

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

————— TRABAJO FIN DE GRADO —————

**SIMULACIÓN CFD DEL
COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS
UNIDADES DE DETECCIÓN DEL
TELESCOPIO SUBMARINO DE
NEUTRINOS KM3NeT**



TRABAJO FINAL DEL
Grado en Ingeniería Aeroespacial

REALIZADO POR
José Vicente González Calatayud

TUTORIZADO POR
Miguel Ardid Ramírez
Dídac Diego Tortosa

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Resumen

KM3NeT (www.km3net.org) será el detector de neutrinos submarino más grande del mundo. Se compone por Unidades de Detección, consistentes en líneas verticales de 18 Módulos Ópticos de Detección erguidas por flotabilidad. Su base está anclada al lecho marino pero el resto de la línea se encuentra en constante movimiento a causa de las corrientes marinas. Es necesario monitorizar la posición de cada Módulo para poder reconstruir la trayectoria del neutrino detectado. Mediante CFD (Computational Fluid Dynamics) se pretende estudiar en detalle cómo se distribuyen las fuerzas y momentos infringidos por las corrientes dependiendo de su velocidad y dirección a lo largo de la línea. Dichas simulaciones ayudarán a comprender el comportamiento de ésta y a mejorar los modelos matemáticos usados por el Modelo Mecánico de reconstrucción actual. Las simulaciones se realizarán mediante el software ingenieril SimScale que, además de su potencial, es el primero que permite simular todo desde la nube.

Palabras clave

CFD; hidrodinámica; KM3NeT; neutrino; SimScale; Modelo mecánico

Abstract

KM3NeT (www.km3net.org) aims to be the biggest submarine neutrino detector. It is made up of Detection Units that are vertical lines with 18 Detection Optical Modules straightened by buoyancy. The line base is anchored to the seabed but the rest of it is in constant movement due to sea currents. This justifies the position monitoring of each Module so that when a neutrino is detected, the track of the particle can be reconstructed. Through CFD (Computational Fluid Dynamics) simulations, forces and moments infringed by sea currents, depending on their velocity and direction, will be studied. The simulations will help to understand the line behaviour and therefore enhance the mathematical models used by the Mechanical Model reconstruction. The software chosen to work with is SimScale, innovative software with big potential and first allowing to make the entire simulation process on the web.

Keywords

CFD; hydrodynamics; KM3NeT; neutrino; SimScale; Mechanical Model

Resum

KM3NeT (www.km3net.org) serà el detector de neutrins submarí més gran del món. Es compon per Unitats de Detecció, les quals estan formades per línies verticals amb 18 Mòduls Òptics de Detecció mantingudes en vertical per la seua flotabilitat. La seua base està ancorada al fons marí, però la resta de la línia es troba en constant moviment a causa dels corrents marins. És necessari monitorar la posició de cada Mòdul per poder reconstruir la trajectòria del neutrí detectat. Mitjançant CFD (Computational Fluid Dynamics) es pretén estudiar en detall com es distribueixen les forces i moments infringits pels corrents depenent de la seua velocitat i direcció al llarg de la línia. Les simulacions ajudaran a comprendre el comportament d'aquesta i a millorar els models matemàtics utilitzats pel Model Mecànic de reconstrucció actual. Les simulacions es realitzaran mitjançant el software ingenieril SimScale que, a més del seu potencial, és el primer que permet simular-ho tot en línia.

Paraules clau

CFD; hidrodinàmica; KM3NeT; neutrí; SimScale; Model Mecànic

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Miquel y a Dídac su ayuda en la realización del trabajo, su predisposición y su siempre rápida respuesta.

No puedo olvidarme de mis amigos de estos cuatro años de carrera, gracias a ellos ha sido todo mucho más fácil y nos hemos apoyado en los peores momentos. Son lo mejor que me llevo de esta etapa.

Por último, quiero agradecer a mi familia. A mis tíos de Valencia y en especial a mis padres, por haberme apoyado en todo momento y permitirme con su esfuerzo estudiar en la universidad.

Índice

Resumen	I
Abstract	III
Resum	V
Agradecimientos	VII
Índice	IX
Índice de figuras	XII
Índice de tablas	XVI
Nomenclatura	XVII
I Memoria	1
1 Introducción	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
2 Los neutrinos	4
2.1 La partícula	4
2.2 Los mensajeros cósmicos ideales	6
2.3 Detección de los neutrinos	6
2.4 Clasificación de los neutrinos según su energía	7
3 KM3NeT	9
3.1 Los módulos sensores. Digital Optical Modules: DOMs	10
3.2 Las unidades de detección. Detection Units: DUs	12
3.3 ARCA. KM3NeT-It	14
3.4 ORCA. KM3NeT-Fr	17
3.5 KM3NeT-Gr	19
3.6 Radiación de Cherenkov	20
4 Propiedades del agua marina. Oceanografía física	26
4.1 Variación de las propiedades con la profundidad	26
4.1.1 Temperatura	26

4.1.2	Densidad	26
4.1.3	Salinidad	26
4.2	Propiedades a las profundidades de ARCA y ORCA	28
4.3	Las corrientes marinas	28
4.4	Compresibilidad del agua	29
4.5	Flujo sobre cuerpos inmersos. Flujo externo	30
4.6	Regímenes del flujo sobre cuerpos inmersos. El número de Reynolds	31
5	Simulaciones CFD	33
5.1	Pre-Proceso	34
5.1.1	Modelado Conceptual	34
5.1.2	Dominio computacional y geometría	36
5.1.2.1	Dominio	36
5.1.2.2	Geometría	37
5.1.3	Mallado	38
5.1.3.1	Tipología	38
5.1.3.2	Calidad	42
5.1.4	Propiedades del fluido. Modelos adicionales	43
5.1.4.1	Propiedades del fluido	43
5.1.4.2	Modelo de turbulencia. Modelo k-omega SST	43
5.1.5	Condiciones de contorno y condiciones iniciales	44
5.1.5.1	Velocity inlet	44
5.1.5.2	Pressure Outlet	45
5.1.5.3	Wall	45
5.1.5.4	Simmetry	47
5.1.5.5	Condiciones iniciales	47
5.2	Solver	48
5.2.1	Esquemas y algoritmos numéricos	48
5.2.2	Criterios de convergencia	50
5.2.2.1	Residuales	50
5.2.2.2	Fenómenos espurios	51
5.2.2.3	Variación de variables de interés	52
5.3	Post-Proceso	55
5.3.1	Sensibilidad malla	55
5.3.2	Validación	57
5.3.3	Post-procesado	58
6	Análisis de resultados	59
6.1	Boya	59

6.2	DOM.....	61
6.3	DOM y enganche cables.....	63
6.4	DOM, enganche y cables según orientación.....	63
6.5	Modelo mecánico. MM.....	65
7	Conclusiones	69
7.1	Conclusiones de CFD.....	69
7.2	Conclusiones acerca de SimScale.....	70
7.3	Trabajos futuros.....	71
	Referencias	72
II	Pliego de condiciones	76
	Objeto	76
	Condiciones de software necesario	76
III	Presupuesto	78
	Introducción	78
	Desarrollo del presupuesto	78
	Capital humano.....	78
	Licencias de software.....	78
	Equipo informático.....	79
	Presupuesto total	79

Índice de figuras

1	Vista desde el interior de un detector. Se observa la base que ancla las líneas al lecho marino, los DOMs (forma esférica) y la boya amarilla de una DU	2
2	El Modelo Estándar es un triunfo de la física moderna. Con el puñado de partículas aquí mostradas se puede dar explicación a toda la materia que de momento se conoce, desde los átomos hasta galaxias enteras [3]	4
3	Leptones con sus masas. En el caso de los neutrinos, cotas superiores a sus masas, ya que todavía no han podido medirse sus valores aproximados [4]	5
4	Logo de KM3NeT. “Abre una nueva ventana hacia nuestro universo”, y también contribuirá a la investigación de las propiedades de los escurridizos neutrinos	9
5	Modelo 3D de un Digital Optical Module; DOM para abreviar [1] . . .	10
6	Fotografía de un DOM de KM3NeT	11
7	Detection Units de los detectores ARCA (Subsección 3.3) y ORCA (Subsección 3.4) [12]	12
8	DOM integrado en la DU gracias a dos cuerdas paralelas de Dyneema y la estructura de titanio. Pegado a la cuerda de la derecha se observa el cable electroóptico, también conocido como <i>backbone cable</i>	13
9	Control y monitorización desde la sala de control de la estación costera de Portopalo di Capo Passero [15]	15
10	Las cinco DUs de KM3NeT enrolladas en sus LOM a bordo del buque de superficie para realizar su implementación [15]	16
11	Vista en planta de la superficie del lecho marino ocupada por cada detector	18
12	Localizaciones de los sitios KM3NeT; el de Grecia es el sitio más profundo (4550 m) de los que están siendo estudiados	19
13	Radiación de Cherenkov generada por el reactor nuclear Breazeale Nuclear Reactor en el agua que actúa como sistema de refrigeración. La fantasmagórica luz azul es más intensa cuando el reactor pasa de operar a 500 kW a 1 MW pues aumenta la emisión de partículas cargadas	20

14	Ondas de presión emitidas en un punto que se mueve a velocidad $u = 0$, flujo en calma (izq.) y a velocidad $0 < u < a$, flujo subsónico (dcha.) [17]	21
15	Ondas de presión emitidas en un punto que se mueve a velocidad $u = a$, flujo transónico (izq.) y a velocidad $u > a$, flujo supersónico (dcha.)	22
16	Anillos de luz que se crean cuando la partícula cargada deja de emitir radiación de Cherenkov	23
17	Imagen de la detección de un neutrino muónico (izq.) y un neutrino electrónico (dcha.) en el experimento Super-Kamiokande en 1998. Lo que vemos son círculos de luz producidos por un muón y un electrón, que a su vez provienen cada uno de un tipo de neutrino. Los colores representan el tiempo de llegada de la señal a cada píxel, siendo el azul y el violeta tiempos más tempranos y el naranja y el rojo más tardíos [4]	24
18	Perfiles de la temperatura, salinidad y densidad. Aparecen indicadas la termoclina, haloclina y pycnoclina. Fuente: ICM-CSIC	27
19	Datos de la velocidad de corriente en el sitio de instalación de ORCA (arriba) y de la dirección (abajo) [23]	29
20	Logo del software SimScale	33
21	Metodología CFD. Proceso completo [25]	34
22	Dimensiones del volumen fluido en función de una longitud de referencia L que para el caso del DOM es el diámetro d . Abajo a la derecha se observa el sistema de referencia empleado, estando el centro del DOM en el origen de éste. El flujo tiene dirección x y sentido positivo por lo que los puntos del dominio con coordenada x positiva se encuentran aguas abajo. Notar que por la simetría del DOM el dominio se ha reducido a la mitad. Se ha elegido que el plano de simetría sea el $x - z$ por conveniencia más tarde de las CC	37
23	Set-up de la malla en SimScale	39
24	Malla obtenida con el <i>standard mesher automatic</i> y un <i>fineness</i> de 4,8. Está compuesta de 130,8k celdas y 44k nodos	40
25	Mallado automático para captar el perfil de velocidad de la capa límite mediante celdas prismáticas alineadas a la superficie de la pared con la condición de no deslizamiento	41
26	Corte del volumen fluido mediante la opción <i>Mesh clip</i> para ver su mallado interior dominado por hexaedros	41

27	Introducción de las propiedades del fluido	43
28	Velocity inlet BC. El flujo entra al dominio a $u = 0,12 \text{ ms}^{-1}$	44
29	Pressure outlet BC	45
30	Slip wall BC. Condición de deslizamiento	46
31	No-Slip wall BC. Condición de no deslizamiento	46
32	47
33	En SimScale, el algoritmo SIMPLE es el que viene por defecto a la hora de realizar una simulación incompresible estacionaria. En esta ventana también se elige el modelo de turbulencia que se determinó en 5.1.4.2	48
34	49
35	Residuales de la simulación tras 1000 iteraciones. (En el eje x aparece "Time (s)" por lo explicado en el apartado anterior del paso temporal en las simulaciones estacionarias)	51
36	Lineas de corriente sobre el DOM	51
37	Definición de los coeficientes de fuerzas y momentos. Como solo se está simulando la mitad del cuerpo porque se ha aplicado simetría, ha de introducirse la mitad del área frontal del cuerpo entero	53
38	Evolución del C_D del DOM simplificado como una esfera a través de todo el proceso de simulación, conforme aumentan las iteraciones ...	54
39	<i>Area average</i> de la presión en el inlet	54
40	<i>Area average</i> de la U_x en el outlet	55
41	Malla 3: mayor refinamiento estudiado (2,5M celdas). Se aprecia a simple vista la mayor densidad de elementos en comparación con la de la Figura 24	56
42	C_D como función del Re para un cilindro y esfera lisos	57
43	Patrones típicos de flujo a través de un cilindro para varios Re indicados en la Figura 42 [28]	59
44	C_D de la boya frente iteraciones	60
45	C_D de un cilindro en función del Re y del <i>Aspect Ratio</i>	60
46	Campo del módulo de la velocidad en el plano de simetría de la boya. El flujo incide de derecha a izquierda	61
47	Mallado en el que predominan las celdas hexaédricas con <i>Region refinement</i> y <i>Surface refinement</i>	61

48	C_D obtenido con la malla de la Figura 47. Vista en detalle de su valor entre las iteraciones 500 y 800. El valor se asienta sobre la iteración 725 y de ahí mantiene un valor medio contante. Las oscilaciones sobre ese valor medio se deben a la turbulencia	62
49	Presión relativa en la superficie del DOM. Se observa un aumento de presión en la parte que primero ve la corriente debido a que frena el fluido: la presión de parada. Luego a medida que el fluido acelera, disminuye la presión (similar al <i>efecto Venturi</i>)	62
50	<i>Streamlines</i> de la corriente marina incidiendo en el DOM con el enganche. En la superficie del cuerpo se ha representado la distribución de presión relativa	63
51	Vista frontal de las orientaciones que se van a estudiar. De izquierda a derecha: 0, 30, 45, 60 y 90 grados	64
52	C_D en función de la orientación. Se unen los valores discretos mediante líneas para estudiar mejor la aparente tendencia	64
53	MM	65
54	Comparación de los resultados obtenidos con el MM al actualizar los datos del C_D obtenidos mediante CFD para el detector ARCA . . .	67
55	Comparación de los resultados obtenidos con el MM al actualizar los datos del C_D obtenidos mediante CFD para el detector ORCA . . .	68

Índice de tablas

1	Comparación entre los detectores ARCA y ORCA. Los datos se corresponden a cuando la instalación esté totalmente completada y están aproximados. Notar que el volumen instrumentado de ORCA es 250 veces menor al del detector ARCA: está optimizado para las menores energías de los neutrinos necesarias para la medida de la jerarquía de masa de los neutrinos. También cabe destacar el hecho que la granularidad de los DOMs de cada detector es diferente	18
2	Componentes de la sal marina típica [20]	27
3	Valores del módulo de compresibilidad en condiciones ambiente [17]	29
4	Estudio de sensibilidad de malla. “Number of volumes” indica el número de celdas	56
5	Valores de variables de interés según la malla	57
6	Altura entre los diferentes pisos o plantas de las DU y altura acumulada de los detectores ARCA y ORCA	67
7	Costes de los recursos humanos	78
8	Costes del software	79
9	Costes del equipo	79
10	Presupuesto total	80

Lista de símbolos

α	Ángulo de Mach	[rad]
μ	Viscosidad dinámica	[kg m ⁻³]
ν	Viscosidad cinemática	[m ² s ⁻¹]
ρ	Densidad	[kg m ⁻³]
\tilde{A}	Amplitud de la oscilación dividida entre el valor promedio	[-]
A	Área frontal	[m ²]
a	Velocidad del sonido	[m s ⁻¹]
c	Constante universal de la velocidad de la luz en el vacío	[m s ⁻¹]
C_D	Coefficiente de resistencia	[-]
C_L	Coefficiente de sustentación	[-]
d	Diámetro	[m]
H	Altura boya	[m]
K	Módulo de compresibilidad	[N m ⁻²]
L	Longitud característica	[m]
Ma	Número de Mach	[-]
Re	Número de Reynolds	[-]
u	Velocidad absoluta de un flujo	[m s ⁻¹]
AHRS	Attitude and Heading Reference System	
ANTARES	Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch	
APS	Acoustic Positioning System	
ARCA	Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss	
BC	Boundary Condition	

CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CC	Condiciones de Contorno
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMB	Cosmic Microwave Background
CNB	Cosmic Neutrino Background
DNS	Direct Numerical Simulation
DOM	Digital Optical Module
DU	Detection Unit
EMSO	European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory
ESFRI	European Strategy Forum on Research Infrastructures
FPGA	Field Programmable Gate Array
GNN	Global Neutrino Network
IGIC	Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de zonas Costeras
KM3NeT	Cubic Kilometre Neutrino Telescope
LES	Large Eddy Simulation
LOM	Launcher of Optical Modules
MEOC	Main Electro-Optic Cables
MM	Mechanical Model
MM	Mechanical Model
NEMO	The Neutrino Ettore Majorana Observatory
NEXT	Neutrino Experiment with a Xenon TPC
ORCA	Oscillation Research with Cosmics in the Abyss

PMT	Photomultiplier Tube
RANS	Reynolds-Averaged Navier Stokes
ROV	Remotely Operated Vehicle
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SST	Shear Stress Transport
ToT	Time-Over-Treshold
UHE	Ultra-High-Energy
UHECR	Ultra-High-Energy Cosmic Rays
UPV	Universitat Politècnica de València

Parte I

Memoria

1. Introducción

1.1. Motivación

El estudio de los neutrinos y sus propiedades ha acaparado la atención del campo de la física desde antes incluso que se demostrara su existencia, como se justificará en la [Sección 2](#) dedicada a esta partícula.

Su difícil detección, requiere de emplazamientos de los detectores poco comunes como debajo del hielo, en el interior de una montaña o en el fondo de los océanos. En el último emplazamiento citado, se ubican los telescopios de neutrinos del proyecto europeo KM3NeT [1]: en las profundidades del mar Mediterráneo.

Los detectores consisten en un conjunto de líneas verticales de detección (DUs) ancladas al lecho marino. Cada línea contiene a su vez módulos de detección óptica (DOMs) capaces de detectar una tenue luz azul, *la radiación de Cherenkov* ([Subsección 3.6](#)), que se emite cuando los neutrinos interactúan con el agua.

Las DUs ([Subsección 3.2](#)) se mantienen erguidas en la posición vertical por la flotabilidad de los DOMs ([Subsección 3.1](#)) y de una boya situada al final de la línea ([Figura 1](#)). No obstante, debido a las corrientes marinas, están sometidas a constante movimiento desplazando hasta unas decenas de metros los DOMs de su posición vertical justo encima de la base de la DU.

Para poder reconstruir la dirección del neutrino detectado, es necesario conocer la posición exacta de cada DOM en el momento del evento. No es posible geolocalizar cada DOM con señales GPS, ya que éstas no alcanzan las profundidades a las que se encuentra KM3NeT. En su lugar, se utiliza un sistema de posicionamiento acústico (APS: Acoustic Positioning System), para conocer la posición de cada DOM con una exactitud estimada de unos 20 cm. Cada DOM lleva instalada una tarjeta de Attitude and Heading Reference System (AHRS) para monitorear la orientación del DOM con una incertidumbre asociada de 3,5°.

Los datos en bruto obtenidos por estos sistemas de medidas se filtran y analizan de acuerdo a un Modelo Mecánico (MM) capaz de predecir aproximadamente la forma de la línea de la DU dada una velocidad de corriente marina y su dirección (posicionando cada DOM y boya de la misma DU). La flotabilidad de la boya y de cada DOM, y la resistencia que ejerce el fluido sobre el sistema, son parámetros tenidos en cuenta.

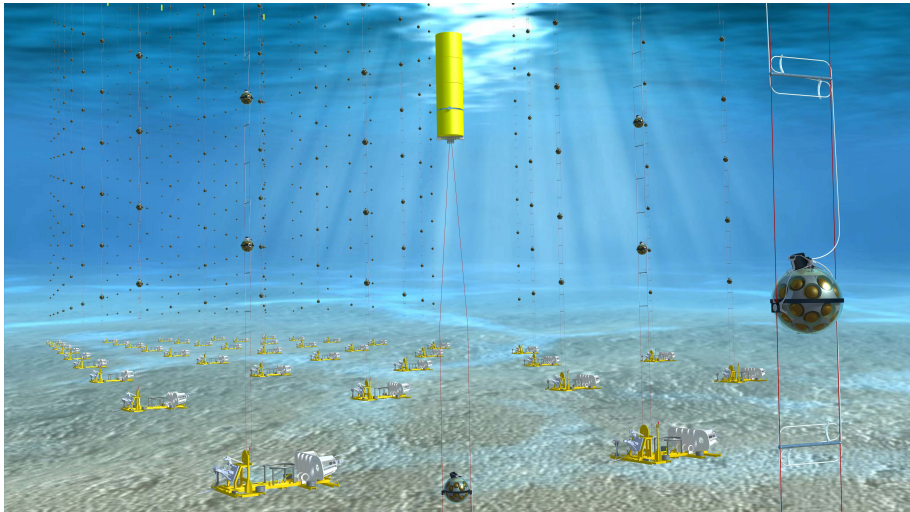


Figura 1: Vista desde el interior de un detector. Se observa la base que ancla las líneas al lecho marino, los DOMs (forma esférica) y la boya amarilla de una DU

Mediante la técnica de métodos numéricos CFD (Computational Fluid Dynamics) se pretende estudiar en detalle el comportamiento del flujo sobre los diferentes componentes de la DU. El objetivo es obtener resultados que permitan refinar el MM actual y reducir su error.

