,7	10622,7	5,35	4,32
Dragón 8.0	16303,4	11889,7	5,43	4,54
Diferencia en %	12,56%	11,93%	1,51%	5,21%

Figura 165 Comparación de los resultados de los modelos Dragón de Mar 4.0 y Dragón de Mar 8.0. Elaboración propia.

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]
Dragón 7.0	18204,9	12950,1	7,46	4,84
Dragón 8.0	16303,4	11889,7	5,43	4,54
Diferencia en %	-10,44%	-8,19%	-27,20%	-6,05%

Figura 166 Comparación de los resultados de los modelos Dragón de Mar 7.0 y Dragón de Mar 8.0. Elaboración propia.

A simple vista mirando las figuras anteriores se deduce que el atrapa-olas se comporta de mejor forma cuánto más masa de agua es capaz de atrapar, por ello, cuándo más ancho y alto sea. Ahora bien, aumentar la altura del atrapa-olas solo tendrá sentido si es para atrapar más masa de agua, si el atrapa-olas rebasa por completo la altura de las olas un aumento de dicha dimensión no generará beneficios mientras que un ensanchamiento de la sección si lo haga.

4.5.11. Resumen de los resultados de las simulaciones

De forma resumida se exponen las geometrías de los distintos modelos simulados:

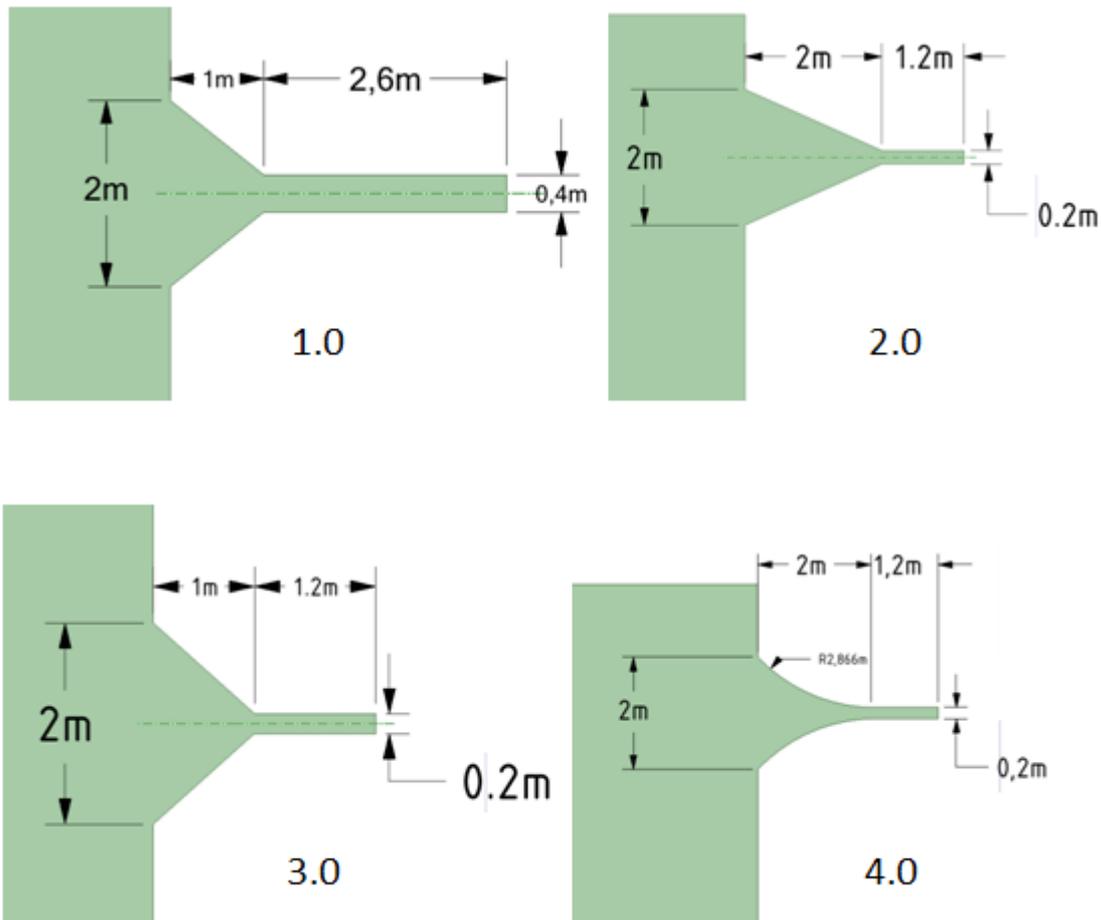


Figura 167 Resumen de las geometrías de los modelos 1.0, 2.0, 3.0 y 4.0. Elaboración propia.

