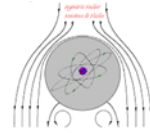


MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

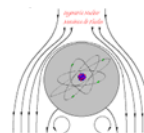
Fundamentos del funcionamiento de un canal de olas; diseño y montaje de un canal de olas de doce metros de longitud a instalar en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao

Alumna: Erika De la Hoz Tovar
Director: Jesús María Blanco Ilzarbe
Codirector: Urko Izquierdo Ereño
Departamento: Ingeniería Nuclear y Mecánica de Fluidos
Curso académico: 2017-2018

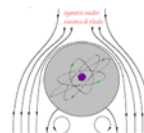


Lista de contenidos

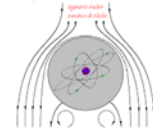
Lista de Ilustraciones	IV
Lista de Tablas.....	VII
Lista de Gráficos.....	IX
Resumen trilingüe	X
1 Introducción	1
2 Objetivos y alcance	4
3 Contexto	5
3.1 Área de estudio: Bimep.....	5
3.2 Canal de referencia.....	8
4 Beneficios.....	11
5 Estado del arte	13
5.1 Teoría de olas	13
5.1.1 Teoría Lineal de olas.....	13
5.1.2 Teoría de Stokes	16
5.1.3 Clasificación de las olas en función de la profundidad relativa.....	17
5.1.4 Diagrama Le Méhauté	18
5.2 Instalaciones para la simulación del oleaje	20
5.3 Partes de un canal de olas.....	22
6 Análisis de alternativas	25
6.1 Zona de generación.....	25
6.1.1 Conceptos teóricos.....	25
6.1.2 Generador de tipo pistón.....	28
6.1.3 Generador de tipo flap.....	35
6.1.4 Otros tipos de generadores.....	45
6.2 Zona de propagación	48
6.3 Zona de extinción	49



7	Análisis de riesgos	54
8	Selección de la solución. Diseño completo del canal de olas	56
8.1	Aspectos a considerar en la instalación del canal de olas.....	56
8.1.1	Emplazamiento disponible para la instalación	56
8.1.2	Presupuesto para la instalación y el mantenimiento	58
8.1.3	Naturaleza de los ensayos previstos.....	59
8.1.4	Escala de los ensayos.....	60
8.2	Condiciones de oleaje	60
8.2.1	Obtención de los datos.....	60
8.2.2	Tratamiento posterior de los datos.....	63
8.3	Características del canal.....	63
8.4	Elementos del canal de olas	68
8.4.1	Generador de olas. Comparación entre pistón y flap.....	68
8.4.1.1	Restricciones de cada tipo de generador	68
8.4.1.2	Relación H/S obtenida/alcanzada	71
8.4.1.3	Tipo de ola generada – Le Méhauté	73
8.4.1.4	Potencia teórica requerida por el generador	76
8.4.1.5	Solución elegida	77
8.4.2	Playa absorbedora	78
8.4.3	Equipamiento auxiliar del canal.....	80
9	Metodología y cálculos realizados	86
9.1	Diagrama de Gantt.....	86
9.2	Cálculos	88
9.2.1	Datos oceánicos	88
9.2.2	Diagrama de Le Méahuté	93
9.2.3	Escala de laboratorio.....	95
9.2.4	Ensayos experimentales	98
9.2.5	Potencia necesaria para la generación del oleaje	99



9.2.6 Playa.....	102
10 Presupuesto	105
11 Conclusiones	106
12 Referencias.....	108
ANEXO I: Planos.....	110
ANEXO II: Catálogo de las bombas	120
ANEXO III: Resultados de la potencia requerida por el generador de olas	123