Las simulaciones se realizarán con el software *SimScale*. Se comenzará simulando el DOM y la boya, simplificando su geometría por la de una esfera y un cilindro respectivamente. Esto permitirá validar los resultados obtenidos, ya que simulaciones de flujo externo sobre estas geometrías se encuentran ampliamente estudiadas en la literatura. Seguidamente, y ya sabiendo que las simulaciones están bien configuradas, se procederá a estudiar el coeficiente de resistencia del DOM junto con el enganche para los cables. Posteriormente, se añadirán los cables para evaluar su influencia en el resultado. Para finalizar, se

le darán diferentes orientaciones al conjunto DOM, enganche y cable para estudiar cómo varía el coeficiente de resistencia según la dirección desde la que incida la corriente. Todas las simulaciones se realizarán para una velocidad de corriente constante y de $0,12 \text{ m s}^{-1}$.

1.2. Objetivos

Así pues, la realización del presente Trabajo Fin de Grado cumplimenta los siguientes objetivos:

- Realizar simulaciones CFD siguiendo todos los pasos de la metodología del proceso completo.
- Llevar a cabo las simulaciones CFD con el software ingenieril SimScale que cuenta con la novedad de ser el primero que permite simular todo desde “la nube”, lo que permitirá comprobar de primera mano las ventajas de las que SimScale hace gala y si este tipo de simulación online se espera que sea el estándar de la industria aeroespacial en los próximos años.
- Obtener el coeficiente de resistencia de los componentes de la DU.
- Conseguir resultados fiables de los campos escalares y vectoriales de las diferentes variables fluidas.
- Estudiar el comportamiento del flujo cuando incide en el detector.
- Cuantificar el efecto de la dirección desde la que incide la corriente.
- Refinar con los datos obtenidos el MM que se emplea actualmente.
- Aprender sobre los neutrinos y por qué es tan importante su detección y estudio.
- Comprender cómo funciona la organización de un proyecto de colaboración internacional del más alto nivel como es KM3NeT.
- Estudiar el funcionamiento de los detectores y sus componentes para una posterior caracterización.
- Investigar sobre las propiedades del agua marina a las profundidades del detector, y sobre las corrientes marinas, con el fin de establecer las hipótesis correctas en el planteamiento del problema.

2. Los neutrinos

2.1. La partícula

Los neutrinos son partículas subatómicas pertenecientes al grupo de los *Leptones*, que a su vez pertenecen al grupo de los *Fermiones*, según la teoría del *Modelo Estándar* de la física [2]. Esta teoría, uno de los grandes logros del siglo XX, describe el universo utilizando 6 *quarks*, 6 *leptones* y 4 partículas que modelan las fuerzas producidas en la escala cuántica (Figura 2).

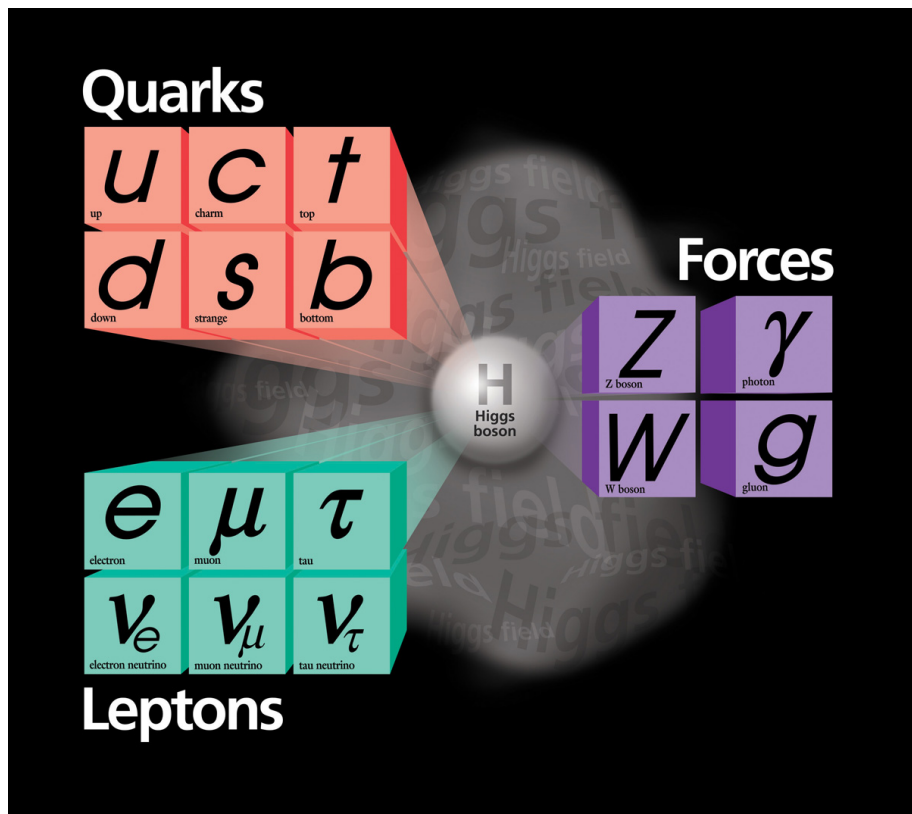


Figura 2: El Modelo Estándar es un triunfo de la física moderna. Con el puñado de partículas aquí mostradas se puede dar explicación a toda la materia que de momento se conoce, desde los átomos hasta galaxias enteras [3]

Dentro de los leptones, 3 de las 6 partículas poseen carga. Estas son el *electrón* (e), el *muón* (μ) y el *tau* (τ). En los tres casos, la carga es negativa y la

diferencia radica en que, de acuerdo con el orden en el que han sido nombradas, va en aumento el peso de las partículas (Figura 3). Cada una de ellas lleva asociado un *sabor* de neutrino: el electrón lleva asociado el neutrino de “sabor electrónico” ν_e , el muón el de “sabor muónico” ν_μ y el tau el de “sabor tau” ν_τ .

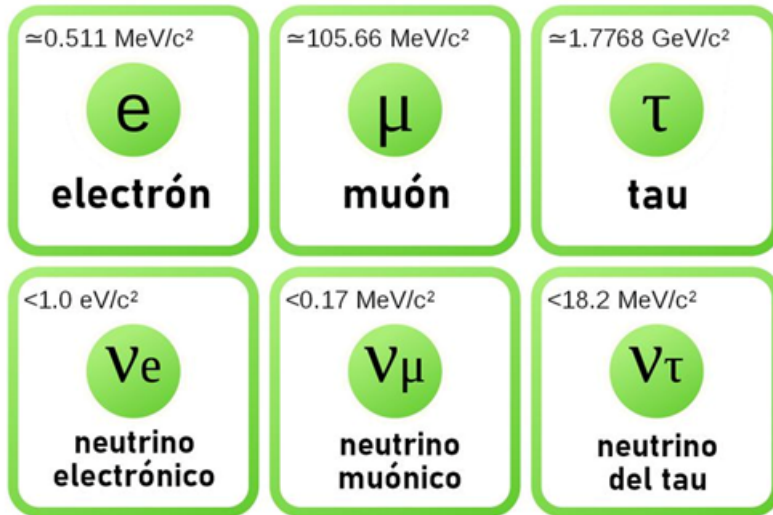


Figura 3: Leptones con sus masas. En el caso de los neutrinos, cotas superiores a sus masas, ya que todavía no han podido medirse sus valores aproximados [4]

Como se puede deducir por el nombre, los neutrinos son neutros de carga. De hecho, el físico *Wolfgang Pauli* cuando en 1930 propuso la existencia de esta partícula, le dio el nombre *neutrón* [5]. Sin embargo, cuando el también célebre físico italiano *Enrico Fermi* decidió incorporar esta partícula para acabar de explicar la llamada *Interacción de Fermi*, ya se habían descubierto los actuales *neutrones* (fueron descubiertos en el año 1933) por lo que acabó nombrando a esta peculiar partícula como *neutrino*, denominación que literalmente significa “neutrón pequeño”.

El adjetivo “pequeño” se debe a que la masa de los neutrinos es ínfima y no se ha podido llegar a medir con exactitud; solamente se conocen cotas máximas de su masa. Durante mucho tiempo se pensó que realmente no tenían masa

debido a la dificultad de medir valores tan pequeños. Esto les confiere la capacidad de atravesar cualquier tipo de medio. Es una de las razones por las que se les conoce comúnmente como los “fantasmas del universo”. La otra razón es el tiempo que se tardó en demostrar mediante un experimento (el experimento realizado por *Frederick Reines* y *Clyde Cowan* en Savannah River en los años 50 [6]) su existencia real y que no eran solo especulaciones de los científicos.

Los neutrinos son parte clave para comprender la *radiactividad*, fenómeno físico consistente en la emisión espontánea de partículas por parte de ciertos átomos. Por ejemplo en la *radiación alfa* se emite un trozo pequeño de núcleo (2 protones y 2 neutrones) y en la *radiación beta* se emite un leptón cargado junto con su correspondiente neutrino. Por ende, el Sol, la atmósfera, el interior de la tierra, centrales nucleares, bombas atómicas o, en definitiva, medios en los que tenga lugar la radiactividad son una fuente incesable de neutrinos.

2.2. Los mensajeros cósmicos ideales

Los neutrinos, al tener una masa ínfima y ser nulos de carga no sienten la fuerza nuclear fuerte pero tampoco interactúan a través de la fuerza nuclear débil. Esto permite que puedan viajar a través del universo, cruzando galaxias e incluso estrellas, sin cambiar su dirección ni velocidad. Son las únicas partículas que señalan directamente a su punto de origen y cuyas propiedades permiten indagar acerca de los poderosos procesos físicos que han creado y avivan los lugares más extremos del cosmos. Los neutrinos de muy alta energía provenientes de fuera del sistema solar son los mensajeros cósmicos ideales.

Además, son la segunda partícula más abundante, después de los fotones. Hay más de 300 neutrinos por cada centímetro cúbico de nuestro universo y están por todas partes. Miles de millones de neutrinos solares atraviesan La Tierra cada segundo, y billones de ellos son creados cada minuto por la interacción de los rayos cósmicos¹ en la atmósfera terrestre [7].

2.3. Detección de los neutrinos

El gran problema a la hora de detectar neutrinos es que son partículas que interactúan muy difícilmente con la materia, tanto que la propia Tierra es prácticamente transparente para un neutrino. Dada la rareza de las interacciones,

¹Los rayos cósmicos son partículas que llegan desde el espacio y bombardean constantemente la Tierra desde todas direcciones

es necesario crear detectores particulares, caracterizados por un volumen instrumentado muy grande: las estimaciones teóricas indican un volumen de al menos un kilómetro cúbico.

Para protegerse de la radiación cósmica que llega del espacio, los detectores deben instalarse en lugares fuertemente protegidos. Hay experimentos, como el experimento español NEXT (Neutrino Experiment with a Xenon TPC), que tienen lugar bajo tierra [8]. Otra solución es la de instrumentar adecuadamente grandes volúmenes de un medio natural transparente, como el agua de las profundidades marinas o el hielo de los polos. En estos medios transparentes, es posible detectar una tenue luz azulada: la *radiación de Cherenkov* (más información en la [Subsección 3.6](#)) generada por las partículas en las que decaen los neutrinos (electrones, muones y taus) las veces que sí interactúan con la materia.

El agua (o hielo) tiene una triple función:

- Actúa como escudo protector de los rayos cósmicos que “cegarían” al detector si éste estuviera en la superficie.
- Es un medio en el que interactúan los neutrinos decayendo a partículas secundarias.
- Es un medio en el que se produce la *radiación de Cherenkov* y a través del cual se propaga.

Mediante una matriz tridimensional de sensores ópticos dispuestos en un volumen de aproximadamente un kilómetro cúbico se puede detectar la tenue luz producida. Esto permite reconstruir el rastro de la partícula cargada que la ha producido, partícula cargada que tiene sustancialmente la misma dirección que el neutrino padre que le dio lugar. Como consecuencia, se puede estudiar la fuente del neutrino.

2.4. Clasificación de los neutrinos según su energía

- **Neutrinos de baja energía.** Son creados principalmente en procesos nucleares, como los que suceden en el Sol o en el centro de una explosión de una supernova. Los neutrinos de energía más baja son los llamados neutrinos reliquia o fondo cósmico de neutrinos (CNB: Cosmic Neutrino Background). Son similares a la radiación de fondo de microondas

(CMB: Cosmic Microwave Background), pero traen información acerca de un universo todavía más antiguo, solo dos segundos después del Big Bang.

- **Neutrinos de alta energía.** Son creados en colisiones de partículas de alta energía, como las colisiones de rayos cósmicos con la atmósfera de la Tierra. Su rango de energía se expande desde unos pocos MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$)² hasta décimas de un PeV ($1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$).
- **Neutrinos de muy alta energía.** Fueron creados en o cerca de los objetos más extremos de nuestro universo, como los agujeros negros y las estrellas de neutrones, y alcanzan energías que van desde unos pocos TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$) hasta 10 PeV.
- **Neutrinos de ultra-alta energía (UHE: Ultra-High-Energy) o neutrinos cosmogénicos.** Neutrinos acelerados a energías superiores a 10 PeV. Estos neutrinos son producidos por la interacción de rayos cósmicos de ultra-alta energía (UHECR: Ultra-High-Energy Cosmic Rays) con la radiación cósmica de fondo de microondas.

²El electronvoltio eV es una unidad de energía: $1 \text{ eV} = 1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

3. KM3NeT

El *Cubic Kilometre Neutrino Telescope*, o KM3NeT (su logo se muestra en la [Figura 4](#)), se trata de un proyecto de investigación europeo para albergar la siguiente generación de telescopios de neutrinos [1]. KM3NeT se compone actualmente de dos infraestructuras de detección (hay una tercera siendo estudiada para una posible expansión), situadas en las aguas más profundas del mar Mediterráneo, en el abismo del océano, con diferentes objetos de estudio: ARCA ([Subsección 3.3](#)) y ORCA ([Subsección 3.4](#)).



Figura 4: Logo de KM3NeT. “Abre una nueva ventana hacia nuestro universo”, y también contribuirá a la investigación de las propiedades de los escurridizos neutrinos

Las instalaciones también alojarán instrumentación para las Ciencias del Mar y la Tierra, para una monitorización en línea y de larga duración del medio ambiente del fondo marino y del relieve oceánico a una profundidad de varios kilómetros.

KM3NeT es uno de los miembros fundadores de la Global Neutrino Network (GNN), que pretende una colaboración más estrecha y una estrategia coherente entre los proyectos de telescopios de neutrinos de todo el mundo [9]. En la actualidad, se compone de ANTARES, Baikal-GVD, IceCube y KM3NeT.

KM3NeT se incluye en la lista de proyectos de alta prioridad seleccionados por el Foro de Estrategia Europea de Infraestructuras de Investigación (ESFRI). En él colaboran más de 250 científicos de más de 50 institutos científicos de todo el mundo. La Universitat Politècnica de València (UPV) es parte activa por medio de investigadores del Grupo de Física de Astropartículas del departamento de Física Aplicada, perteneciente al Instituto de Investigación para la Gestión Integrada de Zonas Costeras (IGIC) del Campus de Gandia [10].

3.1. Los módulos sensores. Digital Optical Modules: DOMs

Cada detector de la infraestructura de detección de neutrinos de KM3NeT es una matriz tridimensional de módulos sensores distribuidos en grandes volúmenes de agua transparente de las profundidades del mar Mediterráneo. Al módulo sensor se le conoce como *Digital Optical Module*, cuyas siglas se utilizarán de aquí en adelante: DOM.

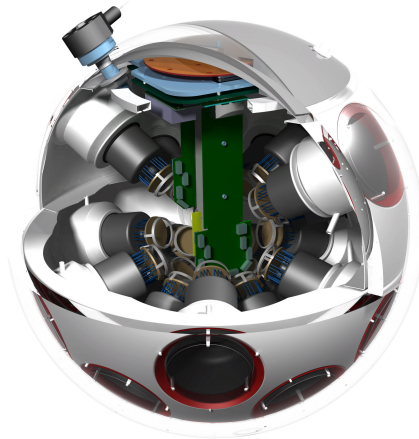


Figura 5: Modelo 3D de un Digital Optical Module; DOM para abreviar [1]

Los DOM se tratan de esferas de vidrio resistentes a la presión que albergan tubos fotomultiplicadores (PMT)³ para la detección de la luz y varios instrumentos que determinan la propia posición del DOM y que calibran las señales medidas.

Los DOM registran el tiempo de llegada de la *radiación de Cherenkov* (una explicación detallada se encuentra en la [Subsección 3.6](#)) generada en el agua de mar por partículas cargadas creadas en la interacción de los neutrinos con el agua de dentro o cerca del detector. Los DOM también registran el brillo de la luz y la posición geométrica del propio módulo sensor en el momento de llegada de la luz. Las mediciones son transmitidas a los ordenadores de la estación costera mediante una red de fibra óptica.

³Los tubos fotomultiplicadores (PMT) son dispositivos de detección de fotones que utilizan el *efecto fotoeléctrico* para convertir la luz en una señal eléctrica [11]. El *efecto fotoeléctrico*, por su parte, consiste en la emisión de electrones (fotoelectrones) de un material cuando radiación electromagnética (fotones), que alcanza o supera un umbral de energía, impacta contra su superficie.

El recipiente esférico de vidrio del DOM tiene un grosor de pared suficiente para resistir las enormes presiones existentes en el fondo del océano. Dentro, están dispuestos 31 PMT para buscar en todas las direcciones la tenue luz emitida por las partículas que pasan.



Figura 6: Fotografía de un DOM de KM3NeT

Los PMT han de ser provistos de un alto voltaje de alrededor de 1000 V. Éste se proporciona por un circuito hecho a medida en la parte de atrás del tubo fotomultiplicador. La placa de circuito se ha fabricado en pequeña escala para que quepa en el espacio limitado dentro de la esfera de vidrio.

Además, el DOM contiene sensores cuyo propósito es la calibración: una tarjeta electrónica de compás y brújula permite saber hacia qué dirección cada uno de los PMT está apuntando; acelerómetros que permiten determinar la inclinación, el cabeceo y la guiñada del módulo; y una cerámica piezoeléctrica que, usada como receptor de acústica, es capaz de determinar la posición del DOM en las 3 dimensiones. Todas estas mediciones son importantes ya que los DOMs se mueven bajo la influencia de las corrientes marinas y se desea controlar su posición y orientación con la máxima resolución posible para facilitar la detección y reconstrucción del camino seguido por el neutrino.

3.2. Las unidades de detección. Detection Units: DUs

Unidades de Detección (DUs), así se conoce al conjunto de 18 DOMs conectados entre sí y colocados a lo largo de una línea vertical, la base (DU-base o anchor-frame) que ancla la línea al lecho marino y una boya cilíndrica situada en la parte alta de la línea (Top buoy) para que ésta se mantenga erguida (Figura 7).

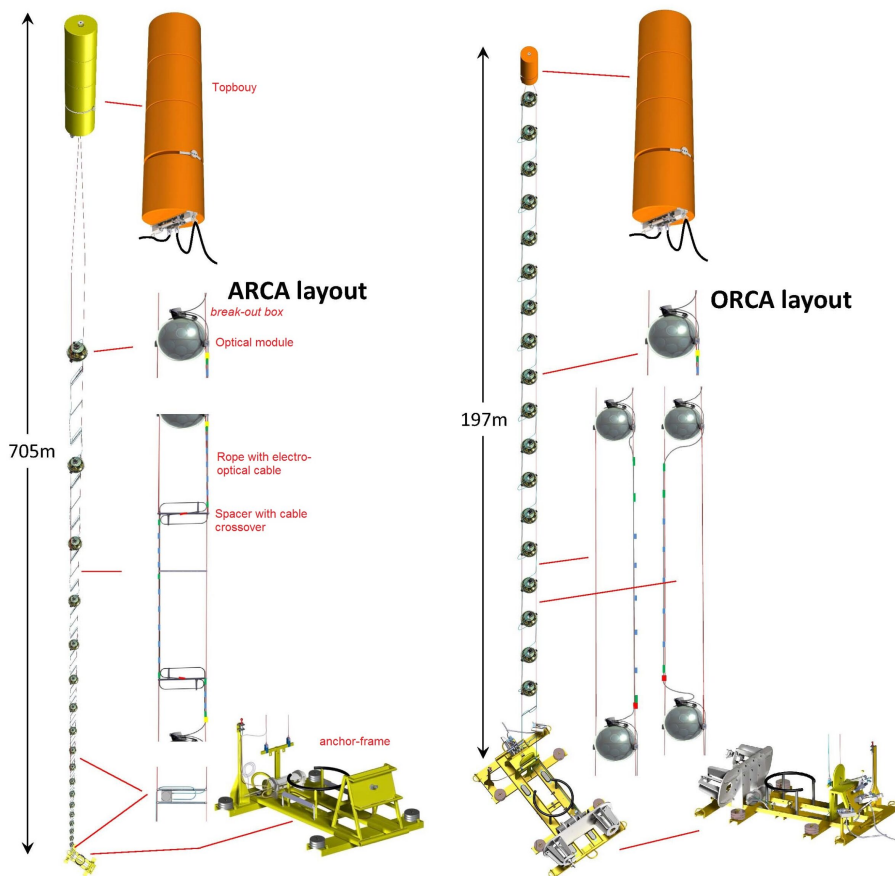


Figura 7: Detection Units de los detectores ARCA (Subsección 3.3) y ORCA (Subsección 3.4) [12]

La estructura vertical de la línea se consigue mediante dos cuerdas de 15 mm

de grosor de *Dyneema*, una fibra sintética de alta resistencia, que sujetan cada DOM al pasar por un collar de titanio que rodea la esfera de vidrio. A su vez, los DOM están conectados entre sí por medio de un cable *electroóptico*: se trata de un tubo de plástico, relleno de aceite, equilibrado de presión, que contiene 2 cables de cobre para la transmisión de potencia y 18 fibras ópticas para la transmisión de datos. Todo esto se muestra en la [Figura 8](#).