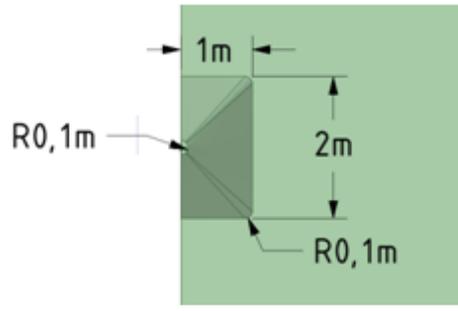
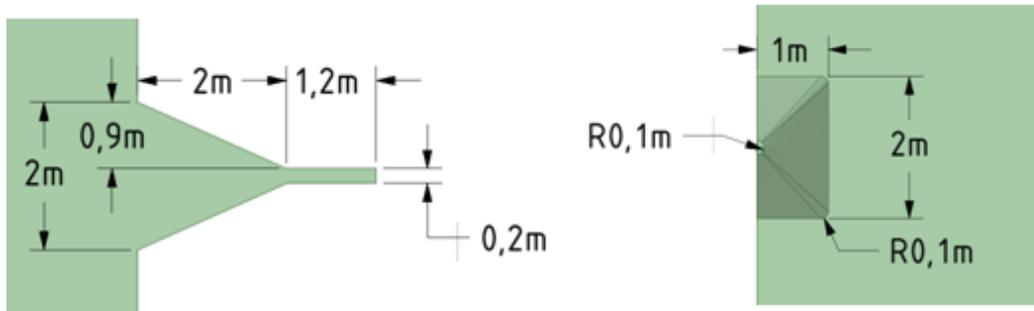
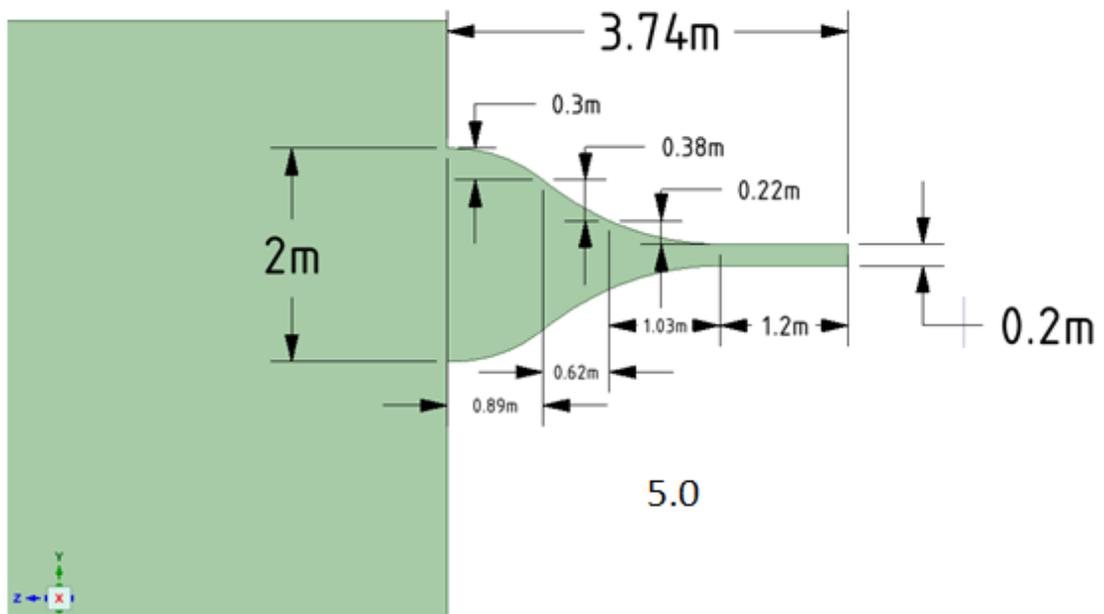


Figura 168 Resumen de las geometrías de los modelos 5.0 y 6.0. Elaboración propia.

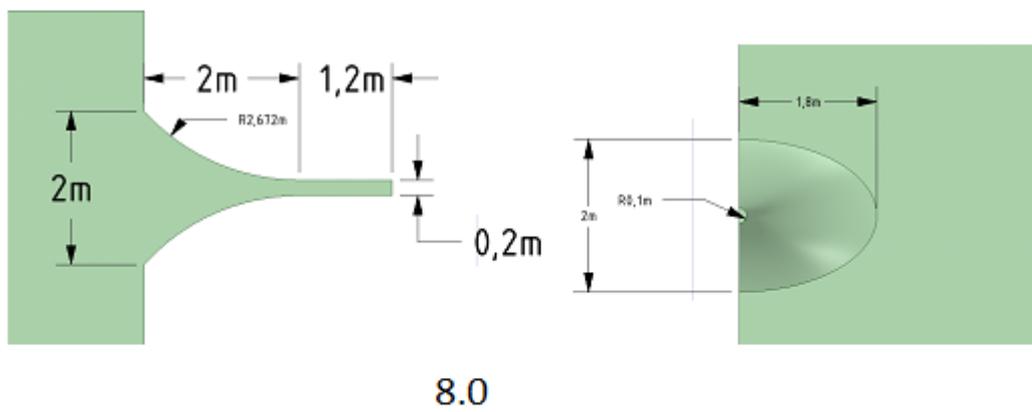
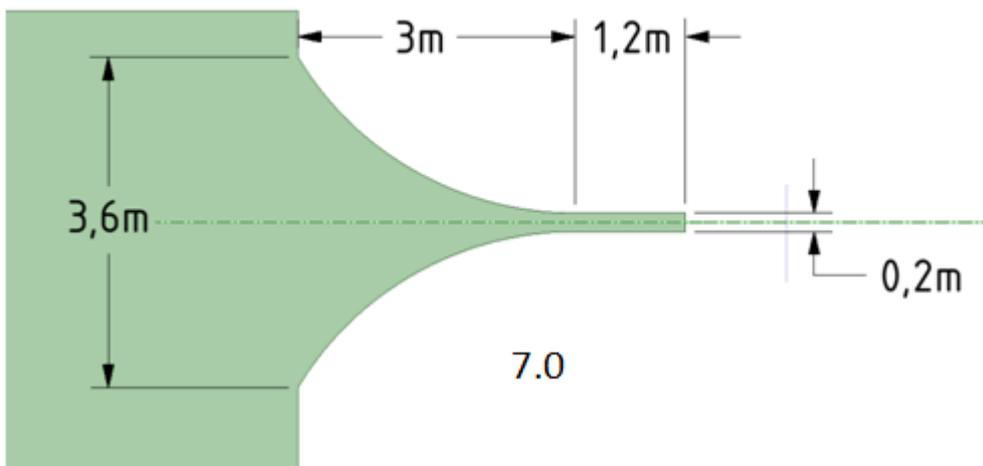


Figura 169 Resumen de las geometrías de los modelos 7.0 y 8.0. Elaboración propia.