Lista de Ilustraciones

Ilustración 1: Potencial undimotriz de Europa, unidades kW/m [2].....	2
Ilustración 2: Localización y dimensiones de la zona de pruebas de Bimep [3].....	6
Ilustración 3: Funcionamiento de la boya flotante con el sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC) [4].....	7
Ilustración 4: MARMOK-A-5 instalado en Bimep [4]	7
Ilustración 5: Canal de referencia.....	8
Ilustración 6: Zona de generación del canal de referencia	9
Ilustración 7: Zona de propagación del canal de referencia	9
Ilustración 8: Zona de extinción del canal de referencia	10
Ilustración 9: Nivel de gasto I+D y riqueza por países [7].....	12
Ilustración 10: Estructura de un problema con condiciones de contorno en 2 dimensiones [12]	13
Ilustración 11: Movimiento de las partículas de agua en función de la profundidad relativa [13]	18
Ilustración 12: Diagrama de Le Méhauté [13]	19
Ilustración 13: Canal de olas instalado y construido por Edinburgh Designs [15].....	20
Ilustración 14: Tanque de olas instalado en el IH de Cantabria [16]	21
Ilustración 15: Vista superior de la zona de generación del canal de referencia.....	22
Ilustración 16: Zona de propagación de un canal de olas [18]	23
Ilustración 17: Sistema pasivo de extinción [19]	24
Ilustración 19: Movimiento del generador de tipo flap para olas de aguas profundas, $h/\lambda > 0,5$ [15]	27
Ilustración 20: Movimiento del generador de tipo pistón creando olas de aguas poco profundas, $h/\lambda < 0,05$ [15]	27
Ilustración 21: Funcionamiento generador tipo pistón [15]	28
Ilustración 22: Funcionamiento generador tipo flap [15].....	36
Ilustración 23: Características geométricas de un generador tipo flap	37
Ilustración 24: Generador de olas en forma de cuña[12]	46

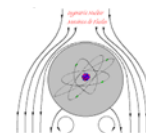


Ilustración 25: Generador de 3 grados de libertad [21].....	47
Ilustración 26: Generador de 2 grados de libertad, tipo flap-pistón [21]	47
Ilustración 27: Generador de 2 grados de libertad, tipo flap-flap [21]	48
Ilustración 28: Playa sin inclinación [24]	50
Ilustración 29: Playa con pendiente constante [24].....	51
Ilustración 30: Playa con cambio de pendiente [24].....	51
Ilustración 31: Playa formada por una superficie en malla y con piedras	52
Ilustración 32: Playa formada por dos superficies rectas [24]	52
Ilustración 33: Playa con perfil parabólico [24].....	53
Ilustración 34: Playa con perfil circular [24].....	53
Ilustración 35: Plano del laboratorio docente de Mecánica de Fluidos.....	57
Ilustración 36: Posición del extremo del canal en el laboratorio, zona de generación	58
Ilustración 37: Boya WAVESCAN desarrollada por AZTI [26]	61
Ilustración 38: WAVESCAN y sistema de amarre al fondo marino [26].....	62
Ilustración 39: Perfil del canal con altura total, disposición de las bombas	64
Ilustración 40: Alzado del canal, unidades en mm.....	65
Ilustración 41: Planta del canal, unidades en mm.....	65
Ilustración 42: Estructura del canal	66
Ilustración 43: Vista lateral de la estructura del canal.....	66
Ilustración 44: Vista completa del canal de olas en el laboratorio	67
Ilustración 45: Diagrama de Le Méhauté con las condiciones de Bimep representadas	73
Ilustración 46: Diagrama de Le Méhauté para el generador de tipo Flap.....	74
Ilustración 47: Diagrama de Le Méhauté para el generador de tipo Pistón.....	75
Ilustración 48: Diseño de la playa instalada en el canal	78
Ilustración 49: Sistema de absorción instalado en el canal	79
Ilustración 50: Detalle del guiado de la playa.....	80
Ilustración 51: Medidor ultrasónico del nivel del agua	81
Ilustración 52: Características geométricas de los medidores de nivel	81
Ilustración 53: Orificios realizados para la conexión entre el canal y el depósito subterráneo.	82

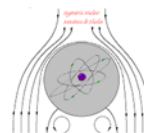
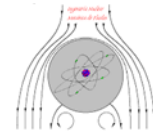


Ilustración 54: Conexión entre el tanque subterráneo y el canal en la zona de generación	82
Ilustración 55: Depósito subterráneo y bombas.....	83
Ilustración 56: Conexión entre el depósito subterráneo y canal en la zona de extinción	84
Ilustración 57: Sistema de control de las bombas.....	84
Ilustración 58: Bomba BC 15/50-ST [27].....	85
Ilustración 59: Diagrama de Gantt del proyecto.....	87
Ilustración 60: Barra de herramientas de AMEVA	88
Ilustración 61: Interface de selección de datos AMEVA	89
Ilustración 62: Estudio batimétrico de Bimep [26]	93
Ilustración 63: Diagrama de Le Méhauté con Bimep representado	94
Ilustración 64: Valores parámetros parábola S. Neelamani [20].....	103
Ilustración 65: Valores parámetros diseño circunferencia	104