Figura 8: DOM integrado en la DU gracias a dos cuerdas paralelas de Dyneema y la estructura de titanio. Pegado a la cuerda de la derecha se observa el cable electroóptico, también conocido como *backbone cable*

La DU flota presenta flotabilidad por sí misma sin necesidad de la boya gracias a la flotabilidad de cada DOM. Además, el diseño en una línea vertical minimiza la resistencia. Sin embargo, las DUs se mueven bajo la influencia de las corrientes marinas y para que se mantengan lo más estáticas posibles, sobre todo ante grandes corrientes, se añade la boya de final de línea previamente comentada.

3.3. ARCA. KM3NeT-It

ARCA son las siglas de *Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss* pues su objetivo es la búsqueda de neutrinos de fuentes astrofísicas distantes del Universo: como las supernova⁴, brotes de rayos gamma⁵ o colisiones estelares.

Gracias a la resolución angular del telescopio ARCA (capacidad de un instrumento de distinguir entre dos objetos muy próximos) se estudia el flujo cósmico de neutrinos de muy alta energía; energías entre varias decenas de GeV y PeV. Esto permite obtener datos esenciales acerca de su origen, espectro de energía y composición de sabor.

La localización en la que ARCA está siendo instalado se encuentra en Italia, y pertenece, por consiguiente, al sitio KM3NeT-It. Más concretamente se encuentra a aproximadamente 100 km de la costa del pequeño pueblo *Portopalo di Capo Passero*, en la isla de *Sicilia* (Figura 12). Desde este emplazamiento en el hemisferio norte, se estima que un 87% del cielo podrá ser mapeado, incluyendo la mayor parte de la galaxia y el centro galáctico.

La ubicación es la misma que la del antiguo detector NEMO (The Neutrino Ettore Majorana Observatory) y está compartido con la instalación EMSO (European Multidisciplinary Seafloor and water column Observatory) para los estudios de las ciencias del mar y la Tierra.

⁴Una supernova es una explosión estelar que ocurre cuando una estrella masiva se queda sin “combustible nuclear” en su núcleo y colapsa. Ya no se crea presión debido a la incineración nuclear de la estrella, la cual compensaba el intento de la gravedad de la estrella de compactarla para que fuera lo más pequeña y densa posible. Otro tipo de supernova se produce cuando una enana blanca, estrella del tamaño del Sol sin combustible, choca con otra o extrae demasiada materia de su estrella binaria. Una supernova puede dejar atrás un núcleo muy denso y una nebulosa (nube expansiva de gas caliente), una estrella de neutrones, un agujero negro o destruirse por completo [13].

⁵La radiación gamma γ es un tipo de radiación ionizante electromagnética, constituida por fotones, de alta energía capaz de penetrar profundamente la materia. Los brotes de rayos gamma (Gamma-Ray Bursts, en inglés) son las explosiones más fuertes y brillantes que tienen lugar en el universo. Producen tanta energía como la que emitirá el sol durante toda su existencia. Se clasifican en brotes de rayos gamma largos (de una duración entre 2 y 30 segundos) y en brotes de rayos gamma cortos (de una duración menor a 2 segundos). El primer tipo proviene de hipernovas (supernovas ultra poderosas de entre 5 y 10 veces la masa del Sol y 100 veces más brillantes que una supernova típica) mientras que el segundo tipo proviene de la colisión de dos estrellas de neutrones o cuando un agujero negro engulle una estrella de neutrones. Las explosiones son tan fuertes que se producen pequeñas ondas en el tejido del espacio-tiempo; las conocidas como ondas gravitacionales [14].

La infraestructura de la costa consta de instalaciones para proveer de potencia eléctrica a los detectores submarinos y una estación costera con una sala de control (Figura 9).



Figura 9: Control y monitorización desde la sala de control de la estación costera de Portopalo di Capo Passero [15]

El detector de neutrinos submarino consistirá en 2 bloques de 115 DUs (Subsección 3.2). Para este detector, las líneas verticales tienen una altura de unos 700 m y se encuentran ancladas al lecho marino a una profundidad de 3500 m. El volumen instrumentado será de cerca de 1 kilómetro cúbico (de ahí el nombre del proyecto KM3NeT), ligeramente mayor que el del telescopio de neutrinos IceCube⁶. En fases posteriores se espera que el telescopio esté compuesto de varios kilómetros cúbicos. A día de hoy, la implementación de la configuración completa y en adelante está parcialmente financiada.

En la actualidad, 6 DUs se encuentran operativos en ARCA. El pasado mes de abril del presente año 2021 [10] se añadieron 5 nuevas DUs a la que ya se encontraba en uso (ver Figura 10). Asimismo, se incorporó una nueva caja de

⁶El observatorio de neutrinos IceCube está situado en la Antártida, en el hielo del polo sur

conexiones (Junction Box), que es el hub desde el que se distribuye la potencia y el flujo de datos a las unidades de detección.

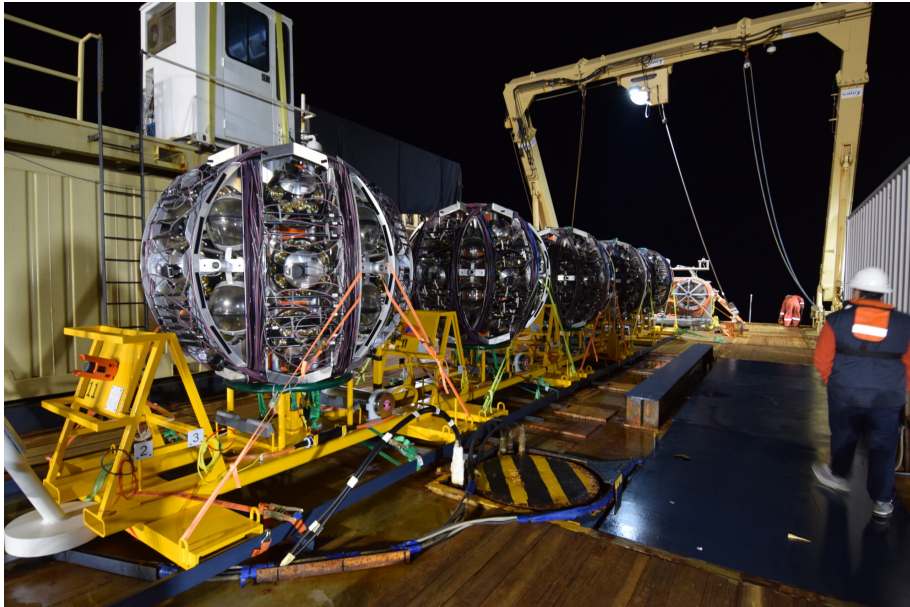


Figura 10: Las cinco DUs de KM3NeT enrolladas en sus LOM a bordo del buque de superficie para realizar su implementación [15]

Para su implementación y almacenaje, las DUs se enrollan alrededor de una estructura esférica de 2 m de diámetro, la cual se conoce como LOM (por sus siglas en inglés Launcher of Optical Modules). Mediante un buque de superficie se despliega el LOM con su correspondiente DU en su posición designada del lecho marino con una precisión de 1 m. Con la ayuda de un ROV (Remotely Operated Vehicle) se conecta la DU-base con la caja de conexiones o en serie con una DU previamente implementada. Cuando se verifica la conexión desde la estación de tierra, una señal acústica desencadena el desenrollamiento de la DU. El LOM vacío flota hasta la superficie y es recuperado.

3.4. ORCA. KM3NeT-Fr

ORCA, cuyo nombre proviene de *Oscillation Research with Cosmics in the Abyss*, tiene la finalidad del estudio de las propiedades fundamentales de los neutrinos, aprovechando los abundantes flujos de neutrinos producidos en las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera terrestre.

ORCA está siendo instalado a 40 km de la costa de *Tolón*, Francia (Figura 12). Forma parte del sitio KM3NeT-Fr. La profundidad del mar Mediterráneo en esas coordenadas es de 2450 m. El enclave se encuentra 10 km al oeste del detector de neutrinos ANTARES⁷ (Astronomy with a Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), el predecesor de KM3NeT.

En el lecho marino está instalada una red electroóptica de alta velocidad para proveer potencia y la transmisión de datos hacia y desde la infraestructura. Está conectada con la costa mediante dos cables MEOC (Main Electro-Optic Cables) que van a una central eléctrica situada en la playa *Les Sablettes* en *La Seyne sur Mer*. Desde ahí sale un cable de tierra hacia la estación costera en el instituto *Michel Pacha*. Ahí, vía software específico se filtran los datos y se hace una primera selección y reconstrucción del evento detectado.

Las líneas verticales de las DUs tienen una altura de 150 m para este detector y serán dispuestas en un solo bloque de 115 DUs, a diferencia de ARCA donde se ha comentado que son 2 los bloques (en la Tabla 1 pueden compararse los datos cuantitativos de las dos infraestructuras de detección). Esta densa configuración (ejemplo gráfico en la Figura 11) es la requerida para la detección de neutrinos con energías tan bajas como 1 GeV (3 órdenes de magnitud menos que la escala típica de energía sondada por ARCA).

La primera fase de construcción ha comenzado y prevé un prototipo de matriz compuesta por 6 DUs (casualmente el mismo número que ARCA tras los últimos avances) con una separación horizontal de unos 20 m. El detector ORCA al completo constará de un bloque de detección de 115 unidades de detección y tendrá un volumen instrumentado total de sobre 3.7 Mton de agua de mar, por tanto, proporcionando nuevas oportunidades para los estudios de oscilación de neutrinos en el Mediterráneo, complementarios a aquellos que usan experimentos con reactor y con rayos de neutrinos.

⁷ANTARES es el primer telescopio submarino de neutrinos operativo en el mar Mediterráneo. Cuenta con 12 líneas y lleva operando más de una década, demostrando la viabilidad de la técnica y abriendo una nueva ventana al universo a través de la detección de neutrinos [10]

Detector	ARCA	ORCA
Sitio KM3NeT	KM3NeT-It	KM3NeT-Fr
Distancia de la costa [km]	100	40
Profundidad del mar [m]	3500	2450
DUs por bloque	115	115
n° de bloques	2	1
Distancia entre DOMs en una DU [m]	40	9
Distancia horizontal entre DUs [m]	100	20
Altura DUs [m]	700	200
Volumen instrumentado [km ³]	1	0,004

Tabla 1: Comparación entre los detectores ARCA y ORCA. Los datos se corresponden a cuando la instalación esté totalmente completada y están aproximados. Notar que el volumen instrumentado de ORCA es 250 veces menor al del detector ARCA: está optimizado para las menores energías de los neutrinos necesarias para la medida de la jerarquía de masa de los neutrinos. También cabe destacar el hecho que la granularidad de los DOMs de cada detector es diferente

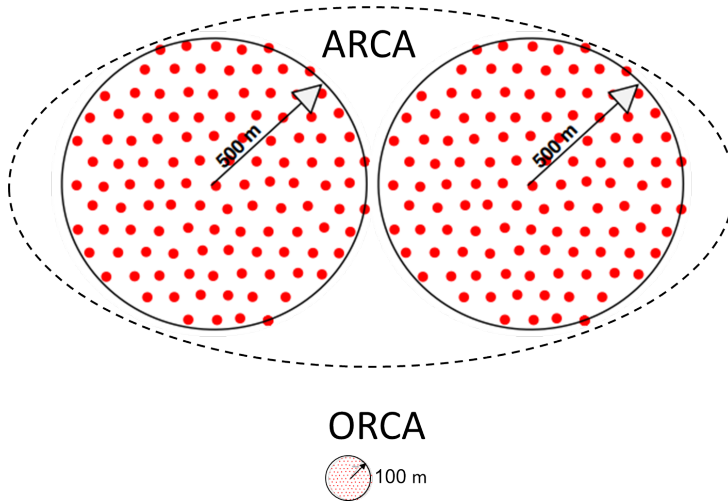


Figura 11: Vista en planta de la superficie del lecho marino ocupada por cada detector

3.5. KM3NeT-Gr

Se está evaluando incluir un tercer sitio en Grecia, KM3NeT-Gr, además de los ya comentados ubicados en Italia y Francia. Varias localizaciones en la costa de *Pylos* están siendo estudiadas, con profundidades comprendidas entre los 3000 y los 4550 m. La expansión está sujeta a futura financiación. Está disponible una estación costera que solo necesita de algunas nuevas instalaciones.



Figura 12: Localizaciones de los sitios KM3NeT; el de Grecia es el sitio más profundo (4550 m) de los que están siendo estudiados

3.6. Radiación de Cherenkov

La *radiación de Cherenkov* (también es posible encontrar el nombre en los libros de física sin la “h”: Cerenkov) se trata de una luz entre azul y violeta que se emite en un medio transparente cuando una partícula cargada viaja a través de ese medio transparente (y dieléctrico) más rápido de lo que lo hace la luz a través de él [16].



Figura 13: Radiación de Cherenkov generada por el reactor nuclear Breazeale Nuclear Reactor en el agua que actúa como sistema de refrigeración. La fantasmagórica luz azul es más intensa cuando el reactor pasa de operar a 500 kW a 1 MW pues aumenta la emisión de partículas cargadas

Cuando la luz se encuentra un medio transparente como cristal, plástico, agua o incluso aire, su velocidad a través de ese medio se ralentiza. Este fenómeno, estudiado desde los cursos más básicos de física, es el que se conoce como *índice de refracción*. En el agua, la velocidad de la luz es aproximadamente un 75 % de la que tiene en el vacío. En la [Ecuación 1](#) se muestra la constante universal c de la velocidad de la luz en el vacío:

$$c = 299792458 \text{ ms}^{-1} \approx 300000 \text{ kms}^{-1} \quad (1)$$

Cuando los neutrinos provenientes de la atmósfera o del cosmos penetran en el agua de mar e interactúan con ella, decaen en electrones o muones. Como se explicó en la [Subsección 2.1](#), estas son partículas cargadas, que si provienen de un neutrino con energía suficiente, se mueven más rápido que los fotones de luz (en el agua) y emiten, por tanto, *radiación de Cherenkov*. La explicación física del por qué aparece la radiación escapa a los contenidos de este texto pero lo que sí se destaca es cómo se aprovecha su existencia en los detectores de neutrinos submarinos.

Para explicarlo, se hará una analogía con la propagación de las ondas de presión emitidas en un punto que se mueve a velocidad u ; pues este es un ejemplo

conocido para los estudiantes de ingeniería aeroespacial [17].

Se ha de introducir primero el *número de Mach* (Ma):

$$Ma = \frac{u}{a} \quad (2)$$

El cual es un número adimensional definido como la velocidad absoluta de un flujo (u) dividida por la velocidad del sonido (a).

Ahora, se considera la propagación de una onda de presión. El ejemplo incluye las ondas sonoras, pues también son ondas de presión que captamos por nuestros oídos y nuestro cerebro interpreta como los sonidos que conocemos. Las ondas se propagan a la velocidad del sonido a desde su fuente emisora hacia todas las direcciones; son ondas esféricas.

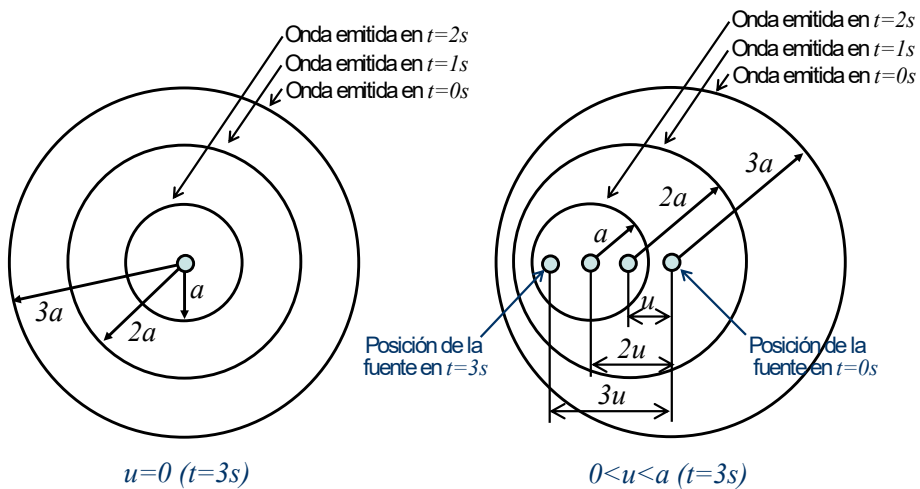


Figura 14: Ondas de presión emitidas en un punto que se mueve a velocidad $u = 0$, flujo en calma (izq.) y a velocidad $0 < u < a$, flujo subsónico (dcha.) [17]

Se produce una sucesión cíclica de ondas que, en su representación en 2 dimensiones (ver Figura 14 y Figura 15), son circunferencias. Cuando el punto (que puede ser, por ejemplo, un avión) se mueve a una velocidad u menor que la del sonido a , o lo que es lo mismo, si $Ma < 1$, los frentes de onda se propagan a velocidad $a - u$ aguas arriba pero a velocidad $a + u$ aguas abajo. Como consecuencia, el intervalo entre los frentes de onda es denso aguas arriba mientras

que aguas abajo es disperso. En las ondas sonoras se desarrolla una frecuencia de sonido más alta aguas arriba y viceversa aguas abajo, esto es lo que produce el *efecto Doppler*.

Cuando $u = a$, i.e., $Ma = 1$, la velocidad de propagación aguas arriba es 0 y solo se propaga aguas abajo. El frente de onda (Figura 15 izq.) produce una onda de Mach normal a la dirección del flujo.

Por último, cuando el punto se mueve más rápido que la velocidad del sonido (por ejemplo un avión supersónico), $Ma > 1$ y los frentes de onda solo se propagan aguas abajo. Estos frentes de onda forman un cono (visto en las 3 dimensiones), el conocido como *cono de Mach* (en inglés: *Mach cone*) y que se muestra en la Figura 15 dcha. La propagación del sonido se limita al interior del cono. El ángulo del cono de Mach es 2α siendo α el *ángulo de Mach* [18]:

$$\sin \alpha = \frac{a}{u} = \frac{1}{Ma} \quad (3)$$

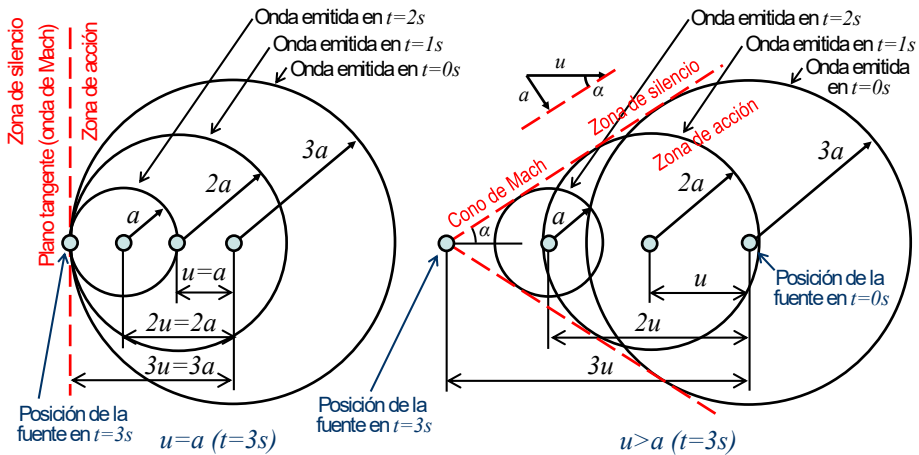


Figura 15: Ondas de presión emitidas en un punto que se mueve a velocidad $u = a$, flujo transónico (izq.) y a velocidad $u > a$, flujo supersónico (dcha.)

A partir del valor del ángulo de Mach (α) se puede conocer la velocidad del punto emisor de ondas. Si está yendo a una velocidad cercana a la del sonido, el cono es grueso mientras que cuanto más rápido vaya, el cono será más delgado y puntiagudo.

Hay infinitas ondas chocando en la superficie del cono, que es la onda de choque: una interferencia constructiva con todas las ondas que emitió el objeto sumándose en todos los puntos de la superficie. Esto, cuando lo atraviesas o te atraviesa, es lo que se conoce como *boom sónico*, que se puede ver como todo el sonido que el avión ha hecho durante un buen rato acumulado en un punto muy pequeño del espacio.

En la analogía con la *Radiación de Cherenkov* las ondas de sonido pasan a ser ondas de luz, el aire pasa a ser el agua de mar y el objeto moviéndose más rápido que la velocidad del sonido pasa a ser la partícula cargada que se mueve más rápido que la luz en ese medio [19].

La *luz de Cherenkov* emitida en un punto, irradia desde ese punto en una esfera la cual crece a la velocidad de la luz. Como la partícula cargada (que es la que emite la radiación) está viajando más rápido que la velocidad de la luz, se aleja de cada punto de su trayectoria en el que emite luz, más rápido que la velocidad a la que crece la esfera. El resultado es un cono de luz (análogo al cono de Mach) creciendo alrededor del camino tomado por la partícula y moviéndose hacia adelante.

Algunos de los neutrinos son de baja energía, por lo que sus correspondientes electrones o muones no viajan mucho tiempo a mayor velocidad que la de la luz, se van frenando en su interacción con el medio. La partícula emitirá *radiación de Cherenkov* un rato y luego dejará de emitirla. Eso se traduce en que la luz no será siempre un cono. En su lugar, en 3D la luz aparece como un anillo (una representación gráfica se muestra en la [Figura 16](#)).

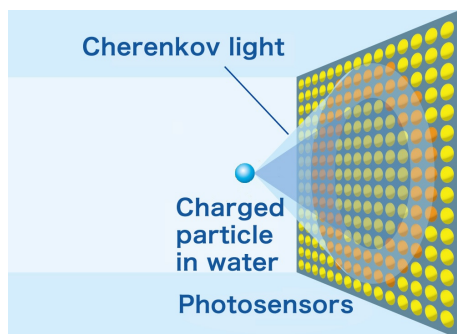


Figura 16: Anillos de luz que se crean cuando la partícula cargada deja de emitir radiación de Cherenkov

Esta característica peculiar es muy útil en los grandes detectores de neutrinos. Por ejemplo, el experimento *Super-Kamiokande* (*Super-K*) situado en Japón, consiste en un enorme tanque que contiene 50000 toneladas de agua. Es un cilindro de unos 40 m de diámetro y altura. Los neutrinos entran, interactúan con el agua y se convierten en electrones o muones. Algunos de los neutrinos que interactúan con el agua tienen poca energía por lo que los electrones o muones no viajan muy lejos. Por lo tanto, la radiación de Cherenkov crea anillos dentro del detector. Utilizando el tamaño de los anillos y el tiempo en el que la luz llega a los detectores a lo largo del aparato, los científicos pueden determinar la energía y trayectoria del neutrino padre (Figura 17).