La siguiente imagen resume los resultados de las variables de interés de todos los modelos de bomba de agua simulados:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Pérdidas de carga por fricción [m.c.f.]	Altura de bombeo real [m]
Dragón 1.0	13038,4	8986,5	4,44	3,69	0,031	1,58
Dragón 2.0	16026,4	11756,3	5,40	4,52	0,140	2,10
Dragón 3.0	16349,4	10781,1	5,47	4,29	0,115	1,92
Dragón 4.0	14484,7	10622,7	5,35	4,32	0,116	1,92
Dragón 5.0	15202,5	10894,5	5,21	4,34	0,119	1,95
Dragón 6.0	17128,7	12241,1	5,61	4,61	0,152	2,18
Dragón 7.0	18204,9	12950,1	7,46	4,84	0,180	2,33
Dragón 8.0	16303,4	11889,7	5,43	4,54	0,143	2,12

Figura 170 Resumen de los resultados de las simulaciones. Elaboración propia.

El grado de optimización se ve en la siguiente figura, donde se pone en comparación los resultados del modelo de partida con los resultados del mejor diseño:

Modelo Atrapa-ola	Presión Total Max. En la frontera outlet dragon [Pa]	Presión Total Media en la frontera outlet dragon [Pa]	Velocidad máxima en la frontera outlet dragon [m/s]	Velocidad media en la frontera outlet dragon [m/s]	Altura de bombeo real [m]
Dragón 1.0	13038,4	8986,5	4,44	3,69	1,58
Dragón 7.0	18204,9	12950,1	7,46	4,84	2,33
Diferencia en %	39,63%	44,11%	67,97%	31,10%	47,73%

Figura 171 Comparación entre el modelo de atrapa-ola propuesto por Eliecer Cabrera Fernández y el mejor modelo después de la optimización. Elaboración propia.

Si se toma como variable de interés la altura de bombeo de la ola se puede afirmar que el grado de optimización alcanzado es de alrededor del 50% tomando como referencia el modelo de partida.

4.5.12. Conclusiones de las simulaciones

Del conjunto de las simulaciones realizadas se extraen las siguientes conclusiones:

- Comparando las simulaciones del *Dragón de Mar 1.0* y *Dragón de Mar 2.0* se concluye que la longitud del atrapa-olas influye significativamente en la altura de bombeo del mismo. El atrapa-ola no tiene que ser muy corto para que se canalice la energía de la ola en lugar de que esta impacte perdiendo así mucha de su energía. Por otra parte un atrapa-ola excesivamente largo podría generar excesivas pérdidas por fricción.
- Comparando las simulaciones del *Dragón de Mar 1.0* y *Dragón de Mar 3.0* se concluye que el diámetro del ducto principal es un elemento que influye significativamente en la altura de bombeo. Como más pequeño es el diámetro mayor es la reducción de la sección de paso de la ola, por ende la velocidad de la misma aumenta lo que se traduce en un aumento de la altura de bombeo. Por otra parte al reducir el diámetro del ducto principal las pérdidas de carga por fricción aumentan de forma considerable (véase Figura 170) por lo que una reducción excesiva de dicho parámetro puede no resultar beneficioso.
- Los resultados de las simulaciones de los modelos *Dragón de Mar 4.0* y *Dragón de Mar 5.0* no dan señales de que la suavización de la transición entre atrapa-olas y ducto principal añada ventajas significativas para el bombeo de agua a mayor altura, por ello, y atendiendo a su dificultad constructiva, no se recomienda su implementación con fines de experimentación y/o académicos.
- Comparando los modelos 2.0 y 6.0 se concluye que la forma tubular cuadrada inspirada en el dispositivo *Tapchan* es beneficiosa para el bombeo de agua en tanto que la sección de paso del atrapa-olas cuadrado es mayor que la de los atrapa-olas circulares que tienen la misma altura e anchura, por ello, y por su relativa simplicidad constructiva, se recomienda su implementación para usos experimentales y/o académicos.
- Las simulaciones del modelo *Dragón de Mar 7.0* muestran dos cosas: la primera que un atrapa-olas de mayores dimensiones ofrece mejores resultados puesto que la sección de oleaje atrapada es mayor, y, en segundo lugar y atendiendo a que las mejoras introducidas no son significativas, queda constancia de que las condiciones del oleaje son un factor limitante y que un aumento de las dimensiones del atrapa-olas puede no ser óptimo a nivel constructivo y económico si no le acompaña una mejora de las condiciones del oleaje.
- Comparando los resultados del modelo *Dragón de Mar 8.0* con los modelos 4.0 y 7.0 se concluye que cuánta más masa de agua sea capaz de atrapar el atrapa-olas mayor será la altura de bombeo. Por ello, un ensanchamiento de la sección será beneficioso para aumentar la altura de bombeo mientras que un aumento de la

altura de la sección sólo será beneficioso si el atrapa-olas no rebasa la altura de las olas incidentes.

4.6. Fabricación y testeo del diseño a escala real

Esta parte del trabajo se limita a exponer brevemente el resultado del trabajo de mi compañero de equipo Philipp Englisch puesto que su trabajo ha tenido repercusión en el desarrollo de esta memoria.

Philipp Englisch ha elaborado un modelo a escala real basándose en el modelo propuesto por *Elicer Cabrera Fernández* con el fin de poner a prueba el dispositivo undimotriz no en el laboratorio, sino en el punto de instalación en la costa de punta de Curaumilla.

A parte de las dificultades propias que supone el propio montaje del dispositivo como de pensar cómo construirlo, comprar el material y ensamblarlo, Philipp Englisch ha afrontado una gran dificultad que es el anclaje del mismo dispositivo. Para el anclaje del mismo se ha optado por la vía flotante a partir de tirantes de tal forma que los mismos cables que sujetan el dispositivo en el agua sirven también para posicionarlo. La siguiente imagen muestra los resultados de todo el proceso:



Figura 172 Resultado de todo el proceso constructivo del primer prototipo de Dragón de Mar a escala real. Realizado por Philipp Englisch.

El dispositivo a escala real sigue a día de hoy 10/07/2018 en fase de pruebas y medición, sin presentar aún resultados concluyentes sobre su funcionamiento.