Lista de Tablas

Tabla 1: Ecuaciones de la teoría de Airy [13].....	15
Tabla 2: Ecuaciones de la teoría de Stokes de segundo orden.....	17
Tabla 3: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 1,0$ m	34
Tabla 4: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 2,0$ m	34
Tabla 5: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 3,0$ m	35
Tabla 6: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 4,0$ m	35
Tabla 7: Carrera máxima un generador tipo flap para las distintas profundidades a las que se podría trabajar en el canal objeto de diseño.....	37
Tabla 8: Valores de carrera del flap para $\lambda = 1,0$ m	43
Tabla 9: Valores de carrera del flap para $\lambda = 2,0$ m	44
Tabla 10: Valores de carrera del flap para $\lambda = 3,0$ m	44
Tabla 11: Valores de carrera del flap para $\lambda = 4,0$ m	45
Tabla 12: Presupuesto completo para la instalación del canal	59
Tabla 13: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 1,0 m.....	69
Tabla 14: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 2,0 m.....	69
Tabla 15: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 3,0 m.....	70
Tabla 16: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 4,0 m.....	70
Tabla 17: Relación H/S para $\lambda = 1,0$ metros.....	72
Tabla 18: Relación H/S para $\lambda = 4,0$ metros.....	72
Tabla 19: Comparación relación H/S entre $\lambda = 1.0$ y $\lambda = 4.0$ metros.....	73
Tabla 20: Resumen parámetros oceánicos de Bimep.....	93
Tabla 21: Puntos de Bimep para el diagrama de Le Méhauté	94
Tabla 22: Valores de longitud de onda y número de Ursell	95
Tabla 23: Factor de escala calculado en base a las alturas de ola medida en Bimep y deseada en el canal	96
Tabla 24: Longitudes de onda semejantes a obtener en el canal para alcanzar los valores extremos definidos en Bimep.....	97
Tabla 25: Periodo del canal aplicando factor de escala.....	98

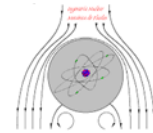
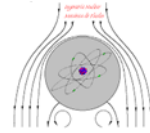
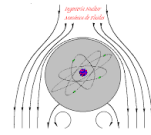


Tabla 26: Comparación entre los resultados teórico y experimentales, con profundidad igual a 0,2 m	99
Tabla 27: Cálculos de potencia para distintos calados y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=1,0$ m.....	101
Tabla 28: Potencia requerida para olas de $H=0,2$ m	102
Tabla 29: Parámetros diseño circunferencia de la playa	103
Tabla 30: Presupuesto completo instalación del canal	105
Tabla 31: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=2,0$ m	123
Tabla 32: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=3,0$ m	124
Tabla 33: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=4,0$ m	125



Lista de Gráficos

Gráfico 1: WaveMaker Theory para pistón y flap.....	26
Gráfico 2: Carrera del pistón para longitud de onda de 1 metro.....	30
Gráfico 3: Carrera del pistón para longitud de onda de 2 metros.....	31
Gráfico 4: Carrera del pistón para longitud de onda de 3 metros.....	32
Gráfico 5: Carrera del pistón para longitud de onda de 4 metros.....	33
Gráfico 6: Carrera del flap para longitud de onda de 1,0 m.....	39
Gráfico 7: Carrera del flap para longitud de onda de 2,0 m.....	40
Gráfico 8: Carrera del flap para longitud de onda de 3,0 m.....	41
Gráfico 9: Carrera del flap para longitud de onda de 4,0 m.....	42
Gráfico 10: Wavemaker Theory para longitud de onda igual a 1,0 metros	71
Gráfico 11: Wavemaker Theory para longitud de onda igual a 4,0 metros	72
Gráfico 12: Potencia requerida para un pistón y flap para $H=0,10$ m y $\lambda=4,0$ m.....	76
Gráfico 13: Potencia requerida para un pistón para $H=0,2$ m y $\lambda=4,0$ m.....	77
Gráfico 14: Histograma altura significativa Bimep (1985-2015).....	90
Gráfico 15: Histograma densidad de frecuencia (altura-dirección).....	91
Gráfico 16: Rosa de los vientos Bimep.....	91
Gráfico 17: Histograma periodo energético Bimep (1985-2015).....	92
Gráfico 18: Diseño parábola S.Neelamani.....	103
Gráfico 19: Diseño circunferencia para la playa	104