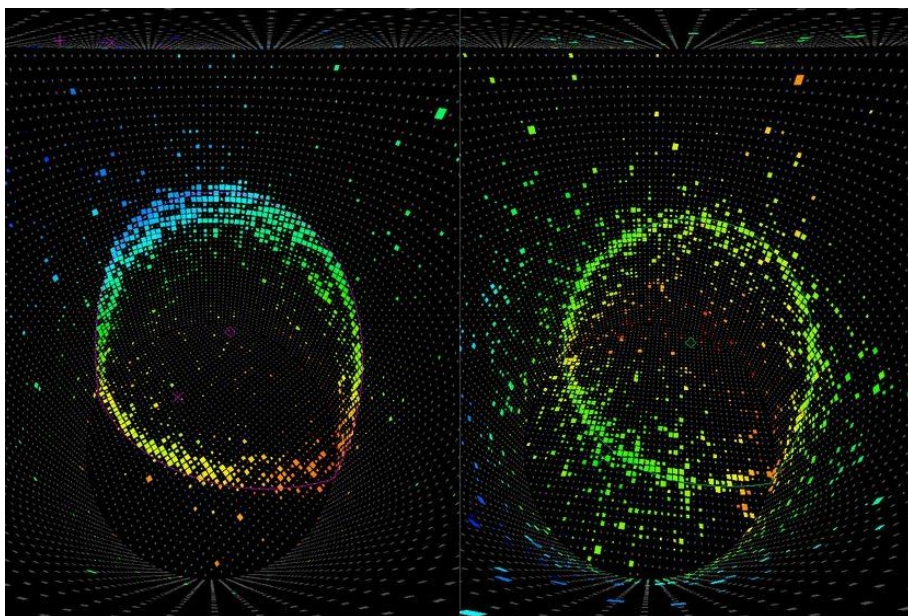


Figura 17: Imagen de la detección de un neutrino muónico (izq.) y un neutrino electrónico (dcha.) en el experimento Super-Kamiokande en 1998. Lo que vemos son círculos de luz producidos por un muón y un electrón, que a su vez provienen cada uno de un tipo de neutrino. Los colores representan el tiempo de llegada de la señal a cada píxel, siendo el azul y el violeta tiempos más tempranos y el naranja y el rojo más tardíos [4]

De una manera similar funcionan los detectores de KM3NeT (Sección 3). Cuando incide radiación de Cherenkov en algún DOM (3.1) de la matriz de módulos sensores, un pequeño pulso eléctrico es creado por el tubo fotomultiplicador (PMT). El pulso se amplifica y se transforma en un pulso de onda

cuadrada, mediante la técnica Time-Over-Threshold (ToT)⁸ y es enviado a la lógica central de procesamiento alojada en una Field Programmable Gate Array (FPGA) donde su tiempo de llegada y longitud del pulso se registra y almacena para un envío posterior al laboratorio de la costa.

⁸ToT es un método de procesamiento de señales en el que la cantidad de luz se transforma en una cantidad de carga que posteriormente se traduce a la longitud del pulso de onda cuadrada

4. Propiedades del agua marina. Oceanografía física

Debido a que los detectores son submarinos y se pretende estudiar cómo se ven afectados por las corrientes marinas, es necesario caracterizar de la manera más exacta posible las propiedades del agua del mar Mediterráneo a esas profundidades y aprender acerca de las corrientes marinas para determinar qué hipótesis se pueden suponer [20].

4.1. Variación de las propiedades con la profundidad

4.1.1. Temperatura

El agua marina no es perfectamente transparente, lo que produce que casi toda la radiación solar se absorba en la capa superficial, la cual se calienta. El viento y las olas hacen circular el agua en la capa superficial, distribuyendo la temperatura de una manera uniforme para los primeros cientos de metros. Por el contrario, debajo de esta capa mezclada la temperatura cae rápidamente: unos 10 grados Celsius en los siguientes 150 m hacia abajo. Esta zona de rápida transición se trata de la *termoclina* (ver [Figura 18](#)). Debajo de la termoclina, la temperatura sigue decayendo con la profundidad pero con un gradiente mucho menor. En los océanos, el 90% del agua se encuentra debajo de la termoclina. Estas capas más profundas del océano consisten en capas de igual densidad pero poco mezcladas.

4.1.2. Densidad

En medios de agua dulce como los lagos, la densidad cambia principalmente por la temperatura; en medios marinos la variación de densidad puede ser causada por cambios en la temperatura del agua y/o en la salinidad. A la capa en la que se produce un rápido aumento de la densidad se la conoce como *picnoclina* ([Figura 18](#)).

4.1.3. Salinidad

Es la medida de la sal disuelta en el agua (los componentes se encuentran desglosados en la [Tabla 2](#)). El agua con menor salinidad es menos densa por lo que “flota” sobre agua de mayor salinidad, de mayor densidad. Como la salinidad afecta a la densidad, juega un papel importante en su estratificación vertical. Un alto gradiente de salinidad, zona conocida como *haloclina*, se opondrá al mezclado, mientras que un bajo gradiente permite un mezclado del agua más

sencillo. Típicamente, en la estructura vertical del océano tiene mayor importancia la temperatura, sin embargo las haloclinas dominan en ciertas regiones del océano.

Componente	g/kg _{agua}
Agua pura	965,31
Cloro	19,10
Sodio	10,62
Magnesio	1,28
Azufre	2,66
Calcio	0,40
Potasio	0,38
Constituyentes menores	0,24
Trazas	0,01
Suma	1000

Tabla 2: Componentes de la sal marina típica [20]

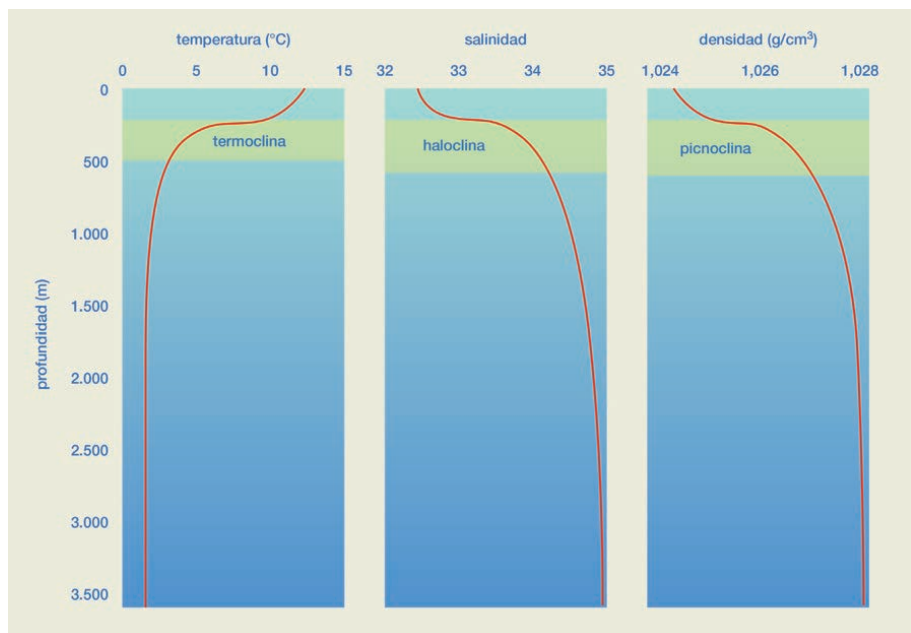


Figura 18: Perfiles de la temperatura, salinidad y densidad. Aparecen indicadas la termoclina, haloclina y picnoclina. Fuente: ICM-CSIC

4.2. Propiedades a las profundidades de ARCA y ORCA

A partir de las gráficas de la [Figura 18](#) se puede aproximar que la temperatura, salinidad y densidad es igual a la profundidad del detector ARCA y el detector ORCA (respectivamente 3500 y 2450 m, ver [Tabla 1](#)) e igual para toda la altura de la DU. Entrando con una temperatura de 4 grados y una densidad de $\rho = 1028 \text{ kg m}^{-3}$ a la tabla [21] se obtiene una viscosidad dinámica $\mu = 0,00167 \text{ N s m}^{-2}$.

Por su parte, la viscosidad cinemática es:

$$v = \frac{\mu}{\rho} = 1,62451 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

4.3. Las corrientes marinas

La profundidad del océano es despreciable frente a su amplitud. Siguiendo la analogía presentada en [22], si los océanos se escalaran a una amplitud de 8 pulgadas, tendrían profundidades del grosor de un folio de papel. Como resultado, el campo de velocidades del océano se puede aproximar como bidimensional: las velocidades verticales son mucho más pequeñas que las horizontales.

Esto, junto al hecho que el lecho marino de la zona de instalación de los detectores presenta pendiente prácticamente nula, permite suponer que la velocidad de la corriente incidente en la DU es horizontal y constante a lo largo de toda la línea.

En cuanto a las velocidades de corriente se extraen datos de un velocímetro de las corrientes marinas instalado en el detector ORCA. Por ejemplo, tomando todos los datos medidos en febrero de 2020 se llega a la [Figura 19](#). La corriente incide desde todas las direcciones y la velocidad fluctúa desde valores nulos, un estado de mar en calma, hasta unos 12 cm s^{-1} .

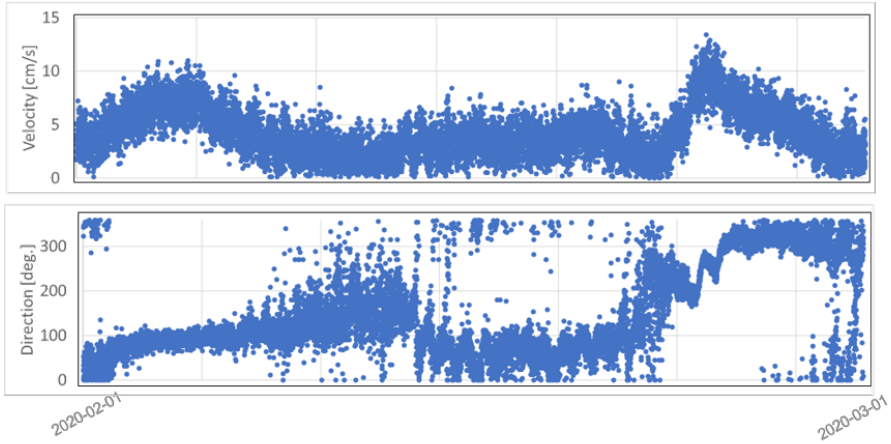


Figura 19: Datos de la velocidad de corriente en el sitio de instalación de ORCA (arriba) y de la dirección (abajo) [23]

4.4. Compresibilidad del agua

El agua es esencialmente incompresible, especialmente bajo condiciones normales. La incompresibilidad es una propiedad común de los líquidos, pero el agua lo es especialmente [24].

Esto se puede determinar cuantitativamente por medio del *módulo de compresibilidad* K de un material. Se define como la variación del volumen o la densidad debido a la variación de presión en un proceso isentrópico:

$$K = -V \left(\frac{\partial p}{\partial V} \right)_s = \rho \underbrace{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s}_{a^2} \quad (5)$$

Agua	$K = 2,15 \cdot 10^9 \text{ N m}^{-2}$
Aire	$K = 1,4 \cdot 10^5 \text{ N m}^{-2}$

Tabla 3: Valores del módulo de compresibilidad en condiciones ambiente [17]

Como indica la [Tabla 3](#), el módulo de compresibilidad del agua es 15000 mayor que el módulo de compresibilidad del aire. Es decir, el agua es 15000 veces “menos compresible” que el aire. Esta característica es la que ayuda a expulsar agua por las mangueras, por las pistolas de agua o por las fuentes: en todos los

casos se aplica presión a un volumen de agua que en vez de comprimirse, sale disparado por una abertura.

Se analiza si las variaciones de densidad debidas a la velocidad del flujo tienen importancia significativa en el sistema y han de ser modeladas. Comúnmente, cuando la velocidad del flujo excede el aproximadamente 30% de la velocidad del sonido (0,3 Mach), los efectos compresibles empiezan a ganar importancia. La velocidad del sonido en el agua salada es de aproximadamente $a = 1500 \text{ m s}^{-1}$ que junto con la velocidad de corriente descrita en la [Subsección 4.3](#) resultan en un $Ma = 0,00008$: régimen incompresible.

Como ejemplo de la vida real en el que el agua sí se comprime es el caso de las cortadoras de agua a presión en las que el fluido se expulsa a gran velocidad.

4.5. Flujo sobre cuerpos inmersos. Flujo externo

Se han de introducir ciertos aspectos del flujo a través de cuerpos inmersos en un fluido. Cuando el objeto está completamente rodeado por el fluido el flujo recibe el nombre de *flujo externo*.

Un cuerpo inmerso en un fluido en movimiento experimenta una fuerza resultante debida a la interacción entre el cuerpo y el fluido que lo rodea. En algunos casos (como el de un avión volando en viento en calma) el fluido lejos del cuerpo es estacionario y el cuerpo se mueve con velocidad U . En otras ocasiones (como cuando el viento sopla en un edificio) el cuerpo es estacionario y el fluido fluye a través del cuerpo con velocidad U . En ambos casos, se puede fijar el origen de coordenadas al cuerpo y tratar la situación como un fluido fluyendo a través de un cuerpo estacionario con velocidad U , la velocidad *aguas arriba*.

El efecto de la interacción entre el fluido y el objeto puede expresarse en términos de las fuerzas en la interfase cuerpo-fluido. Las fuerzas pueden ser descritas mediante esfuerzos: esfuerzos cortantes de pared en el cuerpo τ_w debidos a los efectos viscosos y esfuerzos normales debidos a la presión, p . τ_w y p varían en magnitud y dirección a lo largo de la superficie. Integrando la distribución del esfuerzo cortante en la superficie y la distribución de la presión se definen dos fuerzas resultantes:

- La fuerza resultante en la dirección de la corriente aguas arriba se define

como *drag*, D (en castellano: fuerza de resistencia).

- La fuerza resultante normal a la dirección de la corriente aguas arriba es el *lift*, L (la fuerza de sustentación).

Conocer las distribuciones exactas de presiones y de esfuerzos cortantes es muy difícil, se definen coeficientes adimensionales de lift (L) y drag (D) y se determinan sus valores aproximados mediante un análisis simplificados, algún método numérico o mediante un análisis apropiado. Son:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (7)$$

Típicamente A es el *área frontal*, el área proyectada vista por un observador que mira hacia el cuerpo desde una dirección paralela a la velocidad de corriente incidente. En otras ocasiones, A es el área vista desde arriba (el caso de las alas de los aviones).

4.6. Regímenes del flujo sobre cuerpos inmersos. El número de Reynolds

El flujo puede ser laminar o turbulento. En el flujo laminar los efectos viscosos dominan el flujo y las líneas de corriente no se mezclan entre sí: el régimen está caracterizado por capas regulares de fluido. Por su parte, un flujo turbulento es un patrón del movimiento del fluido caracterizado por variaciones caóticas de sus propiedades, donde aparecen vórtices no estacionarios de diferentes tamaños que interactúan entre ellos.

El *número de Reynolds* (Ecuación 8) determina la transición entre cada régimen. Se trata de un número adimensional que relaciona los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos:

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (8)$$

L se trata de la longitud característica del problema (depende de cada problema) mientras que el resto de variables son propiedades del flujo libre, el flujo

sin perturbar por la presencia del cuerpo.

$Re \downarrow \downarrow \implies$ Régimen laminar y $Re \uparrow \uparrow \implies$ Régimen turbulento. Los valores para los que tiene lugar la transición depende del tipo de problema y de si es flujo externo o interno.

5. Simulaciones CFD

La ciencia CFD (del inglés *Computational Fluid Dynamics*) es una rama de la CAE (Computer Aided Engineering) que estudia la simulación numérica de flujos de fluidos. Se puede entender como un simulador virtual de mecánica de fluidos. Resulta muy interesante su empleo para el estudio realizado en el presente Trabajo Final de Grado ya que es más barato que el experimento equivalente. Aún para los casos en los que se tiene la posibilidad de realizar un experimento, el estudio CFD cuenta con la ventaja de que permite extraer información en detalle sin utilizar medidas intrusivas.

No todo son ventajas pues llegar a dominar la técnica es muy difícil. Esto es debido a que se trata de una ciencia multidisciplinar donde confluyen la mecánica de fluidos, los métodos numéricos, los diseños por ordenador *CAD* y la informática, entre otras. La experiencia tiene también un papel fundamental pues la práctica y el saber hacer permiten introducir los parámetros adecuados en el software empleado para que la solución llegue a buen puerto; lo que en la jerga se conoce como que la solución converja. Además, una gran potencia de cálculo es requerida en cuanto el problema empieza a ser complejo y, sobre todo, si no se puede realizar ninguna simplificación para pasar a las 2 dimensiones.

Merced al software que se ha decidido emplear, *SimScale*, el coste computacional no supone un problema. Las simulaciones tendrán lugar desde la nube en los servidores de la empresa. Así, no es necesario descargar nada en el ordenador local que limitaría la potencia de la simulación y el tiempo de cálculo a las características que la computadora posea. Asimismo, la versión para estudiantes de este software no presenta limitación en cuanto a la discretización del dominio del problema en celdas. No obstante, el tiempo máximo de una simulación sí está limitado a unas 8 horas.



Figura 20: Logo del software SimScale

En la [Figura 21](#), se presenta un diagrama de flujo de las distintas etapas que componen la metodología del proceso completo de un estudio CFD.

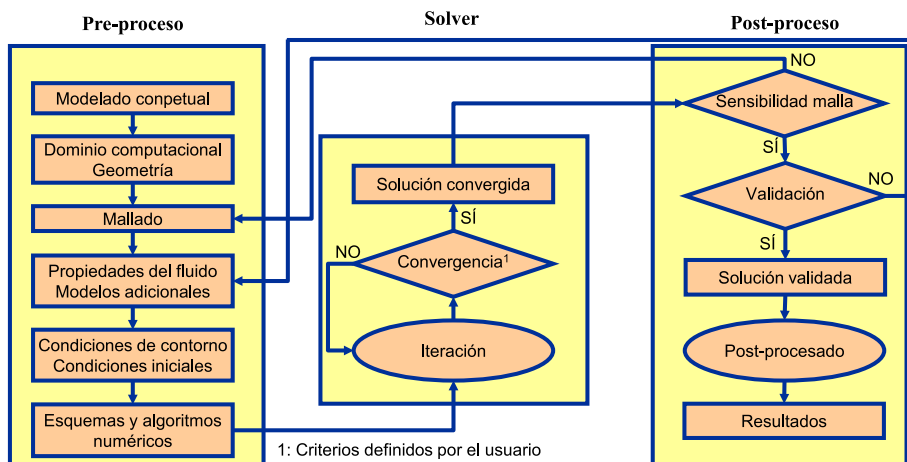


Figura 21: Metodología CFD. Proceso completo [25]

Como se puede observar, son tres las etapas principales: el *Pre-Proceso*, el *Solver* y el *Post-proceso*. En las siguientes subsecciones se irán desglosando una a una aplicadas para el caso estudiado.

5.1. Pre-Proceso

5.1.1. Modelado Conceptual

El primer paso del preproceso, y por consecuencia del proceso CFD total, es realizar el modelado conceptual. Se han de establecer los objetivos del proyecto en términos de resultados y precisión. Para este caso de estudio, los objetivos ya han sido comentados en la [Subsección 1.2](#). En cuanto a la precisión, debido a que las *líneas* de medición son de varias centenas de metros, tener una precisión de cm se espera suficiente.

En esta etapa, también se ha de estudiar si merece la pena adoptar algún tipo de simplificación del problema, y definir los medios disponibles y el tiempo requerido para cumplir los objetivos.

Lo que se decide en un primer lugar es simplificar la geometría de un DOM del detector a una esfera de diámetro $d = 0,43$ m. De esta manera, se tiene un cuerpo axisimétrico que permite por tanto simplificar el problema.

SimScale no cuenta con la opción de realizar una simulación en 2D. Este tipo de simulaciones en dos dimensiones muy económicas desde el punto de vista

del coste computacional, se puede intentar recrear dando un pequeño grosor a la geometría plana y simulando en 3D. No obstante, esta posibilidad no ha acabado siendo elegida y todas las simulaciones serán en 3D reduciéndose el dominio a la mitad en los casos que haya simetría.

Al ser la esfera una geometría básica, hay una mayor base de datos bibliográfica de estudios de flujo externo incidiendo en ella. Se usará el artículo [26] para una primera validación de los resultados obtenidos por el software. Se trata de un estudio realizado por la división marítima del departamento de defensa del gobierno australiano, por lo que:

- Está realizado por miembros del grupo de hidrodinámica, los cuales tienen una gran experiencia simulando el flujo del agua para el diseño de vehículos subacuáticos.
- El estudio está realizado con Ansys Fluent, uno de los códigos comerciales de CFD más usados en la industria (si no el que más) y con muchos años en el mercado.
- Proporcionan resultados fiables para un amplio rango de regímenes de flujo.
- Se simula una esfera.

Volviendo a la primera simulación que se va a realizar, se simulará un flujo de agua marina, de propiedades calculadas en la [Subsección 4.2](#), incidiendo en el DOM a una velocidad horizontal $u = 12 \text{ cms}^{-1} = 0,12 \text{ ms}^{-1}$.