4.7. Recomendaciones y proposiciones de nuevos modelos de dispositivos undimotrices

Los resultados del apartado 4.5.12 muestran que a pesar que se ha optimizado el dispositivo de bombeo para que ofrezca una *performance* de alrededor de un 50% superior al modelo básico propuesto Eliecer Cabrera Fernández, las alturas de bombeo siguen siendo muy bajas para los objetivos del proyecto. Desde el punto de vista de la geometría seguro que aún puede optimizarse más el atrapa-olas para la captación de energía, pero el verdadero cuello de botella del problema son las no tan favorables condiciones del oleaje que se dan en aguas tan someras por culpa de la interacción de las olas con el suelo marino. En este marco se plantean las siguientes recomendaciones:

- Utilizar el dispositivo *Dragón de Mar* para bombear agua a un depósito a baja altura y posteriormente someter dicho depósito a una bomba por golpe de ariete capaz de bombear agua a mucha altura cuando se dispone de un depósito a poca altura.
- Aumentar las dimensiones de los atrapa-olas definidos en el marco de este trabajo y situar el dispositivo en aguas profundas dónde las condiciones del oleaje son más beneficiosas para que el bombeo directo de agua mediante un atrapa-olas se lleve a cabo, puesto que la velocidad de las olas en aguas profundas es mucho mayor que en la costa y ésta está relacionada con la altura de bombeo con un exponente cuadrado, véase la expresión (78).
- Considerar el uso del *Dragón de Mar* para la generación eléctrica y usar dicha electricidad para actuar una bomba de agua, lo cual supondría renunciar a la idea del bombeo directo de agua sin pasar por la transformación a energía eléctrica.

La primera recomendación expuesta es abarcable atendiendo al oleaje en la costa de punta Curaumilla si se implementa un modelo de bomba undimotriz como las descritas en el marco de este trabajo, puesto que con un depósito de agua a una altura de dos metros alimentado por el dispositivo undimotriz y haciendo uso de una bomba que funcione con golpe de ariete se puede llegar a bombear agua a mucha altura. Se destaca que, a pesar que esta solución es conocida y fácil de aplicar carece del factor de innovación que representa una bomba directa de agua con energía undimotriz.

El segundo punto tiene la ventaja de que la velocidad de las olas en aguas profundas es mucho mayor que en la costa y como la altura de bombeo está relacionada con dicha velocidad con un exponente cuadrado los resultados de bombeo en aguas profundas mejoran mucho tal y como se puede ver en la memoria de Eliecer Cabrera Fernández, pero tiene dos desventajas. La primera desventaja es el propio anclaje del mismo dispositivo en aguas profundas ya que éste debe encontrarse parcialmente sumergido para un correcto funcionamiento. La segunda desventaja es que se precisa de un ducto

que lleve el agua desde aguas profundas a la costa donde se pretende utilizar. Dicho ducto debe ser muy largo y por ende las pérdidas por fricción también lo serán. A modo de ejemplo se han calculado las pérdidas por fricción de los modelos simulados si estos se encontraran 100 metros aguas adentro:

Modelo Atrapa-ola	Pérdidas de carga por fricción [m.c.f.]
Dragón 1.0	1,9077
Dragón 2.0	6,2440
Dragón 3.0	5,6368
Dragón 4.0	5,7042
Dragón 5.0	5,7599
Dragón 6.0	6,5008
Dragón 7.0	7,1537

Figura 173 Pérdidas de carga por fricción si los dispositivos se encontrasen 100 metros aguas adentro. Elaboración propia.

A pesar del aumento de pérdidas de carga por fricción y atendiendo a los resultados del trabajo de Eliecer Cabrera Fernández, instalar el dispositivo mar adentro resulta beneficioso para la altura de bombeo, puesto que por la batimetría de Laguna Verde una profundidad de 10 metros se obtiene relativamente cerca de la costa por ende las pérdidas de carga no serían tan significativas y en cambio la altura de bombeo a dicha profundidad es la siguiente:

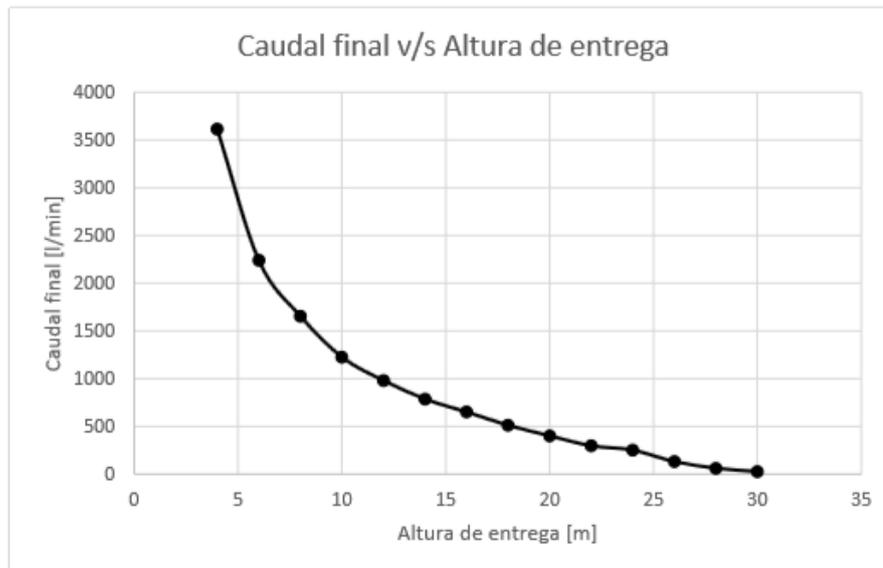


Figura 174 Altura de bombeo del dispositivo undimotriz propuesto por Eliecer Cabrera Fernández [33].

Tal y como se ve en la Figura 174 es bastante razonable aceptar las pérdidas de carga por fricción ya que el aumento de altura de bombeo es mucho mayor que dichas pérdidas, más aún teniendo en cuenta que los resultados de la Figura 174 corresponden al modelo con el atrapa-olas no optimizado.