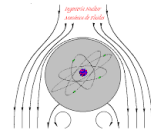


Resumen trilingüe

Este proyecto contempla el diseño los elementos principales que permiten el funcionamiento de un canal de olas en las condiciones deseadas. El canal de olas estará situado en el Laboratorio de Mecánica de Fluidos en el Edificio II de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU). El interés por llevar a cabo este proyecto recae en la posibilidad de simular el oleaje que se da en la costa vasca, concretamente frente al municipio de Lemoiz, por ubicarse allí un área para el testeo de dispositivos de aprovechamiento de la energía de las olas. A lo largo del proyecto se evaluarán distintos aspectos relativos tanto al oleaje como condiciones de diseño, para finalizar con la descripción de los elementos que formarán el canal. El futuro de este equipo está ligado al análisis y prueba de prototipos de captadores de energía undimotriz en las fases iniciales de su desarrollo.

Proiektu honek olatuen-tanga baten funtzionamendua ahalbidetzen duen osagai nagusien diseinua bere baitan hartzen du. Olatuen-tanga, Jariakinen Mekanikako Laborategian instalatuko da, Bilboko Ingeniaritza Eskolaren (UPV/EHU) II. Eraikinean. Proiektu hau burutzeko arrazoi nagusia euskal kostaldean ematen diren olatuen baldintzak simulatzeko aukera edukitzea da, hain zuzen ere, Lemoizko udalerraren aurrealdean sortatzen dena, bertan olatuen energia erabiltzen duten gailuen frogapenerako eremu bat dagoelako. Lan honetan, olatuen zein diseinu balditzen aspektu ezberdinak aztertuko dira, olatuen-tanga osatuko duten elementuen deskribapenarekin amaituz. Tanga honen etorkizuna, olatuen energia bereganatzen duten prototipoen froga eta analisirako bideratuta egongo da, batez ere gailu hauek haien hasierako garapen fasean daudenean.

The aim of this Project is to design the main part that makes possible an appropriate operation of a wave flume that will be located in the Fluid Mechanics Laboratory in the Building II of the Faculty of Engineering in Bilbao (UPV/EHU). The interest of carrying out this project lies in the simulation of the waves of the Basque Coast, specifically in the ones located in front of the town of Lemoiz, because there is an area for testing devices for harnessing the energy of the waves. Throughout the document, different aspects related to swell and design conditions will be evaluated, to finish with the description of the elements that would make it up. The future of this wave flume is linked to the analysis and testing of the wave energy converters prototypes, when they are in their design stage.



1 Introducción

El presente proyecto se centra en el desarrollo de tecnologías que permitan una transición energética real basada en la producción y el uso de energías renovables, objetivo deseado y perseguido en la sociedad vasca. La situación energética actual resulta insostenible ya que la demanda energética continúa aumentando, mientras que los recursos actualmente utilizados para satisfacer dicha demanda son limitados y muestran síntomas de agotamiento. Por lo tanto, se requieren soluciones que permitan garantizar el suministro energético de forma sostenible y que coadyuven a seguir mejorando la calidad de vida de toda la sociedad. Este tipo de soluciones, únicamente pueden ser llevadas a cabo mediante el uso de las energías renovables.

Dentro de las diversas formas en las que pueda obtenerse energía de origen renovable, se encuentran las energías marinas. Éstas se caracterizan por obtener energía mecánica del movimiento de las olas, las corrientes, las mareas o el viento, para su posterior transformación en energía eléctrica. En particular, este trabajo se centra en la energía undimotriz. La energía undimotriz es aquella que aprovecha la energía mecánica generada por el movimiento de las olas para obtener electricidad, por tanto, es un tipo de energía de origen renovable e inagotable [1].

Esta elección se justifica por el potencial medio-alto de recurso undimotriz del que se dispone en el mar Cantábrico [2], de entre 20 y 44 kW por metro de frente de ola. Las buenas condiciones de oleaje unidas a que las condiciones de viento no son extremas, hacen de la costa vasca un entorno idóneo para el estudio del comportamiento de captadores de energía en mar abierto. Es decir, se le puede considerar como un banco de ensayos donde instalar los dispositivos previamente a hacerlo en emplazamientos con condiciones en los que funcionarían de manera más eficiente.