El *número de Reynolds* ([Ecuación 8](#)) que se obtiene, siendo la longitud característica $l = d$, es $Re = 31763,424 \approx 3,2 \cdot 10^4$. En [26] se proporciona una clasificación de los regímenes de flujo en función del Re . El obtenido entra dentro de la categoría de régimen de estela turbulenta (turbulent wake regime), régimen que se da para flujos con $Re > 1000$. En cuanto al coeficiente de resistencia C_D , [26] recoge que, de acuerdo con diferentes estudios experimentales:

$$800 \leq Re \leq 3,8 \cdot 10^5 \rightarrow C_D \approx 0,5 \quad (9)$$

Si bien se podría plantear realizar un estudio transitorio para tener en cuenta los torbellinos vertidos en la estela, los cuales en este régimen de flujo se vierten de manera irregular aunque en la estela todavía existen fluctuaciones periódicas, se decide realizar un estudio estacionario. El valor medio de las características del flujo se puede suponer estacionario y la realización de un

estudio no-estacionario aumentaría enormemente la complicación, además de la potencia de cálculo requerida, pues se le añade un paso temporal a los métodos numéricos y se emplean enfoques para resolver la turbulencia mucho más demandantes.

5.1.2. Dominio computacional y geometría

5.1.2.1 Dominio

El dominio de simulación en CFD es la región ocupada por el fluido, la región fluida o volumen fluido externo (flow volume en inglés). Ha de ser un único volumen, un negativo del modelo CAD del cuerpo en el que se esté interesado en estudiar el flujo alrededor de él.

Para crear el volumen fluido se importa a SimScale el modelo 2D o 3D del cuerpo de estudio creado con un software CAD (Computer Aided Design); o se genera en el propio editor CAD del programa. A continuación, se crea un volumen que lo encierre, cuyos límites deben de estar lo suficientemente lejos. Esto es necesario para asegurar que el flujo cercano al cuerpo de estudio no se vea afectado por las condiciones que se establecen en esos límites del dominio: las condiciones de contorno, CC (Boundary Conditions BC, en inglés). Las dimensiones del volumen fluido deben asegurar que tanto la estela turbulenta que se crea detrás del modelo como la zona de presión delante de él no llega a los límites del dominio fluido. Por otra parte, un dominio fluido muy grande incrementará los costes de la simulación. Por lo tanto se ha de usar el juicio ingenieril y seguir las prácticas recomendadas para dimensionar el dominio fluido.

Partiendo de los tutoriales de SimScale [27], se decide crear un volumen fluido con las dimensiones que se muestran en la [Figura 22](#). Es interesante notar que el dominio es mucho más largo aguas abajo que aguas arriba debido a la estela turbulenta.

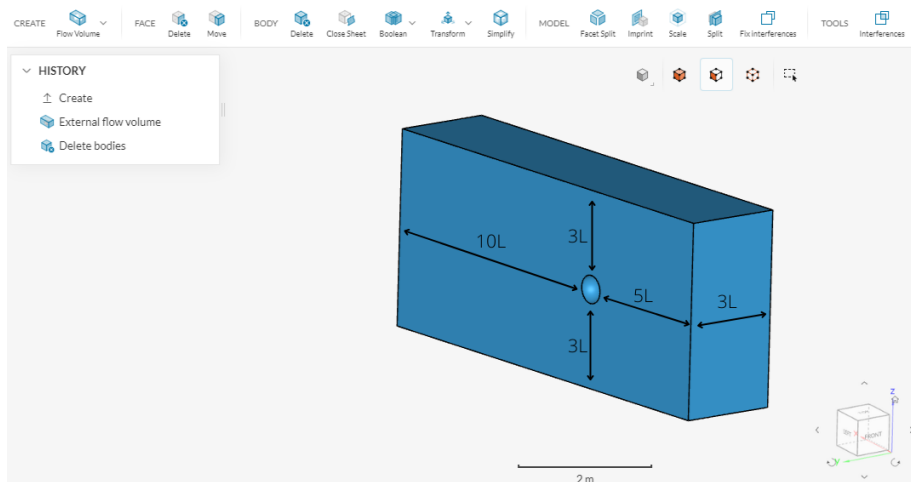


Figura 22: Dimensiones del volumen fluido en función de una longitud de referencia L que para el caso del DOM es el diámetro d . Abajo a la derecha se observa el sistema de referencia empleado, estando el centro del DOM en el origen de éste. El flujo tiene dirección x y sentido positivo por lo que los puntos del dominio con coordenada x positiva se encuentran aguas abajo. Notar que por la simetría del DOM el dominio se ha reducido a la mitad. Se ha elegido que el plano de simetría sea el $x-z$ por conveniencia más tarde de las CC

5.1.2.2 Geometría

En esta etapa se abren dos posibles vías de acción. Una de ellas consiste en la obtención, cortesía del departamento mecánico de KM3NeT [1], de los diseños CAD de los distintos subsistemas que conforman la DU. A partir de esta exacta representación virtual del montaje real, se procedería a eliminar los detalles no relevantes para facilitar el posterior mallado. Esto se conoce como «*clean-up*».

La otra opción consiste en crear desde cero mediante un programa CAD las geometrías ya simplificadas. Este ha sido el enfoque empleado y se ha utilizado para tal fin *Fusion 360* de *Autodesk*. Las medidas se han tomado del documento elaborado por el departamento de mecánica del proyecto que recoge la descripción de cada componente [12].

A la hora de importar las geometrías a SimScale, éste está optimizado para modelos en formato *.parasolid*. Otro formato que no da problemas es el *.step*. También se ha hecho uso de un *add-in* de SimScale disponible en Fusion360

que permite subir directamente los diseños a la web y que queden guardados en la cuenta del usuario.

5.1.3. Mallado

El dominio fluido se divide en un gran número discreto de volúmenes de control (lo que se conoce como celdas). Esto es el mallado, la creación de una malla computacional. Se trata de uno de los pasos más importantes, pues determina el coste computacional (número de celdas) y la precisión y tasa de convergencia (calidad de la malla).

5.1.3.1 Tipología

Para la simulación que se está poniendo de ejemplo para explicar las etapas del proceso CFD, como la geometría es sencilla, se podría realizar manualmente una malla estructurada (también conocida como regular o mapeada); esta malla requiere de un mayor tiempo de mallado por parte del usuario pero reduce el coste computacional. Sin embargo, como es difícil de emplear con otras geometrías más complejas, se decide que la malla sea no estructurada (o irregular), generada a partir del algoritmo de mallado del programa, prestando atención a la calidad de la misma con las herramientas que ofrece SimScale.

Para el mallado de esta simulación, se decide usar el algoritmo *Standard* (el *Standard Mesher* se encuentra seleccionado en la [Figura 23](#)), pues es una buena opción en general al estar bastante automatizado dando buenos resultados para la mayoría de las geometrías.

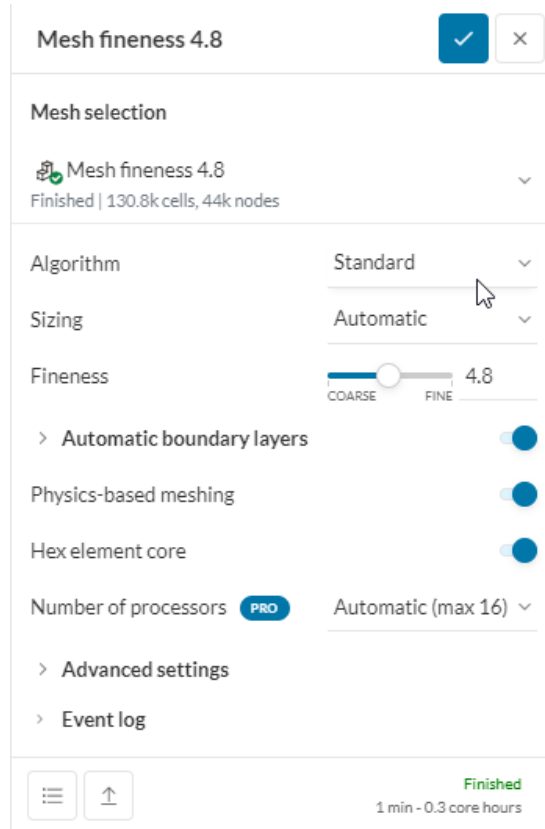


Figura 23: Set-up de la malla en SimScale

A continuación, se comentan el resto de opciones y el por qué de su elección:

- **Sizing Automatic:** las propiedades locales de la malla se ajustan automáticamente basándose en estimaciones geométricas. Se decide utilizar esta opción para evaluar los resultados que se obtienen y, si fuera necesario, se pasaría más adelante al modo manual para establecer el tamaño máximo y mínimo de lado de celda (en inglés: *edge length*).
- **Fineness:** una escala de 0 a 10 para determinar el refinamiento de la malla, siendo 10 el máximo refinamiento. Mayor refinamiento significa mayor número de celdas. Cuantos más elementos tenga la malla, mejor se ajustarán a la geometría del cuerpo a simular y mejor se podrán capturar los gradientes del campo fluido. Por contra, la solución será más difícil de converger y se aumenta el coste computacional.

Lo recomendable es comenzar con un *fineness* de alrededor de 5 (moderado) ya que normalmente proporciona un buen compromiso entre precisión y consumo de recursos. Como se observa en la [Figura 23](#), se ha elegido una “finura” de 4,8.

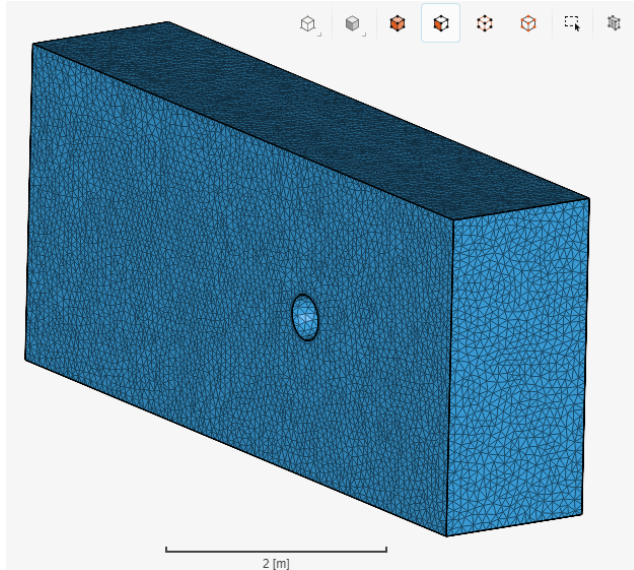


Figura 24: Malla obtenida con el *standard mesher automatic* y un *fineness* de 4,8. Está compuesta de 130,8k celdas y 44k nodos

- **Automatic boundary layers:** se explica en el apartado [5.1.5.3](#) qué es la capa límite (*boundary layer*) y su importancia. En función de los resultados obtenidos con este mallado automático de la capa límite mediante celdas prismáticas (que tiene en cuenta el tamaño del elemento local de la malla de la pared), se valorará la necesidad de mallar manualmente la capa límite atendiendo a los valores de la variable y^+ (distancia adimensional a la pared) que requiera el modelo de turbulencia ([5.1.4.2](#)).

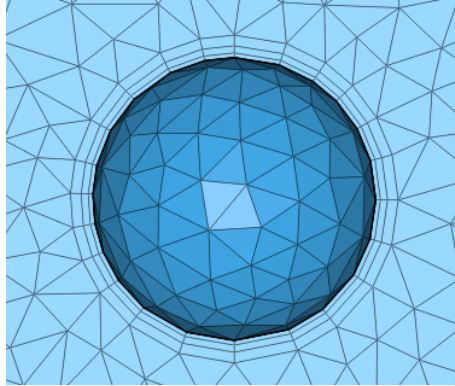


Figura 25: Mallado automático para captar el perfil de velocidad de la capa límite mediante celdas prismáticas alineadas a la superficie de la pared con la condición de no deslizamiento

- **Physics-based meshing:** esta herramienta tiene en cuenta información introducida durante el pre-proceso como las condiciones de contorno y puede refinar más algunas zonas del dominio en consecuencia (como el inlet o el outlet debido a sus BC).
- **Hex element core:** el interior de la malla se llena de hexaedros y la transición a los elementos triangulares de la superficie se hace con pirámides y tetraedros (Figura 26). Esto es recomendable en las simulaciones CFD; siempre y cuando el elemento esté orientado en la dirección del flujo.

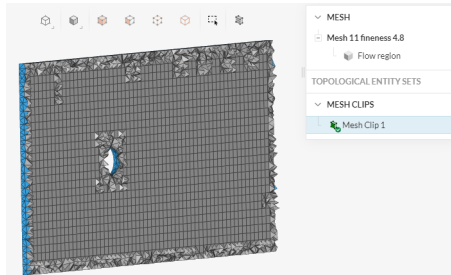


Figura 26: Corte del volumen fluido mediante la opción *Mesh clip* para ver su mallado interior dominado por hexaedros

- **Advanced settings:** aquí se encuentran opciones como la de ignorar superficies pequeñas de la geometría para evitar innecesarios niveles de refinamiento alrededor de pequeñas características. Como el cuerpo de

estudio no presenta una geometría de mucho detalle no es necesario su empleo.

5.1.3.2 Calidad

En simulaciones de flujo externo, mientras el flujo fluye alrededor del cuerpo, dos regiones tienen efectos físicos importantes: las regiones cercanas al cuerpo y la región de la estela, que se desarrolla aguas abajo del objeto. Como los gradientes de velocidad y presión son muy grandes en esas áreas, se requieren celdas más finas para que se puedan resolver con exactitud. Por lo tanto, se requieren refinamientos adicionales. Así, se pueden generar mallas muy eficientes con respecto a la precisión del resultado versus la demanda computacional.

Debido a que se ha utilizado el algoritmo automático de mallado, algunas regiones como la capa límite o las superficies del cuerpo de estudio obtienen una mayor densidad de malla. No obstante, en la [Sección 6](#) se comentará el empleo de las opciones *Local element size refinement* para refinar caras específicas del modelo CAD y *Region refinement* para refinar la malla en un volumen que intente “atrapar” la estela.

Para que una malla sea de calidad, sus elementos deben ser lo más regulares (lo contrario a *skewness*) posibles para reducir el error de discretización. Asimismo, deben tener una transición suave *smoothness* de tamaño con los elementos contiguos y tener una relación de aspecto (*aspect ratio*) pequeña. Mediante la opción *Meshing log* de SimScale se puede tener una idea cuantitativa de la calidad global de la malla. Una práctica recomendada es asegurar que se cumpla: $\text{tetAspectRatio} \ll 100$; $\text{Non-orthogonality} \ll 75$; $\text{tetEdgeRatio} \ll 100$; $\text{VolumeRatio} \ll 100$. La malla de la [Figura 24](#) cumple con estos criterios.

Por último, mediante la herramienta *Mesh quality* se pueden aislar y localizar los elementos defectuosos creando *Isovolumes*. Los problemas suelen deberse a problemas del CAD, superficies imprecisas, pequeños huecos o esquinas puntiagudas. La manera más rentable de solucionarlo es mediante un “CAD cleaning”. Otra solución es refinar la malla para todo el dominio o refinar la malla donde existan los elementos defectuosos. Si el registro de mallado reporta una malla de mala calidad no significa que necesariamente la malla sea inapropiada para usar. Si solo unos pocos elementos presentan mala calidad y están lejos de las fronteras del inlet y outlet, probablemente la simulación siga funcionando correctamente.

5.1.4. Propiedades del fluido. Modelos adicionales

5.1.4.1 Propiedades del fluido

Como se expuso en la [Subsección 4.4](#), el análisis será de flujo incompresible y el agua se considera que presenta un modelo de viscosidad newtoniano y con las propiedades que se calcularon en la [Subsección 4.2](#). En la [Figura 27](#), cómo se introducen en SimScale.

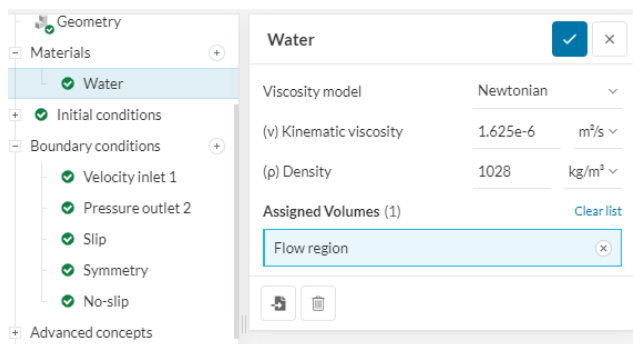


Figura 27: Introducción de las propiedades del fluido

5.1.4.2 Modelo de turbulencia. Modelo k-omega SST

Prácticamente todas las aplicaciones ingenieriles son turbulentas (como el caso estudiado tal según se discutió en la [Subsubsección 5.1.1](#)) y requieren un modelo de turbulencia. Cuando la turbulencia está presente, usualmente domina otros fenómenos del flujo dando lugar a un aumento de la disipación de energía, difusividad (mezcla), transferencia de calor y resistencia.

El modelado de la turbulencia consiste en construir y usar un modelo que pueda predecir los efectos de la turbulencia, pues es muy caro computacionalmente construir una malla que directamente simule tanto la pequeña escala como las fluctuaciones de alta frecuencia de los campos de las variables de flujo turbulento (esta última opción son las simulaciones DNS Direct Numerical Simulation).

Para eliminar la necesidad de resolver las pequeñas escalas de la turbulencia (tanto temporales como espaciales) se puede usar o el *filtrado* o el *promediado de Reynolds*:

- **Filtrado:** la idea de este enfoque consiste en filtrar la ecuación depen-

diente del tiempo de Navier-Stokes en el espacio de Fourier o en el espacio físico. Este proceso de filtrado filtra eficazmente los torbellinos turbulentos cuyas escalas sean pequeñas que el ancho del filtro, el cual usualmente se toma del tamaño de la malla. Una simulación que sigue este enfoque es conocida como LES (Large Eddy Simulation). El proceso de filtrado crea términos incógnita adicionales que deben de ser modelados para que se pueda “cerrar” el conjunto de ecuaciones.

- **Promediado de Reynolds. Reynolds Averaging:** todas las variables son divididas en una componente media (que puede variar lentamente en el tiempo) y una componente que fluctúa rápidamente.

Los modelos de turbulencia usados comúnmente en CFD están basados en RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes), especialmente de 2 ecuaciones. El que se recomienda para flujo externo es el modelo de turbulencia $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport). Funciona como una mezcla entre los modelos $k - \omega$ (predominante en las regiones cercanas a la pared) y $k - \epsilon$ (flujo libre).

5.1.5. Condiciones de contorno y condiciones iniciales

Para cada una de las fronteras del dominio hay que elegir una condición de contorno (BC). De esta forma las ecuaciones diferenciales tienen solución única. La combinación elegida de condiciones de contorno para modelar físicamente el problema ha sido:

5.1.5.1 Velocity inlet

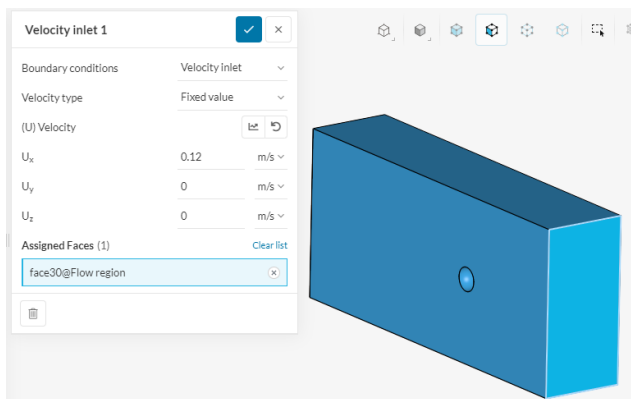


Figura 28: Velocity inlet BC. El flujo entra al dominio a $u = 0,12 \text{ ms}^{-1}$

Con esta BC se define el el flujo entrando (el flujo es entrante en este caso, ver [Figura 28](#)) o saliendo del dominio a una cierta velocidad. En el inlet, la presión y la presión de parada (stagnation pressure) se calculan, con los gradientes de presión fijados en 0. Para flujos incompresibles, como la densidad es conocida y constante, no se requiere determinar la temperatura. Las variables turbulentas tampoco se requieren como input pues se emparejan con los valores especificados en la condición inicial. En el apartado “Velocity Type” se utiliza la opción de fijar un valor por lo que toda la superficie del inlet tendrá la misma magnitud y dirección de velocidad.

5.1.5.2 Pressure Outlet

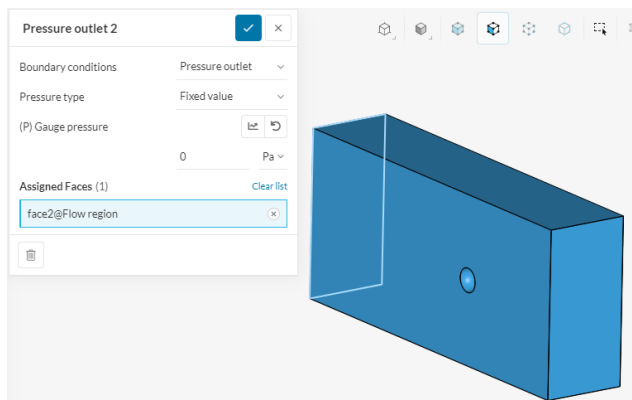


Figura 29: Pressure outlet BC

Por estabilidad, se debe utilizar una BC de presión para que el problema esté bien condicionado (“well posed”) numéricamente. Lo recomendable en un análisis incompresible es trabajar con presiones relativas (gauge pressure). Es la única variable que se impone en esta BC pues el resto se extrapolan del interior.

5.1.5.3 Wall

Define principalmente el comportamiento de la velocidad del flujo en la cara en la que se imponga esta condición.