5. Planificación y desarrollo del proyecto

El siguiente diagrama de Gantt muestra la planificación del proyecto *Dragón de Mar* que se hizo en primera instancia la cual figura en la ficha de postulación del proyecto.

ACTIVIDADES	Mes 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Solucion conceptual												
Revision estado del arte	■	■	■									
Pertinencia transferencia tecnologica	■	■	■									
Formulacion solucion conceptual		■	■	■	■	■						
Testeo de soluciones												
Diseño de experimentos		■	■	■	■	■	■	■				
Testeos virtuales		■	■	■	■	■	■	■				
Repensar soluciones		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Planta Piloto												
Diseño de soluciones adecuadas		■	■	■	■	■	■	■				
Construcción del Piloto			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Resultados												
Presentaciones en congresos											■	■
Publicaciones											■	■
Patentes						■	■	■	■	■	■	■
Formacion Capital Humano especializado	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 175 Diagrama de Gantt muestra la primera planificación del proyecto *Dragón de Mar*.

A día de hoy y como es habitual en cualquier proyecto de ingeniería el diagrama de Gantt del proyecto presenta un aspecto diferente ya que la primera planificación del proyecto no ha podido seguirse estrictamente debido a imprevistos y factores externos. En concreto el desarrollo real de las diferentes actividades que se han llevado a cabo se exponen en el siguiente diagrama de Gantt, donde se muestran: en rojo las actividades desarrolladas por Eliecer Cabrera Fernández, en amarillo las desarrolladas por Philipp Englisch, en verde las desarrolladas por Esteve Baraut Marsal, en violeta las desarrolladas por todos los miembros del proyecto y en gris las actividades que quedan por desarrollarse.

Actividades	Mes											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Solución conceptual												
Revisión del estado del arte	■	■	■									
Pertinencia transferencia tecnológica	■	■	■									
Formulación de una solución conceptual		■	■	■	■							
Testeo de Soluciones												
Diseño de experimentos				■	■	■						
Testeos virtuales				■	■	■	■	■	■	■	■	■
Diseño de soluciones optimizadas												
Diseño de soluciones optimizados						■	■	■	■			
Construcción del modelo								■	■	■	■	
Resultados												
Presentaciones en congresos												■
Publicaciones												■
Patentes												■
Formación Capital humano especializado	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 176 Diagrama de Gantt del desarrollo real del proyecto. En amarillo las actividades desarrolladas por Philipp Englisch, en verde las desarrolladas por Esteve Baraut Marsal, en violeta las desarrolladas por todos los miembros del proyecto y en gris las actividades que quedan por desarrollarse. *Elaboración propia.*

6. Coste del proyecto

Ante el hecho de que el trabajo se ha realizado en su totalidad de manera informática los costes asociados son los correspondientes al material informático utilizado y el salario otorgado a aquellos que lo utilizan.

En cuanto a costes salariales, asumiendo que un ingeniero a cargo de la elaboración del proyecto tiene un salario medio de 20 €/h se calcula que los costes salariales ascienden a 10.800 € dado que la duración del proyecto es de 540 horas.

En segundo lugar y con respecto a los costes relacionados con el material informático y los *softwares* utilizados. La adquisición del software de *CFD Fluent (Ansys)* tiene un coste de 5.000 € con un coste de renovación de la licencia de 3.000 € anuales.

En cuanto al hardware se estima un coste total de la computadora de 1.000 € y se le considera una vida útil de 10 años, lo que hace que el coste del ordenador sea de 100 €/año.

En cuanto al consumo energético vinculado a la electricidad que es indispensable para el uso del ordenador presente en cada minuto de la ejecución del proyecto, tiene un coste aproximado de 0,13 €/kWh [45] y el consumo del ordenador es de 1kWh aproximadamente.

Teniendo en cuenta que el trabajo se ha elaborado en un periodo de tiempo de 0,5 años y que el coste del software se estima en 20 años, el resumen de los costes informáticos del trabajo es el siguiente:

	Coste Unitario	Cantidad tiempo	Coste
Coste Programario	250 €/año	0,5 años	125,00 €
Coste Licencias	3000 €/año	0,5 años	1.500,00 €
Coste hardware	100 €/año	0,5 años	50,00 €
Coste Energético	0,13 €/kWh	540 h	70,20 €
Total			1.745,20 €

Figura 177 Tabla resumen de los costes informáticos del proyecto. Elaboración propia.

Ante las posibles irregularidades o incidencias que se puedan dar a nivel económico durante el transcurso del trabajo se estima un margen de seguridad sobre el coste total del 5%. Por último hay que añadir al coste total el beneficio industrial que se quiere obtener del proyecto, que considerándolo del 10%, se obtiene una la siguiente estimación del coste del proyecto:

	Coste Unitario	Cantidad tiempo	Coste
Coste Programario	250 €/año	0,5 años	125,00 €
Coste Licencias	3000 €/año	0,5 años	1.500,00 €
Coste hardware	100 €/año	0,5 años	50,00 €
Coste Energético	0,13 €/kWh	540 h	70,20 €
Coste Salarial	20 €/hora	540 h	10.800,00 €
Total Costes			12.545,20 €
		Margen seguridad 5%	627,26 €
		Beneficio Industrial 10%	1.254,52 €
		Total	14.426,98 €

Figura 178 Tabla resumen del coste total estimado del trabajo. Elaboración propia.

Tras todas las consideraciones pertinentes el coste total estimado para la elaboración del trabajo es de 14.426,98 € que a día de hoy, 7 de Julio de 2018, con una tasa de cambio de 771,88 pesos chilenos/€ [47] resultan en 11.135.897,32 pesos chilenos.

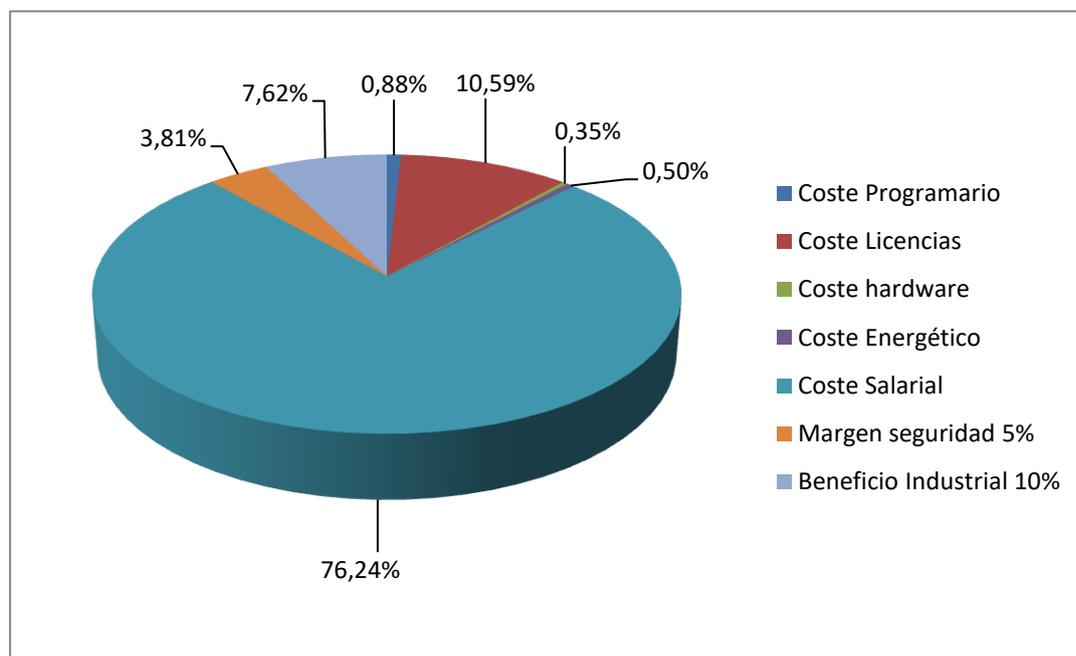


Figura 179 Gráfico resumen de los costes del proyecto. Elaboración propia.

La Figura 179 muestra que la mayoría de costes vinculados al proyecto son costes salariales.

7. Impacto medioambiental

El impacto medioambiental de este trabajo se reduce a las emisiones relativas al consumo de electricidad necesaria para llevar a cabo las simulaciones y el redactado de la memoria. Para la estimación de dichas emisiones se presenta la siguiente tabla de los diferentes porcentajes de generación eléctrica en función de la fuente de energía en Chile.

Generación	Porcentaje de generación en Chile
Termoeléctrica	60,30%
Hidráulica	29,40%
Eólica	4,70%
Fotovoltaica	5,20%
Geotérmica	0,08%

Figura 180 Porcentajes de generación eléctrica en función de la fuente de energía en Chile [46].

Solo la generación termoeléctrica genera emisiones en la atmosfera por la combustión de combustibles fósiles. Es decir, por cada 100 kWh consumido para los fines del trabajo sólo 60,30 kWh generan emisiones a la atmosfera (véase Figura 180). Hay diferentes formas de generar energía termoeléctrica en Chile, cada cual con diferentes emisiones de CO₂. Un resumen del estado actual del panorama termoeléctrico en Chile y sus emisiones de CO₂ se representa en al siguiente imagen:

Combustible fósil	Potencia instalada [MW]	Porcentaje del total	Emisión de CO ₂ [tonas CO ₂ /MWh]
Carbón	4809	39,55%	0,83
Petróleo-Diesel	2930	24,10%	0,43
Gas natural	4421	36,36%	0,34
Total	12160	100,00%	
		Emisión de CO₂ ponderada según la potencia instalada [tonas CO₂/MWh]	0,5555

Figura 181 Estado de la energía termoeléctrica en Chile [48].

Sabiendo que el consumo del ordenador es aproximadamente de 1 kWh (véase apartado 6), que el trabajo ha tenido una duración de 540 horas, que la generación de emisiones de CO₂ sólo puede atribuirse al 60,30% de la energía eléctrica usada y que las emisiones de CO₂ ponderadas entre las distintas formas de generar energía termoeléctrica son de 0,5555 tonas por MWh, las emisiones de CO₂ totales del trabajo se estiman en 0,1808 tonas, lo

cual supone un impacto ambiental no despreciable pero relativamente bajo.

Por otra parte, y haciendo referencia al proyecto conjunto más que a este trabajo en particular, el trabajo de Philipp Englisch ha tenido un impacto ambiental en el punto de instalación del dispositivo por la instalación de dispositivos en la roca con el fin de controlar el posicionamiento de la bomba undimotriz. Tanto como para la instalación de dichos dispositivos como para experimentar con el dispositivo de bombeo undimotriz fue necesario pedir permisos al gobierno de Chile. Cabe resaltar que dicha actividad es prácticamente reversible en su totalidad por lo que se puede afirmar que globalmente el proyecto *Dragón de Mar* tiene un impacto medioambiental prácticamente despreciable por las actividades desarrolladas hasta el momento.

Conclusiones

- Gracias a las herramientas de *Mecánica de Fluidos Computacional* se ha logrado diseñar un modelo de dispositivo de bombeo undimotriz con un desempeño del 47,73% superior al modelo de bomba undimotriz propuesto en primera instancia por *Eliecer Cabrera Fernández*.
- Los resultados de las simulaciones muestran que atrapa-olas demasiado cortos o con un ducto principal con un diámetro demasiado grande no resultan beneficiosos para el desempeño del dispositivo, por ende, la optimización del atrapa-olas pasa por aumentar su longitud y reducir su diámetro de ducto principal hasta encontrar el punto óptimo.
- Los resultados de las simulaciones muestran que para finalidades de experimentación y/o académicos no es recomendable invertir esfuerzos de construcción en desarrollar un atrapa-olas cuya transición entre su entrada y ducto principal no sea recta.
- Se ha demostrado mediante las simulaciones que las condiciones del oleaje condicionan en gran medida el desempeño de los dispositivos undimotrices, siendo en el caso del *Dragón de Mar* la profundidad del lecho marino la condición más relevante para el desempeño del dispositivo.
- Atendiendo al punto anterior y en vista de los resultados de las simulaciones se pone en cuestión la capacidad del dispositivo *Dragón de Mar* de alcanzar una altura de bombeo significativa si se instala en aguas someras. Por ende, se recomienda invertir esfuerzos en considerar una instalación *offshore* del dispositivo, ubicación dónde las condiciones del oleaje favorecen mucho su desempeño.
- Bajo la imposibilidad de instalar el dispositivo en aguas profundas se recomienda considerar la posibilidad de utilizar el dispositivo de bombeo undimotriz para abastecer un depósito de agua a baja altura conectado a un sistema de bombeo por golpe de ariete, el cual es capaz de bombear agua a gran altura con agua proveniente de un depósito situado a baja altura.