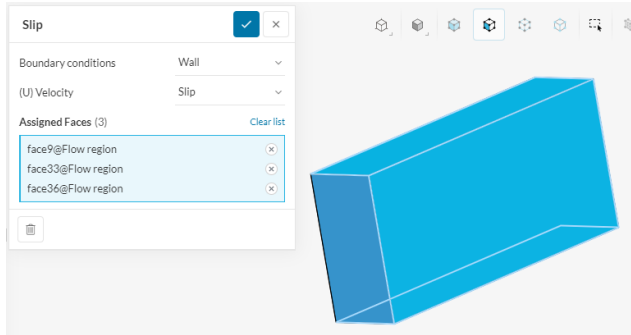


Figura 30: Slip wall BC. Condición de deslizamiento

Como se encuentran alejadas del objeto de estudio, una buena aproximación para las caras lateral, superior e inferior (Figura 30) del volumen de control es la de aplicarles la condición de no deslizamiento: paredes sin rozamiento. Matemáticamente, se elimina la componente normal de la velocidad y mantiene la tangencial.

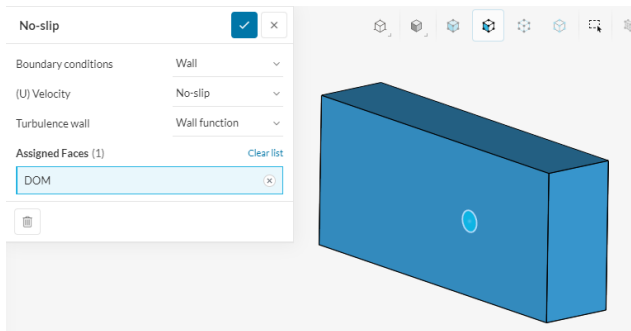


Figura 31: No-Slip wall BC. Condición de no deslizamiento

En las interfaces sólido-fluido, en las capas de fluido inmediatamente próximas a la superficie, los efectos de la viscosidad son significativos. Por ello, en la pared la componente tangencial de la velocidad es nula; la normal también lo será si la pared es no porosa. La distancia desde la pared hasta el punto en el que la velocidad del flujo viscoso es un 99 % de la velocidad del flujo libre, el flujo sin perturbar, es lo que se define como capa límite [25]. Los efectos de la capa límite pueden ser críticos para la precisión de los resultados significando que un modelado preciso de las interfaces es imperativo. Esto se indica en SimScale en la opción “Wall Trubulence”, como se observa en la Figura 31. Hay dos opciones para calcular el perfil de velocidad de la capa límite:

- **Wall function:** se modela, en mayor o menor medida pues depende del modelo de turbulencia utilizado, el perfil de velocidad de la capa límite. Esto se realiza a partir de ecuaciones obtenidas empíricamente.
- **Full resolution:** se resuelve completamente el perfil: la malla ha de cumplir ciertos criterios y tener gran resolución en las regiones cercanas a la pared.

5.1.5.4 Symmetry

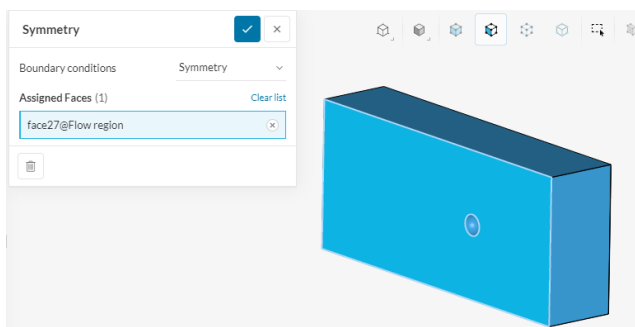


Figura 32

El objeto físico presenta simetría respecto al plano que se muestra en la [Figura 32](#) y el patrón del campo fluido totalmente desarrollado de la solución se espera que se refleje en espejo en esa superficie. Gracias a esta BC, el dominio se puede reducir a la mitad: menos tiempo de cálculo.

Matemáticamente las restricciones impuestas son que los flujos que cruzan el plano de simetría y las componentes normales de las variables son nulas.

5.1.5.5 Condiciones iniciales

La única condición inicial que no se deja como las que aparecen por defecto en el programa es la velocidad inicial. Haciendo una analogía con el volumen fluido y un túnel de viento, significa que el aire del túnel de viento ya está en movimiento. Si no se predefiniera, no habría movimiento del flujo al inicio del cálculo y el solver tendría que calcularlo basado en la velocidad especificada en el inlet.

5.2. Solver

El código del software CFD resuelve las ecuaciones de la conservación de masa, momento, energía y otras variables fluidas relevantes usando el método de los volúmenes finitos en el centro de las celdas. Esto es, las ecuaciones de gobierno (en forma integral) se aplican a cada volumen de control y se usan para construir un sistema de ecuaciones algebraicas (tras discretizarlas) no lineales para las distintas variables dependientes. Para cada ecuación de transporte, se tiene un sistema de ecuaciones algebraicas de tantas ecuaciones como celdas. SimScale utiliza el código de uso libre OpenFOAM para las simulaciones CFD.

5.2.1. Esquemas y algoritmos numéricos

Los esquemas de discretización que se utilizan para obtener los valores discretizados de las ecuaciones de conservación en cada celda y para relacionar los valores del centroide de la celda considerada con la de sus vecinas, se dejan los que vienen por defecto en SimScale en el apartado *Numerics*.

El algoritmo empleado para resolver las ecuaciones de transporte es el llamado⁹ SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Se trata de un algoritmo segregado, es decir, que resuelve todas las ecuaciones de transporte secuencialmente (salvo p y \vec{u} que las resuelve mediante un método predictor-corrector: *p-v coupling*). Este algoritmo es el que se utiliza para un análisis estacionario.

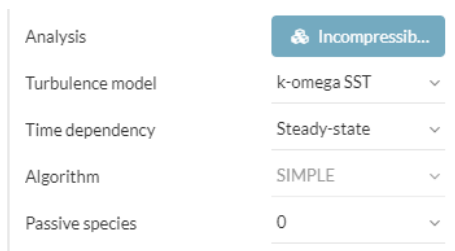


Figura 33: En SimScale, el algoritmo SIMPLE es el que viene por defecto a la hora de realizar una simulación incompresible estacionaria. En esta ventana también se elige el modelo de turbulencia que se determinó en [5.1.4.2](#)

En este paso, también se han de configurar los controles de la simulación: cuántas iteraciones se desean, cada cuántas iteraciones se desean escribir los

⁹Se denomina SIMPLE por sus siglas, porque de simple no tiene nada

resultados de la simulación para poder hacerles más tarde el post-proceso... Esto en SimScale se realiza en el desplegable mostrado en la [Figura 34](#).

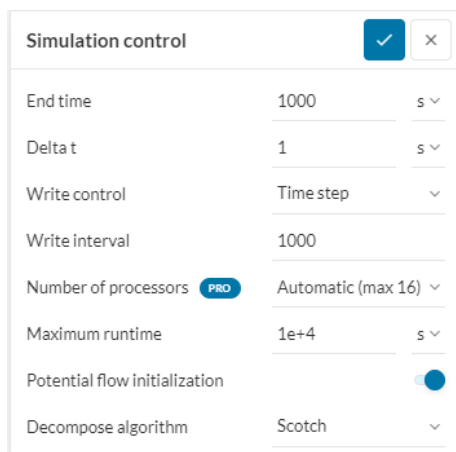


Figura 34

Las diferentes opciones que hay que configurar son:

- **End Time:** para simulaciones estacionarias (las ecuaciones no incluyen derivadas temporales) representa el final de la simulación. No se ejecutarán más iteraciones más allá de este valor. Sin embargo, para simulaciones no-estacionarias representa el tiempo para el que los efectos transitorios necesitan ser analizados en cualquier fenómeno físico; se conoce a veces como tiempo de simulación.
- **Delta t. Paso temporal:** para simulaciones estacionarias representa el paso de iteración:

$$\text{n}^\circ \text{ iteraciones} = \frac{\text{End Time}}{\Delta t} \quad (10)$$

En simulaciones no-estacionarias representa cambio incremental en el tiempo para el cual las ecuaciones transitorias se resuelven durante la simulación, para este tipo de simulación dependiente del tiempo, a Delta t se le conoce como paso temporal. De ahí que en las simulaciones estacionarias también se le conozca como pseudo-paso temporal.

- **Write Control y Write Interval:** en Write control el usuario puede seleccionar varios métodos para especificar la frecuencia (en Write Interval) con la que serán escritos los resultados de la simulación.

- **Potential Flow Initialization:** este ajuste activa la solución del campo de flujo potencial. El flujo potencial es usado como una condición inicial para la simulación; se inicializa el campo de velocidad. Esto puede acelerar la convergencia y mejorar la estabilidad durante los primeros pasos. La opción viene desmarcada por defecto pero se ha decidido emplearla.
- **Maximum runtime:** esta opción permite especificar un tiempo de reloj para el que la simulación se parará si aún no ha convergido. De esta manera, se previene agotar las horas de simulación disponibles en la cuenta con simulaciones de un muy alto coste computacional.
- **Number of processors:** Con la cuenta gratis la única opción disponible es *Automatic* que asigna núcleos de procesamiento de la manera más económica desde el punto de vista de horas de núcleo. Con la cuenta premium se puede simular con hasta 96 núcleos. La gran ventaja es que no es necesario poseer un ordenador con ese *hardware* sino que las simulaciones se ejecutan en los servidores de SimScale y mientras se puede seguir usando el ordenador o incluso apagarlo mientras continúa la simulación.
- **Decompose Algorithm:** algoritmo para descomponer el dominio de simulación y así asignarlo a los diferentes procesadores. La opción que se recomienda emplear es *Scotch*: intenta minimizar el número de fronteras entre los dominios descompuestos. Así se requiere menos comunicación entre procesadores y una simulación más rápida.

5.2.2. Criterios de convergencia

Al emplearse en CFD métodos numéricos, iteración tras iteración la solución se va aproximando más y más a la realidad. Llega un punto en el que ya no tiene sentido seguir iterando pues los valores de las diferentes variables del campo fluido se establecen en un valor: la simulación ha convergido. También puede ocurrir que, porque no esté bien planteado el problema o porque falte discretizar más el dominio, la simulación no converja. Se emplean los siguientes criterios de convergencia para dilucidar si se trata de un caso u otro (o de si hace falta realizar más iteraciones):

5.2.2.1 Residuales

Los residuales dan una primera idea, no siempre precisa, de si la solución ha podido converger. Representan el error (normalizado) de diferentes variables.

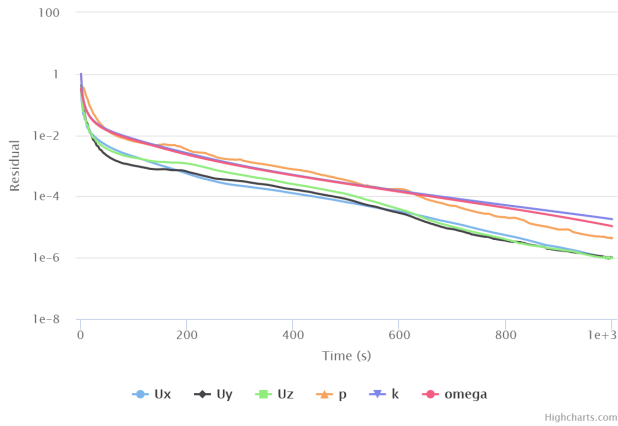


Figura 35: Residuales de la simulación tras 1000 iteraciones. (En el eje x aparece "Time (s)" por lo explicado en el apartado anterior del paso temporal en las simulaciones estacionarias)

Se observa en la [Figura 35](#) que en la última iteración, la iteración 1000, todos los residuales presentan un valor comprendido entre 10^{-4} y 10^{-6} . La solución puede haber convergido.

5.2.2.2 Fenómenos espurios

Un indicativo de que la solución no ha convergido es el comportamiento antinatural del flujo.

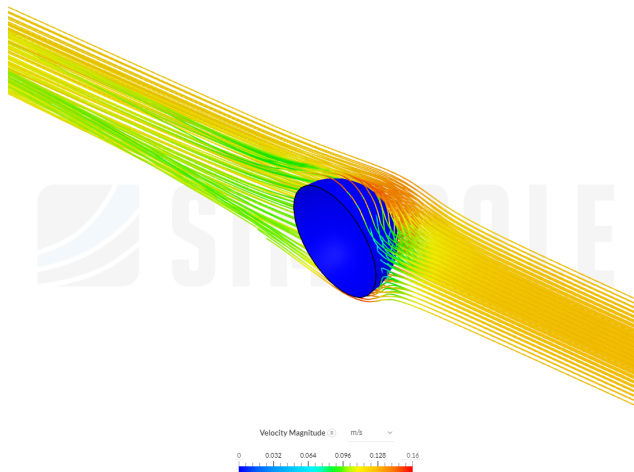


Figura 36: Líneas de corriente sobre el DOM

En la [Figura 36](#), creada mediante la opción *Particle Trace*, se pueden ver las líneas de corriente o *streamlines*. Son similares a una tinta que se inyecta en el flujo para visualizar el movimiento de éste y permite visualizar dónde tiene lugar la separación del flujo.

A priori, parece que el flujo no hace nada raro: llega al cuerpo a la velocidad del flujo libre (nótese la leyenda por colores), se acelera (colores más cálidos) al pasar por la esfera hasta que llega un punto que se desprende de la superficie creando la estela.

5.2.2.3 Variación de variables de interés

Se estudia ahora la variación de distintos parámetros de interés en las iteraciones finales. Si oscilan:

$$\tilde{A} < 0,1\% \quad (11)$$

la solución suele haber convergido. \tilde{A} es la amplitud de la oscilación dividida entre el valor promedio.

En una simulación de flujo externo, lo primero que se ha de cuantificar es el drag del cuerpo sometido al test. Para ello, en la opción *Result control* de SimScale, se definen correctamente los coeficientes fuerzas y momentos. Al que se le prestará más atención es al C_D que ya se definió en la [Subsección 4.5](#).

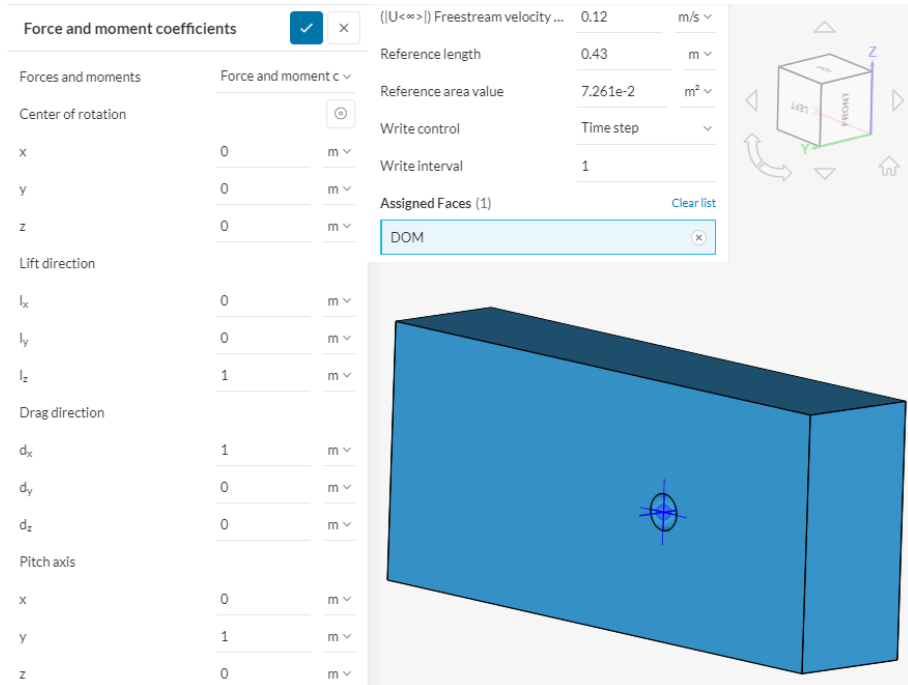


Figura 37: Definición de los coeficientes de fuerzas y momentos. Como solo se está simulando la mitad del cuerpo porque se ha aplicado simetría, ha de introducirse la mitad del área frontal del cuerpo entero

Para ello, y como se observa en la [Figura 37](#), se han de definir el *Center of rotation* (el centro de masas del cuerpo de estudio) y los ejes de las fuerzas y momentos. SimScale integrará las distribuciones de presión y esfuerzo cortante que calcule sobre la superficie del cuerpo y las adimensionalizará. Por ejemplo, para el coeficiente de resistencia C_D se han de introducir los valores de las variables que componen la [Ecuación 7](#). El área de referencia en este caso es la mitad del área frontal de la esfera, lo que viene siendo la mitad del área del círculo:

$$A = \pi \frac{R^2}{2} = \pi \frac{0,215^2}{2} = 0,07261 \text{ m}^2 \quad (12)$$

El plot que se obtiene es la [Figura 38](#). Más o menos a partir de la iteración 300 el coeficiente se estabiliza y no presenta oscilación alrededor de un valor medio. Por consiguiente, se cumple el criterio de convergencia para esta variable.

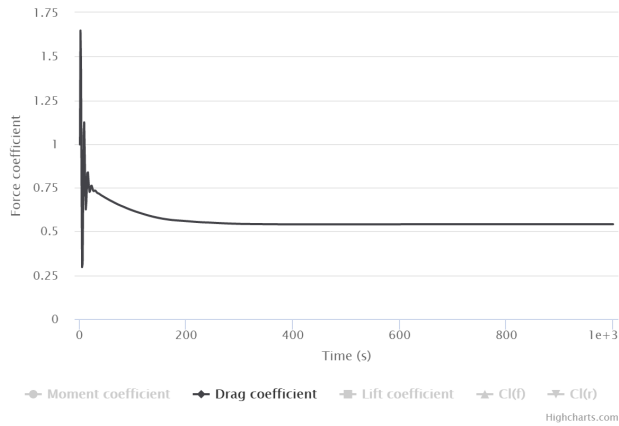


Figura 38: Evolución del C_D del DOM simplificado como una esfera a través de todo el proceso de simulación, conforme aumentan las iteraciones

Las otras 2 variables analizadas son la la media de la presión en el inlet (donde se había impuesto una velocidad y la presión se debía calcular) y la media de la velocidad en el outlet (donde se había impuesto una presión y la velocidad se debía calcular).

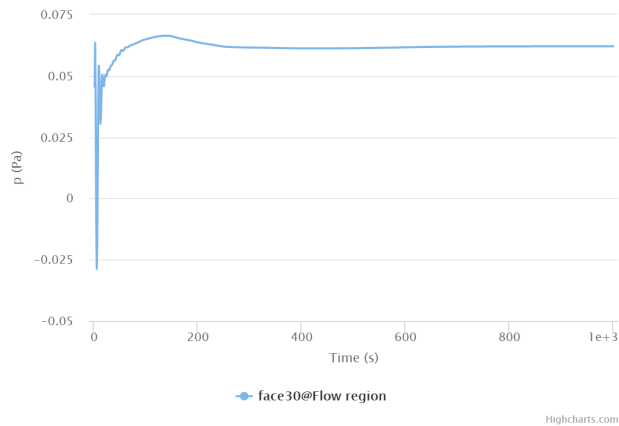


Figura 39: Area average de la presión en el inlet

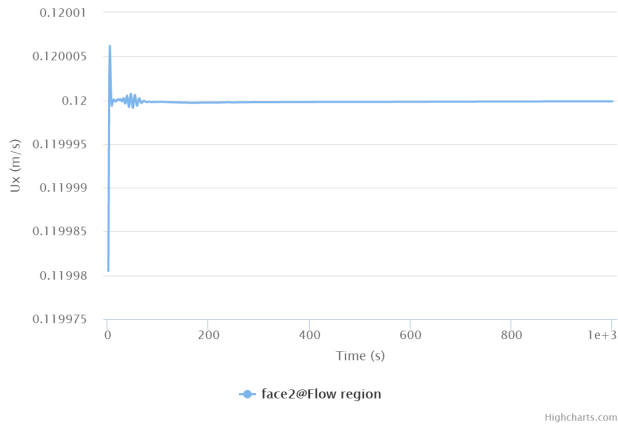


Figura 40: Area average de la U_x en el outlet

La velocidad con dirección de la corriente en el outlet se ve (Figura 40) que converge rápido al valor impuesto del flujo libre. Esto valida el hecho de que el outlet está lo suficientemente lejos del cuerpo de estudio para no verse afectado por la perturbación que este ejerce en el flujo (y viceversa). Por su parte, la presión en el inlet (Figura 39) también converge rápidamente y se mantiene constante sin oscilar.

5.3. Post-Proceso

5.3.1. Sensibilidad malla

Mediante el mallado se discretiza el dominio, lo que permite resolver las ecuaciones diferenciales de una manera discretizada. Siempre habrá un error entre la solución discretizada y la solución exacta de la ecuación diferencial pero conforme la malla sea más refinada, este error será menor. Esto se estudia realizando un análisis de sensibilidad de malla. Se van realizando distintos mallados y simulando hasta que la diferencia de resultados entre una malla y otra más refinada difieran una cantidad despreciable. En ese punto se puede concluir que se ha alcanzado la *independencia de malla* y que el error de discretización no domina sobre el resto de errores numéricos.