- Se recomienda plantearse la posibilidad de usar el dispositivo undimotriz para generar energía eléctrica a través de turbinas para usar posteriormente dicha electricidad para el bombeo de agua ni que ello suponga renunciar a la idea de un dispositivo de bombeo directo de agua sin transformación de energía.
- Puesto a que el *Dragón de Mar* es un dispositivo undimotriz puntual, se recomienda valorar la posibilidad de instalar varios dispositivos en paralelo con el fin de aumentar la altura de bombeo.

Agradecimientos

Agradezco toda la amistad y el apoyo tanto profesional como moral prestado por parte de los tutores de este trabajo Udo Rheinschmidt y Romain Gers, y por parte de mis compañeros de trabajo Philipp Englisch y Eliecer Cabrera Fernández. Su ayuda ha sido fundamental no sólo para desarrollar este trabajo sino también para crecer más como persona por lo que les estoy eternamente agradecido.

Me gustaría agradecer también el apoyo incondicional prestado por mi familia tanto en la elaboración de este trabajo como durante todos los años que he podido compartir mi vida con ella.

Bibliografía

- [1] LIN, PENGZHI. *Numerical modeling of water waves*. Londres: Taylor & Francis, 2008.
- [2] HOLTHUIJSEN, LEO H. *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge: Cambridge University, 2010.
- [3] STOKER, JAMES JOHNSTON. *Water waves: the mathematical theory with applications*. Nueva York: Interscience Publishers, 1957.
- [4] HUNT, J. N. *Gravity waves in water of finite depth*. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1997.
- [5] DEAN, ROBERT G. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. Nueva Jersey: World Scientific Publishing , 1991.
- [6] Open University. Oceanography Course Team. *Waves, tides, and shallow-water processes*. Oxford : Butterworth-Heinemann, in association with the Open University, 1999.
- [7] MIT. Department of Ocean Engineering [en línea]. Fecha de Consulta 4/03/2018. Disponible en:http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19bu/node3.html
- [8] Norwegian University of Science and Technology. Trondheim, Norway [en línea]. Fecha de Consulta 4/03/2018. Disponible en:
http://folk.ntnu.no/oivarn/hercules_ntnu/LWTcourse/lwt_new_2000_Part_A.pdf
- [9] Benny Lautrup (2011). Stokes Waves. Physics of continuous matter
<http://www.almazan-ingenieros.es/data/archivo/Descripcion,%20medida%20y%20 analisis%20del%20oleaje.pdf>
- [10] Palomino M, Almazán J (2000). Descripción, medida y análisis del oleaje. Universidad politécnica de Madrid.
- [11] Francisco E. Jarabo Friedrich, Francisco J. García Álvarez. La conservación de la energía en los fluidos: hidrodinámica, hidrostática y termodinámica. Departamento de Ingeniería Química y T.F. - Universidad de La Laguna.
- [12] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 20/03/2018. Disponible en:

https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_wave#/media/File:Water_wave_theories.svg

- [13] Cfd-online [en línea]. Fecha de consulta 8/03/2018. Disponible en: <https://www.cfd-online.com/Wiki/CFD-Wiki:Introduction>
- [14] Francisco E. Jarabo Friedrich, Francisco J. García Álvarez. La conservación de la energía en los fluidos: hidrodinámica, hidrostática y termodinámica. Departamento de Ingeniería Química y T.F. - Universidad de La Laguna.
- [15] Esteve Baraut Marsal (2016). Disseny i anàlisi comparatiu d'un doble difusor respecte d'un difusor convencional de F1. Universitat Politècnica de Catalunya.
- [16] Universidad de Valparaíso. Atlas del oleaje Chileno. Fecha de consulta 10/03/2018. Disponible en: <http://www.oleaje.uv.cl/>
- [17] W3 salemstate [en línea]. Fecha de consulta 15/03/2018. Disponible en: http://w3.salemstate.edu/~lhanson/gls210/GLS210_coasts/waves.html
- [18] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 20/03/2018. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Stokes_wave#/media/File:Water_wave_theories.svg
- [19] MIT. Department of Ocean Engineering [en línea]. Fecha de Consulta 4/03/2018. Disponible en: [http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19bu/node3.htmlfile:///C:/Users/Estudiante/Downloads/9780387233321-c2%20\(1\).pdf](http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19bu/node3.htmlfile:///C:/Users/Estudiante/Downloads/9780387233321-c2%20(1).pdf)
- [20] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 22/03/2018. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Cnoidal_wave#/media/File:Cnoidal_wave_profiles.svg
- [21] Ocean Energy Systems [en línea]. Fecha de consulta 24/03/2018. Disponible en: <https://www.ocean-energy-systems.org/>
- [22] Facultad Regional de Buenos Aires. Energías renovables en el medio marino [en línea]. Fecha de consulta 26/03/2018. Disponible en: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/wp-content/uploads/20170113-Energ%C3%ADas-renovables-en-el-medio-marino-01.jpg>
- [23] Dmitri Kuzmin. Institute of Applied Mathematics University of Dortmund. Introduction to Computational Fluid Dynamics [en línea]. Fecha de consulta 1/04/2018. Disponible en: <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>
- [24] Cfd-online [en línea]. Fecha de consulta 8/03/2018. Disponible en: <https://www.cfd-online.com/Wiki/CFD-Wiki:Introduction>
- [25] Juan Pedro Cascales Sandoval y Jose Carlos Gallego Fernández. Método de

- discretización. [en línea]. Fecha de consulta 5/04/2018. Disponible en:
http://webs.um.es/jmz/IntroFisiCompu/Alumnos/06_Pozo_de_Potencial/archivos/discretizacion.pdf
- [26] André Bakker. Applied Computational Fluid Dynamics [en línea]. Fecha de consulta 6/04/2018. Disponible en: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/01-intro.pdf>
- [27] Walter Frei (2017). Comsol [en línea]. Fecha de consulta 6/04/2018: Disponible en: <https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- [28] Florida State University. Reynolds Decomposition [en línea]. Fecha de consulta 6/04/2018. Disponible en:
<http://www.eng.fsu.edu/~dommelen/courses/flm/14/topics/turb/node2.html>
- [29] Enginering [en línea]. Fecha de consulta 10/04/2018. Disponible en:
<https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/13743/Choosing-the-Right-Turbulence-Model-for-Your-CFD-Simulation.aspx>
- [30] Manual de Ansys [en línea]. Fecha de consulta 10/04/2018. Disponible en:
<http://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node238.htm>
- [31] Manual de Ansys [en línea]. Fecha de consulta 10/04/2018. Disponible en:
https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.2.3/en-us/help/flu_ug/flu_ug_sec_uns_solve_pvel.html
- [32] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 20/04/2018. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/PISO_algorithm#/media/File:Flow_chart_of_PISO_algorithm.png
- [33] Eliecer Cabrera Fernández (2018). Bombeo de agua con energía undimotriz. Universidad Técnica Federico Santa María.
- [34] Universidad de Valparaíso. Atlas del oleaje Chileno. Fecha de consulta 24/04/2018. Disponible en: <http://www.oleaje.uv.cl/>
- [35] Textos científicos [en línea]. Fecha de consulta 24/04/2018. Disponible en:
<https://www.textoscientificos.com/energia/dispositivos-generacion-energia-olas>
- [36] Morales E (2016), Análisis de un dispositivo oscilante como medio de captación de energía undimotriz. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile.
- [37] Businesswire [en línea]. Fecha de consulta 2/05/2018. Disponible en:
<https://www.businesswire.com/news/home/20071113005143/en/Pelamis-Wave-Power-Delivers-Ocean-Energy-Generators>
- [38] Rojas J (2009). Evaluación Técnico Económica de una Central Undimotriz con Tecnología Pelamis en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial,

Universidad de Chile.

- [39] Universidad de Coruña. Energía de las olas: Situación y Futuro [en línea]. Fecha de consulta 5/05/2018. Disponible en:
https://www.udc.es/iuem/documentos/doc_xornadas/anaeco/APROVEITAMENTODAE_NERXIADASOLAS.pdf
- [40] The lyncean group of San Diego [en línea]. Fecha de consulta 5/05/2018. Disponible en: <https://lynceans.org/tag/powerbuoy/>
- [41] Erik Friis Madsen. Wave Dragon. University of Denmark [en línea]. Fecha de consulta 15/05/2018. Disponible en: <https://www.slideshare.net/ErikFriisMadsen/icoe-2012-wave-dragon-b>
- [42] Portal da energia [en línea]. Fecha de consulta 15/05/2018. Disponible en: <http://portaldaenergia.com/energia-das-ondas/>
- [43] Lilypad. [en línea]. Fecha de consulta 15/05/2018. Disponible en: <http://www.energyisland.com/projects/lilypad/lilypad.html>
- [44] Google maps [en línea]. Fecha de consulta 1/06/2018. Disponible en: <https://www.google.com/maps>
- [45] Emol [en línea]. Fecha de consulta 7/07/2018. Disponible en: <http://www.emol.com/noticias/Economia/2017/07/19/867452/Mapa-Cuanto-cuesta-la-energia-electrica-en-el-mundo.html>
- [46] Generadoras [en línea]. Fecha de consulta 7/07/2018. <http://generadoras.cl/generacion-electrica-en-chile>
- [47] Banco Central de Chile. Base de datos estadísticos [en línea]. Fecha de consulta 7/07/2018. Disponible en: <https://si3.bcentral.cl>
- [48] Hrudnick [en línea]. Fecha de consulta 7/07/2018. Disponible en: http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno11/CO2/Site/Emisiones_de_CO2_en_Chile.html
- [49] Engineersedge [en línea]. Fecha de consulta 10/07/2018. Disponible en: https://www.engineersedge.com/fluid_flow/pressure_drop/moody_chart.htm
- [50] Grubelnik V., Marhl M., *Drop formation in a falling stream of liquid. Am. J. Phys.* 73 (5) May 2005, pp. 415-419
- [51] Manual de Ansys [en línea]. Fecha de consulta 11/07/2018. Disponible en: <https://www.sharcnet.ca/Software/Fluent6/html/ug/node882.htm>
- [52] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 11/07/2018. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Shallow_water_equations
- [53] Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 13/07/2018. Disponible en: [https://es.wikipedia.org/wiki/Divergencia_\(matem%C3%A1tica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Divergencia_(matem%C3%A1tica))

- [54]** Enseeiht [en línea]. Fecha de consulta 13/07/2018. Disponible en:
<http://hmf.enseeiht.fr/travaux/CD0809/bei/beiep/9/html/vof/vof.html>
- [55]** Wikipedia [en línea]. Fecha de consulta 13/07/2018. Disponible en:
https://en.wikipedia.org/wiki/Large_eddy_simulation
- [56]** Cefrc Princeton [en línea]. Fecha de consulta 13/07/2018. Disponible en:
<https://cefrc.princeton.edu/sites/cefrc/files/Files/2015%20Lecture%20Notes/Poinsot/5-Codes-DNS-LES-RANS.pdf>