Lo recomendable en cada paso sucesivo es ir aumentando (al menos) en 1,5 veces el número de elementos en cada dirección (en 3D: $\times 1,5^3 = \times 3,375$). En la Tabla 4 se recogen las características de las mallas empleadas.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Fineness	4,8	5	7
Number of nodes	43991	212064	1520185
Number of edges	775	1095	1737
Number of faces	24427	51191	119324
Number of volumes	130791	422304	2503402
Number of triangles	24358	51098	119174
Number of quadrangles	69	93	150
Number of tetrahedrals	108255	251352	1131861
Number of hexahedrals	16681	149325	1259477
Number of prisms	369	687	1614
Number of pyramids	5486	20940	110450

Tabla 4: Estudio de sensibilidad de malla. “Number of volumes” indica el número de celdas

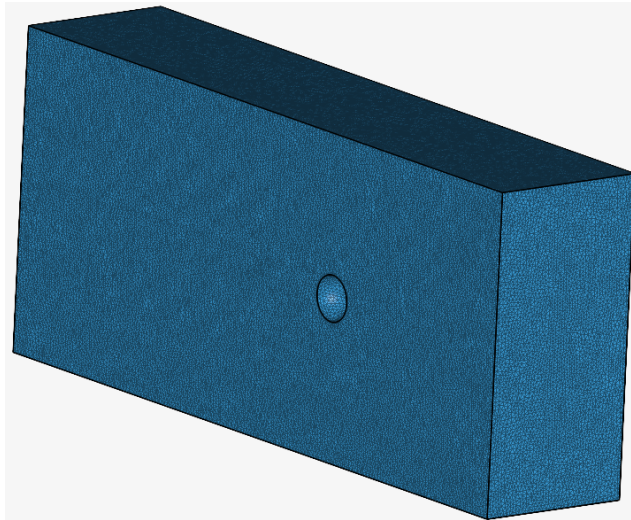


Figura 41: Malla 3: mayor refinamiento estudiado (2,5M celdas). Se aprecia a simple vista la mayor densidad de elementos en comparación con la de la [Figura 24](#)

Comprobando los resultados de variables de interés para el problema ([Tabla 5](#)) se concluye que con la malla 2 se ha alcanzado la independencia de malla pues su variación respecto a la malla 3 es despreciable para la precisión buscada y no tiene sentido emplear una malla mucho más cara computacionalmente por

una diferencia en el tercer decimal. De aquí en adelante

	Malla 1	Malla 2	Malla 3
C_D	0,5410	0,4462	0,4401
p inlet [Pa]	0,0621	0,0526	0,0519

Tabla 5: Valores de variables de interés según la malla

5.3.2. Validación

En este punto, el caso está convergido y se ha alcanzado la independencia de malla. Con todo, el modelado del problema puede no representar fielmente la realidad: hay que validar el modelo frente a resultados experimentales o numéricos de calidad (que resuelvan todas o casi todas las escalas de la turbulencia). En este caso, se ha validado el valor de C_D obtenido con la gráfica extraída de [28]:

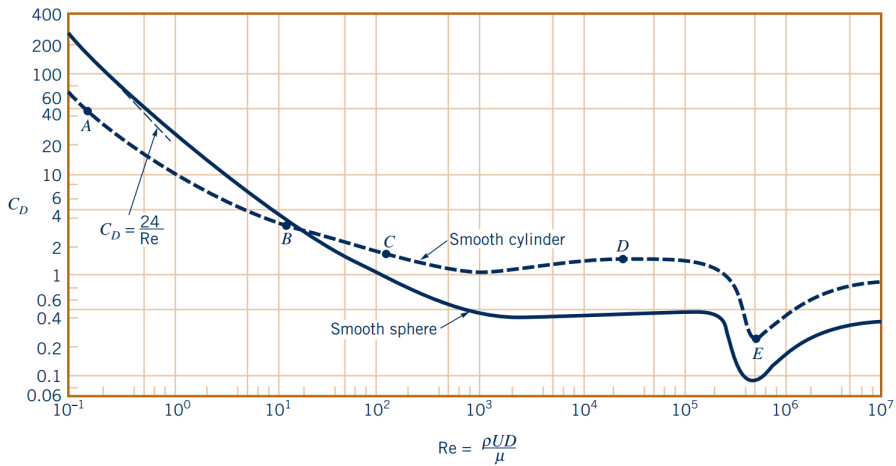


Figura 42: C_D como función del Re para un cilindro y esfera lisos

Para el $Re \approx 3,2 \cdot 10^4$ que se calculó en la [Subsubsección 5.1.1](#) y para el caso de la esfera, se extrae de la [Figura 42](#) un C_D de un valor comprendido entre 0,4 y 0,5, rango de valores en el que se encuentra el C_D obtenido mediante CFD: $C_D \approx 0,44$.

5.3.3. Post-procesado

Para completar el diagrama de la [Figura 21](#) solo resta obtener los resultados deseados. Se ha empleado la herramienta de procesado incluida en SimScale, que se encuentra en la opción *Solution Fields*, pues satisface de sobra las capacidades requeridas para este estudio.

6. Análisis de resultados

6.1. Boya

Siguiendo los mismos pasos que los explicados en la [Sección 5](#) se simula la boya. La geometría de ésta (ver [Figura 7](#)) se simplifica por la de un cilindro de diámetro $d = 0,46$ m y altura $H = 1,78$ m (dimensiones obtenidas de [12]).

El dominio fluido tiene las mismas dimensiones, en función de la longitud de referencia (d), que el de la [Figura 22](#). La única diferencia es que aguas abajo se le han dado 15 diámetros en vez de 10 debido a la mayor estela que se observa tras realizar una primera simulación. También se trata de un cuerpo axisimétrico, por lo que se aplican las mismas BC.

El Re para este caso es $Re \approx 3,4 \cdot 10^4$ que, según la [Figura 42](#), corresponde al patrón de flujo indicado con la letra D en el [Figura 43](#). La estela es turbulenta: se pueden suponer las mismas hipótesis que las realizadas en la [Subsubsección 5.1.1](#).

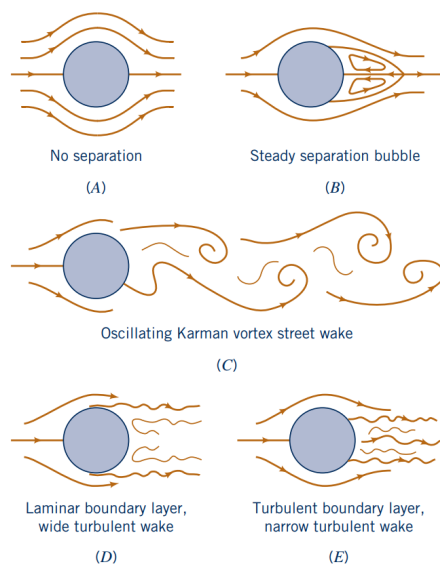


Figura 43: Patrones típicos de flujo a través de un cilindro para varios Re indicados en la [Figura 42](#) [28]

En este caso, para el mallado se realiza un refinamiento local en la superficie de la boya. Se impone un *Maximum edge length* de 0,02 m.

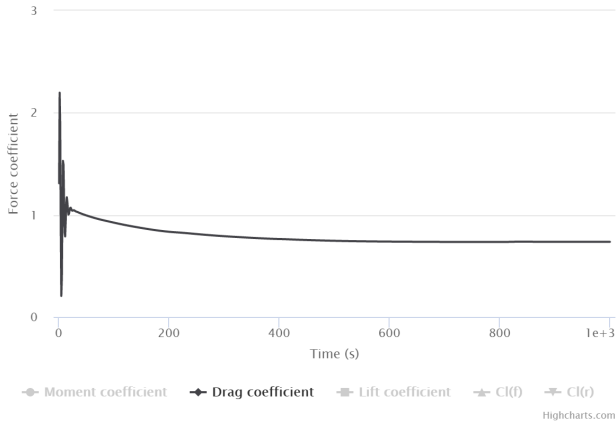


Figura 44: C_D de la boya frente iteraciones

Para la simulación convergida y con independencia de malla se obtiene un valor de $C_D \approx 0,735$. Si el lector se fija de nuevo en la Figura 42 para el caso del cilindro, comprobará que el C_D que ahí aparece para el Re calculado está entorno a 1,3 y 1,5. Esta discrepancia se debe a el cilindro de esa gráfica tiene una longitud infinita. El artículo [29] proporciona el C_D en función del Re y del Aspect Ratio del cilindro H/d (Figura 45).

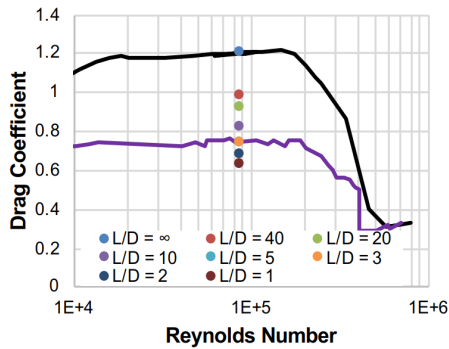


Figura 45: C_D de un cilindro en función del Re y del Aspect Ratio

Para la relación de aspecto de la boya $H/d = 3,87$ se extrae de la gráfica que el C_D está alrededor de 0,75, lo que concuerda con el calculado mediante CFD. Se da la simulación como validada.

Mediante la herramienta de post proceso se pueden visualizar todos los campos escalares y vectoriales. Se incluye como ejemplo la Figura 46.

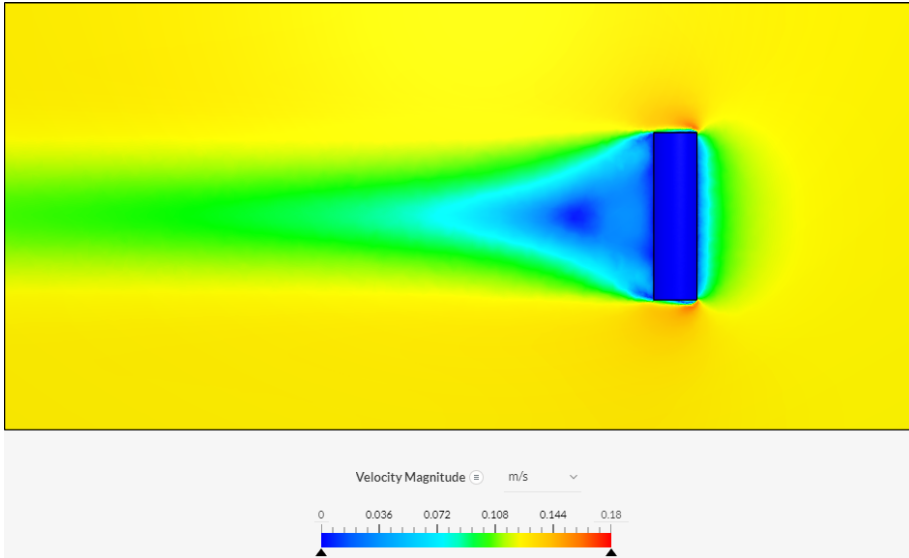


Figura 46: Campo del módulo de la velocidad en el plano de simetría de la boya. El flujo incide de derecha a izquierda

6.2. DOM

La simulación del DOM es la que se ha puesto de ejemplo para explicar el diagrama completo de la metodología CFD (Sección 5). Ahora se aprovechará para comentar que se han realizado simulaciones con diferentes tipos y opciones de mallado, para ver el impacto que tenían en la solución. A continuación se adjunta una simulación realizada con el algoritmo de mallado *Hex-dominant* y refinamiento tanto local en la superficie del DOM como en la región de la estela.

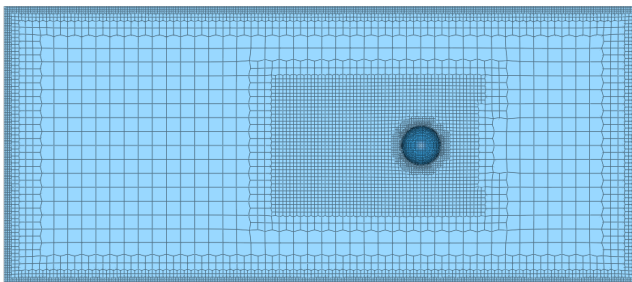


Figura 47: Mallado en el que predominan las celdas hexaédricas con *Region refinement* y *Surface refinement*

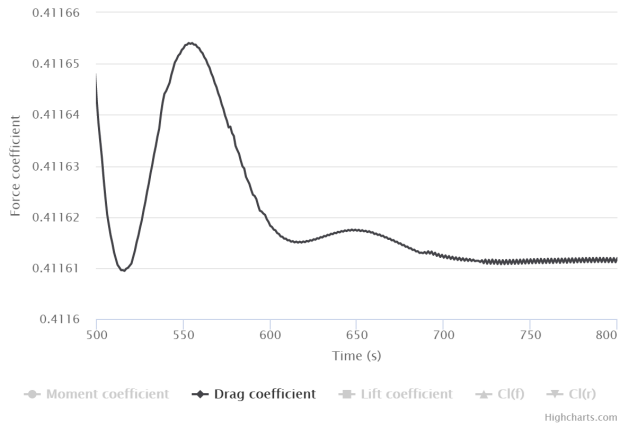


Figura 48: C_D obtenido con la malla de la Figura 47. Vista en detalle de su valor entre las iteraciones 500 y 800. El valor se asienta sobre la iteración 725 y de ahí mantiene un valor medio contante. Las oscilaciones sobre ese valor medio se deben a la turbulencia

Volviendo a la malla empleada la Subsubsección 5.1.3 es interesante visualizar la distribución de presiones sobre la superficie del DOM:

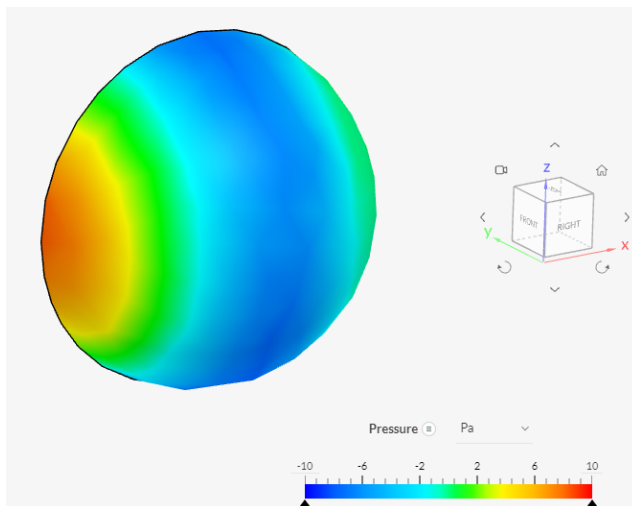


Figura 49: Presión relativa en la superficie del DOM. Se observa un aumento de presión en la parte que primero ve la corriente debido a que frena el fluido: la presión de parada. Luego a medida que el fluido acelera, disminuye la presión (similar al efecto Venturi)

6.3. DOM y enganche cables

Se añade a la esfera, la simplificación de la geometría del DOM, una recreación del soporte para los cables que lo fijan en la DU. Partiendo de la simulación validada en la [Sección 5](#) se obtiene ahora un $C_D = 0,684$. La esfera es una geometría fuselada, el flujo se adapta relativamente bien a ella: las líneas de corriente siguen la superficie. Ahora, al introducir un cuerpo romo (*blunt body* o *bluff body* en inglés) ocurre lo contrario y aumenta la resistencia. Además, se crea una zona de alta presión en la cara del enganche frontal al flujo.

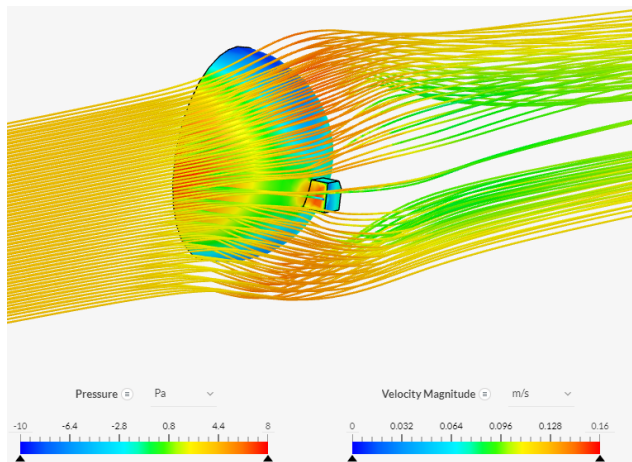


Figura 50: *Streamlines* de la corriente marina incidiendo en el DOM con el enganche. En la superficie del cuerpo se ha representado la distribución de presión relativa

6.4. DOM, enganche y cables según orientación

Se desea estudiar el coeficiente de resistencia del DOM según la dirección de la corriente incidente. Como se vio en la [Figura 19](#), esta incide desde todas las direcciones. Se añade al cuerpo de estudio el par de cables de la DU para computar también su efecto. El cable tiene un diámetro de 0,015 m y se toma un metro de cable arriba y abajo del DOM para las simulaciones. Se realiza un mallado similar al que fue validado y se van creando diferentes simulaciones girando la geometría (ángulos simulados resumidos en la [Figura 51](#)). Como al girar ya no se tiene simetría respecto al plano $x - z$, se cambia la condición de contorno de simetría por otra pared *slip*. Esta pared se sitúa a 3 diámetros en dirección y positiva del cuerpo de estudio.

Los valores de C_D obtenidos y la tendencia se recogen en la gráfica de la [Figura 52](#).

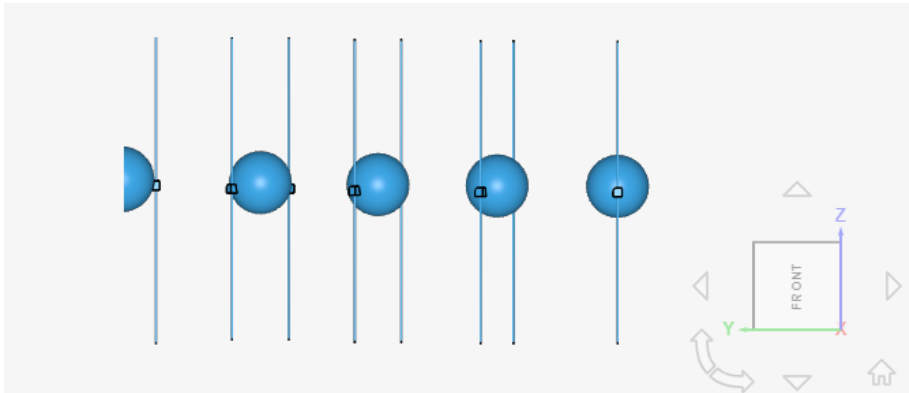


Figura 51: Vista frontal de las orientaciones que se van a estudiar. De izquierda a derecha: 0, 30, 45, 60 y 90 grados

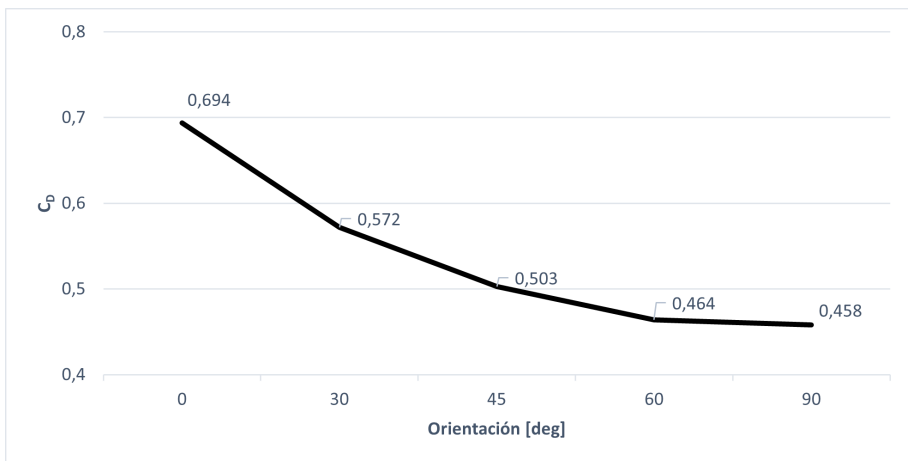


Figura 52: C_D en función de la orientación. Se unen los valores discretos mediante líneas para estudiar mejor la aparente tendencia

El C_D para 0 grados es ligeramente superior al que se obtuvo en el apartado anterior. La diferencia se debe a haber añadido los cables. El valor del coeficiente se va reduciendo conforme va girando el cuerpo porque la corriente ya no se encuentra con que la primera cara del enganche es como una placa plana situada frontalmente sino con una geometría tipo cuña que tiene menor área frontal y también permite una mejor adherencia del flujo. Para el caso de 90

grados, la primera cara del enganche que ve el flujo también es como una placa plana frontal. Sin embargo, se encuentra en la primera parte de la esfera que se encuentra la corriente, donde se generan las mayores presiones. El aumento de presión que genera el enganche ya no es tan grande en comparación con la zona de la esfera en la que se encuentra. Lo que sí produce es que al flujo le cueste más volver a seguir la forma de la esfera.

6.5. Modelo mecánico. MM

Para el ajuste de la línea de la DU se ha desarrollado un modelo mecánico (MM: Mechanical Model) que proporciona la forma de la línea (las posiciones de los DOMs) basándose en las propiedades de la corriente marina (velocidad y dirección) [30] y [31].

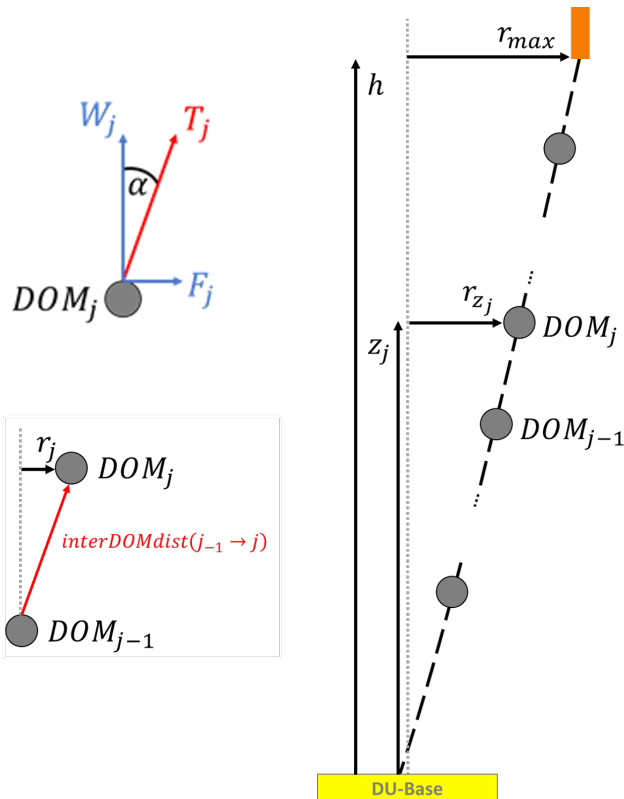


Figura 53: MM

Se han de definir las siguientes variables (Figura 53): z es la altura de cada

punto de la línea; h la altura total; r el desplazamiento de cada punto respecto a la vertical; W la fuerza de flotabilidad; F la fuerza de resistencia; T la tensión de la cuerda; α el ángulo de inclinación respecto a la vertical.

α se obtiene por trigonometría:

$$\tan(\alpha) = \frac{dr}{dz} = \frac{F(z)}{W(z)} \quad (13)$$

Siendo F de cada elemento de la DU:

$$F = \frac{1}{2}\rho AU^2 C_D \quad (14)$$

El desplazamiento radial relativo entre dos DOMs consecutivos DOM_j y DOM_{j-1} :

$$r_j = \sin(\alpha) \cdot \text{interDOMdist}(j_{-1} \rightarrow j) \approx \underbrace{\tan(\alpha)}_{(13)} \cdot \text{interDOMdist}(j_{-1} \rightarrow j) \quad (15)$$

Se ha supuesto que $\alpha \downarrow\downarrow$ por lo que $\sin \alpha \approx \tan \alpha$. Por último, el desplazamiento radial acumulado a una altura z_j :

$$r_{z_j} = \sum_{i=1}^{i=j} r_i \quad (16)$$

El MM se ha implementado en un documento *Excel* conociendo la altura a la que está situada cada planta del detector (Tabla 6) y suponiendo que la unión solo se realiza con un cable. Introduciendo en la hoja de cálculo los C_D obtenidos mediante las simulaciones CFD y para una velocidad $U = 0,12 \text{ ms}^{-1}$ se obtienen las gráficas recogidas en las figuras 54 y 55. Ahora se obtienen desplazamientos menores porque el valor de C_D que estaba considerado antes en el modelo era 1,3 que como se explicó en la Subsección 6.1 este es el C_D para el caso de un cilindro infinito. Se estaba considerando que la fuerza de resistencia era casi el doble. En el caso de los DOM el C_D estaba aproximado a 0,5 y ahora, considerando el DOM como una esfera, se sabe que es un poco menor.

Planta DU	ARCA		ORCA	
	$z_{\text{DOM}_j - \text{DOM}_{j-1}}$	z_{DOM_j}	$z_{\text{DOM}_j - \text{DOM}_{j-1}}$	z_{DOM_j}
18 → Boya	5,2	702,41	5,2	193,29
17 → 18	36,8	697,21	9,48	188,09
16 → 17	36,96	660,41	8,73	178,61
15 → 16	36,32	623,45	9,5	169,88
14 → 15	37,28	587,13	8,75	160,38
13 → 14	37,44	549,85	9,52	151,63
12 → 13	36,73	512,41	10,86	142,11
11 → 12	37,16	475,68	9,52	131,25
10 → 11	37,32	438,52	8,77	121,73
9 → 10	36,8	401,2	9,54	112,96
8 → 9	37,38	364,4	8,79	103,42
7 → 8	37,62	327,02	9,56	94,63
6 → 7	36,83	289,4	10,91	85,07
5 → 6	37,3	252,57	9,54	74,16
4 → 5	37,5	215,27	8,79	64,62
3 → 4	36,86	177,77	9,56	55,83
2 → 3	37,85	140,91	8,81	46,27
1 → 2	38,02	103,06	9,58	37,46
Base → 1	65,04	65,04	27,88	27,88

Tabla 6: Altura entre los diferentes pisos o plantas de las DU y altura acumulada de los detectores ARCA y ORCA

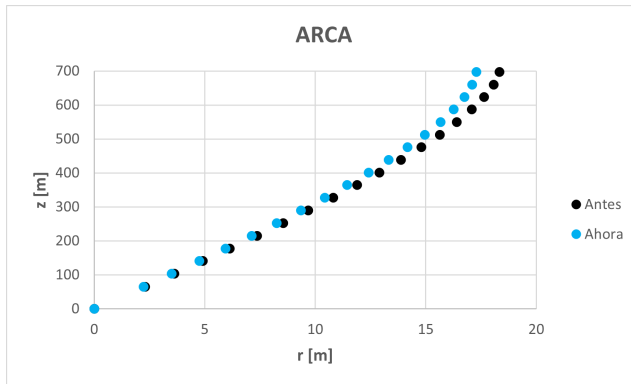


Figura 54: Comparación de los resultados obtenidos con el MM al actualizar los datos del C_D obtenidos mediante CFD para el detector ARCA

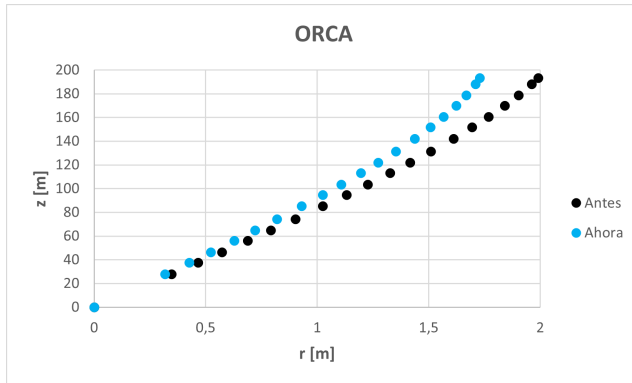


Figura 55: Comparación de los resultados obtenidos con el MM al actualizar los datos del C_D obtenidos mediante CFD para el detector ORCA

7. Conclusiones

7.1. Conclusiones de CFD

Las principales conclusiones que derivan de este trabajo están relacionadas con las simulaciones CFD:

- Importancia de simplificar el problema, ir validando e ir refinando la solución poco a poco. A veces se piensa que porque las simulaciones computacionales mediante métodos numéricos pueden resolver problemas muy complejos, se pueden saltar pasos, hacer directamente una simulación compleja con una malla muy fina y obtener resultados muy precisos. Sí, estos resultados muy fieles a la realidad se pueden obtener, pero a costa de aumentar el coste computacional y la dificultad del modelado del problema. Se ha comprobado de primera mano que es mejor comenzar con simulaciones sencillas, cortas de duración y que permitan corregir rápidamente, sin haber empleado 8 horas en una simulación y que no haya resultado como se esperaba por haber empleado una opción del programa y no otra.
- Aprovechar la ventaja de las simulaciones por ordenador que permiten aprender mediante prueba y error. Se ha llegado a la conclusión que en muchos aspectos de CFD a veces la experiencia es lo más importante. Por ejemplo, antes que intentar tener un tamaño de malla perfecto, de encontrar el valor de mínimo lado que mejor se ajuste a la simulación que se desea hacer etc., es una buena idea empezar por algunas opciones automáticas que tiene el programa, analizar qué valores otorga a la simulación y a partir de ahí ir refinando. El único coste de una simulación fallida por ordenador es el tiempo, a diferencia de estudios experimentales donde un error puede llevar a haber perdido dinero en vano.
- Cuanto más se discretice el dominio más cuesta llegar a la convergencia. Tener una malla con mayor número de celdas, aparte del mayor tiempo de cálculo por iteración, seguramente necesitará de más iteraciones y/o de aumentar el número de correctores no ortogonales para alcanzar la convergencia. El *trade-off* entre precisión y coste computacional siempre ha de ser tenido en cuenta.
- Evaluar si merece la pena refinar mucho un aspecto cuando se están suponiendo unas simplificaciones mucho mayores en otros aspectos. Por ejemplo, hasta qué punto merece la pena mallar manualmente la capa límite, buscando en la literatura valores experimentales para modelar la

subcapa viscosa, cuando por ejemplo la geometría del problema está ya demasiado simplificada que ese pequeño aumento de la precisión es despreciable frente al error que ya se está asumiendo.

- Importancia de los análisis de sensibilidad. A la hora de modelar el caso de estudio se tiene incertidumbre sobre el efecto de varias suposiciones y de si son correctas. La solución es realizar diferentes simulaciones solo cambiando un parámetro cada vez y estudiar si es fuente de error.

7.2. Conclusiones acerca de SimScale

Un objetivo cumplido ha sido el de aprender a utilizar y emplear un software de simulaciones CFD diferente a los utilizados en el grado como StarCCM+ y ANSYS Fluent. Se destacan algunas ventajas frente a los anteriores:

- SimScale tiene una plataforma basada en la nube (*cloud-based*) que es accesible desde el navegador. La gran ventaja es que cada vez que se entra a la web se está trabajando con la versión más actualizada y no hay que hacer manualmente instalaciones, actualizaciones ni mantenimiento.
- Da la posibilidad a todo el mundo de acceder a computación de alto rendimiento (*High-Performance Computing HPC*) y hacer simulaciones con hasta 96 núcleos. Como las simulaciones se realizan en la nube, se puede realizar procesamiento paralelo de múltiples diseños y mientras se puede seguir usando el ordenador. Es decir, aunque el ordenador esté limitado por hardware, por ejemplo a 8 núcleos, se pueden realizar con él simulaciones más demandantes de recursos (se ejecutan en los servidores de SimScale).
- La cuenta gratis, llamada como cuenta comunidad, no pone límite de celdas para las simulaciones. La única limitación es en las horas de simulación, las cuales ascienden a 3000 core hours en los servidores de la web. Horas más que suficientes para completar el proyecto. Con el plan gratis se puede simular con hasta 16 núcleos simultáneamente. SimScale también posee la opción de aplicar para un plan académico para estudiantes que estén con sus proyectos finales de carrera, máster o doctorados.
- La excelente documentación y soporte. Se ha aprendido a utilizar el programa con la documentación presente en su web sin necesidad de hacer cursos externos. En cuanto al soporte es una gran ventaja que no haya

que ir mandando archivos o haciendo videollamadas compartiendo pantalla para que otra persona te ayude. Simplemente compartiendo el link del proyecto, cualquier persona puede abrirlo en su cuenta y proporcionar ayuda. También es útil en el sentido inverso, el usuario puede abrir el caso de otra persona para tomar ciertos parámetros de ejemplo o estudiar el planteamiento.

- Interfaz sencilla (*user friendly*) y que es una plataforma de simulación todo en uno. Se pueden realizar distintos tipos de análisis: desde CFD, FEA hasta Análisis Térmicos.

Huelga decir que, sin duda, se volverá a usar el software para otros trabajos.

7.3. Trabajos futuros

Por último, se proponen una serie de trabajos que se podrían abordar en un futuro a partir de este trabajo para ampliar su alcance:

- Realizar las simulaciones sobre geometrías más realistas (y por tanto, más complejas) de los componentes.
- Realizar un mejor cálculo de la turbulencia mediante simulaciones DNS (Direct Numerical Simulations) que resuelven todas las escalas de la turbulencia a diferencia del modelo RANS empleado.
- Comparar con estudios experimentales, por ejemplo en tanques de agua, para validar con el caso concreto estudiado.
- Simular para otras velocidades de corriente.
- Emplear los campos de presión obtenidos así como las fuerzas como condición de contorno en una simulación estructural mediante elementos finitos que permita simular de una manera fidedigna el movimiento de la DU y ver el viraje que permiten los cables en función de la orientación.

Referencias

- [1] KM3NeT collaboration. *KM3NeT*. URL: <https://www.km3net.org/>. (accedida: abril de 2021).
- [2] Dr. Don Lincoln. *The Standard Model*. Fermilab. Oct. de 2012. URL: https://www.youtube.com/watch?v=XYcw8nV_GTs.
- [3] Dr. Don Lincoln. «The Standard Model: The most successful theory ever». En: *Fermilab Today. Physics in a Nutshell* (2011).
- [4] Aparici A. «Los tres sabores del neutrino». En: *La Razón. Ciencia* (2020). URL: <https://www.larazon.es/ciencia/20200729/qkhjt7cjjfhpfn7utzdyardma.html>.
- [5] Aparici A. «“Queridos señores y señoras radiactivos”: 90 años de la partícula fantasma». En: *La Razón. Ciencia* (2020). URL: <https://www.larazon.es/ciencia/20200415/vubvflh3bc2tji2skn47kfdy.html>.
- [6] Aparici A. «El neutrino, uno más en la familia». En: *La Razón. Ciencia* (2020). URL: <https://www.larazon.es/ciencia/20200610/44pijmvvwjgzhjrtynghjdjxe.html>.
- [7] «IceCube and Neutrinos». En: *IceCube Masterclass* (2021). URL: <https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/learn/learn-about-neutrinos>.
- [8] Benavente R. «El hombre que se metió bajo una montaña a buscar neutrinos». En: *El Confidencial* (2015). URL: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-01-23/el-hombre-que-se-metio-bajo-una-montana-a-buscar-neutrinos_627992/.
- [9] *GNN. The Global Neutrino Network*. URL: <https://www.globalneutrino.org/>. (accedida: agosto de 2021).
- [10] «Investigadores del Campus de Gandía participan en la construcción del mayor telescopio de neutrinos». En: *Prensa UPV* (2021). URL: <http://www.upv.es/noticias-upv/noticia-12968-km3net-es.html>.
- [11] Connor N. «What is Photomultiplier Tube – PMT – Definition». En: *Radiation Dosimetry* (2019). URL: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-photomultiplier-tube-pmt-definition/>.
- [12] Berbee E. *KM3NeT DU: Description of components*. Inf. téc. KM3NeT MECH, mar. de 2018.
- [13] Erickson K. «What Is a Supernova?» En: *Nasa Science. Space Place* (2021). URL: <https://spaceplace.nasa.gov/supernova/en/>.

- [14] Mann A. «What Is a Gamma-Ray Burst?» En: *SPACE.com* (2020). URL: <https://www.space.com/gamma-ray-burst.html>.
- [15] «Six KM3NeT/ARCA detection units operational in the deep sea». En: *KM3NeT PRESS RELEASE* (2021). URL: <https://www.km3net.org/category/press-releases/>.
- [16] Dr. Don Lincoln. *How does Cerenkov radiation work?* Fermilab. Oct. de 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Yjx0BSXa0Ks>.
- [17] Torregrosa A. Dolz V. *Diapositivas Flujo compresible. Unidad Temática 4*. Asignatura Mecánica de Fluidos. Grado en Ingeniería Aeroespacial. UPV, 2019.
- [18] Yasuki Nakayama. «Chapter 13 - Flow of a Compressible Fluid». En: *Introduction to Fluid Mechanics (Second Edition)*. Ed. por Yasuki Nakayama. Second Edition. Butterworth-Heinemann, 2018, págs. 255-275. ISBN: 978-0-08-102437-9. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102437-9.00013-9>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081024379000139>.
- [19] Montferrer M. *La partícula azul más rápida que la luz*. CdeCiencia. Feb. de 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=a9fZzOAMLVI>.
- [20] «Seawater Notes». En: *PSCI 103 Physical Science. Rhode Island College* (2015). URL: https://w3.ric.edu/faculty/PSCI103/Seawater/Seawater_notes.htm.
- [21] *Sea water properties*. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html. (accedida: 2021).
- [22] Robert H Stewart. *Introduction to Physical Oceanography*. eng. 2008.
- [23] *EMSO Ligure Ouest MII capteur AQUADOPP*. URL: https://erddap.osupytheas.fr/erddap/tabledap/Emso_Ligure_Ouest_MII_Aquadopp_CSV.graph?time%5C%2CSpeed%5C%2CDirection&time%5C%3E=2020-02-20T00%5C%3A00%5C%3A00Z&time%5C%3C=2020-02-27T00%5C%3A00%5C%3A00Z&.draw=markers&.marker=5%5C%7C5&.color=0x000000&.colorBar=%5C%7C%5C%7C%5C%7C%5C%7C%5C%7C&.bgColor=0xffccccff.
- [24] «Water Compressibility». En: *USGS* ().
- [25] Navarro R. Martí P. *Diapositivas CFD y turbulencia. Temas 6 al 12*. Asignatura Ampliación de Mecánica de Fluidos. Grado en Ingeniería Aeroespacial. UPV, 2019.

- [26] Jones DA. Clarke DB. «Simulation of Flow Past a Sphere using the Fluent Code». En: *Australian Maritime Platforms Division. Defence Science and Technology Organisation* (2008).
- [27] *Documentación y Tutoriales de SimScale*. URL: <https://www.simscale.com/docs/tutorials/>. (accedida: 2021).
- [28] Munson BR. Okiishi TH. Huebsch WW. Rothmayer AP. *Fundamentals of fluid mechanics*. eng.
- [29] Douglas Potts y col. «The Effect of Aspect Ratio on the Drag of Bare Cylinders». En: jun. de 2019. DOI: [10.1115/OMAE2019-96431](https://doi.org/10.1115/OMAE2019-96431).
- [30] Dídac D. Tortosa. «Mechanical Line Fit Model to Monitor the Position of KM3NeT Optical Modules from the Acoustic and Compass/Accelerometer Sensor System Data». En: *Proceedings* 42.1 (2020). ISSN: 2504-3900. DOI: [10.3390/ecsa-6-06583](https://doi.org/10.3390/ecsa-6-06583). URL: <https://www.mdpi.com/2504-3900/42/1/33>.
- [31] Dídac D. Tortosa. «Monitoring and Reconstruction of the Shape of the Detection Units in KM3NeT Using Acoustic and Compass Sensors». En: *Sensors* 20.18 (2020). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s20185116](https://doi.org/10.3390/s20185116). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/18/5116>.

Parte II

Pliego de condiciones

Objeto

En esta parte se exponen las condiciones mínimas que se han de garantizar para la correcta realización del proyecto. El uso en la totalidad del trabajo del ordenador, una pantalla de visualización, está sujeto a unos riesgos bien definidos y que se han de prevenir. Se han de tomar medidas en cumplimiento del Real Decreto 488/1997 de pantallas de visualización de datos (PVD).

Asimismo, y si cuando se lleve a cabo el proyecto la pandemia sigue afectando, se deben obedecer las medidas vigentes en el momento destinadas a evitar el contagio del virus SARS-CoV-2.

Condiciones de software necesario

Se listan a continuación los softwares empleados en la realización del trabajo. La gran ventaja es que varios de ellos trabajan desde la nube por lo que pueden ser utilizados desde cualquier ordenador independientemente de su *hardware* siempre que esté asegurada una buena y estable conexión a internet.

- **SimScale:** simulaciones CFD desde el navegador. No requiere instalación.
- **Overleaf:** redacción de la memoria y creación de la presentación mediante el sistema de composición de textos \LaTeX . Se ejecuta desde el navegador. No requiere instalación.
- **Autodesk Fusion 360:** modelado 3D de los cuerpos a simular.
- **Microsoft Excel:** análisis y comparación de datos mediante la creación de tablas y gráficos. Implementación del MM.
- **Microsoft Teams:** reuniones no presenciales con los supervisores del proyecto. Esencial en la situación actual afectada por el COVID-19.
- **Canva:** edición de ilustraciones e imágenes. Se ejecuta desde el navegador. No requiere instalación.

- **Inkscape**: extracción de imágenes vectorizadas de un archivo pdf.

Parte III

Presupuesto

Introducción

Se especifican a continuación los costes asociados a la realización del estudio que conforma el presente Trabajo Fin de Grado. Los costes incluyen los recursos humanos de todas las personas que han participado en el proyecto, las licencias de los diferentes *softwares* informáticos empleados en su realización, y gastos comunes como son el equipo empleado o el consumo eléctrico.

Desarrollo del presupuesto

Capital humano

En primer lugar, los costes asociados al personal se han estimado a partir de las tablas de retribuciones salariales anuales según el Portal de Transparencia de la Universitat Politècnica de València y tomando como 1720 las horas de trabajo anuales de acuerdo con el BOE-A-2020-1626. Para el caso del ingeniero, se ha partido de un salario estándar anual correspondiente a su categoría de ingeniero técnico junior (Tabla 7).

Denominación	Dedicación [h]	Importe [€/h]	Total [€]
Tutor Catedrático/a de Universidad	40	35	1400
Subtutor Técnico superior	20	25	500
Ingeniero Técnico Aeroespacial junior	310	13	4030
		Subtotal	5930

Tabla 7: Costes de los recursos humanos

Licencias de software

Como se comentó en el pliego de condiciones, para la realización del proyecto han sido necesarios una serie de softwares. Para el uso de algunos, es necesario adquirir una licencia ofertada por el desarrollador. En este proyecto en particular, las licencias de pago han estado cubiertas por la Universitat Politècnica de València, pero sí supondría un coste para cualquier empresa contratante (Tabla 8).

Licencia de software	Tipo de plan	Importe [€]
SimScale	Community	-
Overleaf	Gratuito	-
Paquete Office	Personal	69
Foxit Reader	Gratuito	-
Fusion 360	Estudiante	352
Inkscape	Open source	-
Canva	Gratuito	-
Subtotal		421

Tabla 8: Costes del software

Equipo informático

Se ha considerado que el periodo de amortización del equipo informático es de 5 años. Por lo que estimando un año para el desarrollo del trabajo se llega a la [Tabla 9](#).

Denominación	Importe [€]	Amortización [€]
Portátil Asus F541UA	679	135,80
Monitor 22" reacondicionado	53,35	10,67
Ratón Inalámbrico Logitech	8,98	1,80
Subtotal		148,27

Tabla 9: Costes del equipo

Presupuesto total

Sumando los subtotales anteriores se llega al P.E.M., el presupuesto de ejecución material. A éste se le aplica un 8% de beneficio industrial, un 13% destinado a gastos generales como el consumo eléctrico y un 21% correspondiente al impuesto sobre el valor añadido (IVA).

Concepto	Importe [€]
Capital humano	5930
Licencias de software	421
Equipo informático	148,27
P.E.M.	6499,27
8% Beneficio industrial	519,94
13% Gastos generales	844,90
21% IVA	1364,85
TOTAL	9228,96

Tabla 10: Presupuesto total

Por tanto, el presupuesto total estimado asciende a la cantidad de **NUEVE MIL DOSCIENTOS VEINTIOCHO EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS**.