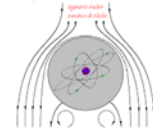
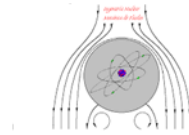


Ilustración 1: Potencial undimotriz de Europa, unidades kW/m [2]

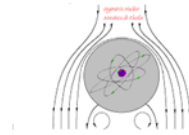
Sin embargo, la energía undimotriz todavía se encuentra en estado emergente. Esto es debido a la complejidad que entraña el medio y la difícil predicción del comportamiento del mismo. Además, a esto hay que sumarle la limitación de recursos, desde los económicos hasta la carencia de datos en cuanto a cómo evoluciona el comportamiento de los dispositivos a largo plazo; la mayoría de dispositivos instalados han durado sólo meses funcionando, por lo que no existen datos fiables sobre los que apoyarse. Por lo tanto, resulta necesario conocer de forma detallada las condiciones meteorológicas y aumentar y mejorar los estudios preliminares de los dispositivos en cada una de las fases de desarrollo. Esta última pesquisa es uno de los objetivos de la industria vasca ya que pretende abarcar todas las fases de desarrollo de los dispositivos de captación de energía de las olas. Así, se pretende contemplar el estudio preliminar de las condiciones de oleaje, el posterior diseño y modelado de dispositivos y finalizar con el diseño y construcción de prototipos para su ensayo en mar abierto. Además, también se pretende cubrir todas las actividades que engloban la instalación y mantenimiento de una planta de energía undimotriz; transporte de los dispositivos y cable, preparación del fondo marino, amarre de los captadores al mismo, etc.

Este proyecto contempla el diseño, instalación, caracterización y puesta a punto de algunos de los elementos que forman parte de un canal de 12 metros de longitud, que se ubicará en el laboratorio docente de Mecánica de Fluidos del Edificio II de la Escuela de Ingeniería de Bilbao de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea. Disponer de este canal supondrá dotar de una de las herramientas principales que permita abordar tanto el estudio preliminar de las condiciones de oleaje, como el posterior diseño y modelado de dispositivos a escala de laboratorio.



La metodología que se seguirá para el diseño del canal se fundamenta en los datos metaoceánicos de Bimep – Área de ensayos de energía marina situado frente a la costa de Vizcaya - , con el objetivo de poder representar las condiciones de oleaje de dicho emplazamiento en el canal de olas del laboratorio. Para ello, se llevará a cabo un estudio que permita caracterizar algunos de los elementos que van a constituir el canal de olas: la estructura, el generador de oleaje y la zona de extinción, de acuerdo con las condiciones de oleaje que se quieren reproducir. Además, se tendrán en cuenta otros factores adicionales, como son aquellos relacionados con el presupuesto e instalaciones que serán de gran relevancia a la hora de diseñar el canal de olas.

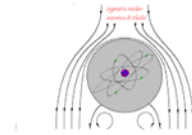
Si bien el alcance del presente proyecto abarca el diseño y caracterización de parte del canal, cabe mencionar que su utilización dará lugar a futuros trabajos de investigación, basados en la reflexión de olas, en los sistemas de extinción instalados, el diseño y testeo de dispositivos de captación energética, estudios relacionados con la interacción del oleaje con estructuras flotantes, etc.



2 Objetivos y alcance

El objetivo principal de este proyecto es el análisis de los elementos más importantes que forman parte del canal de olas a instalar en el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela de Ingeniería de Bilbao (UPV/EHU). Para poder cumplir el objetivo del proyecto, se deben llevar a cabo los siguientes objetivos parciales:

- El análisis de los datos oceánicos recogidos por la boya localizada en Bimep, con el fin de obtener información estadística relevante (periodo y altura de ola y profundidad) que permita poder realizar el desarrollo teórico de este proyecto.
- El estudio de los generadores disponibles en el mercado, analizando las características y condiciones que se requieren para su implementación. Esto permitirá seleccionar adecuadamente el generador de olas, en función de las condiciones de oleaje determinadas en Bimep y de las olas que se deseen simular en el canal del laboratorio.
- El análisis de los sistemas de absorción existentes, teniendo en cuenta las condiciones de ola deseadas. Además, se llevará a cabo el diseño del sistema de absorción en lo que a su perfil, dimensiones e inclinación hace referencia.
- La realización de ensayos con el canal de olas de referencia instalado en el laboratorio, y comparación de los resultados con aquellos obtenidos en el análisis teórico.
- La determinación teórica del valor de potencia máximo requerida por el actuador, que garantice la generación de olas que se deseen simular en el canal, en función de las distintas condiciones de oleaje.



3 Contexto

La contextualización de este trabajo requiere definir el área objeto de estudio, ya que es de ésta de la cual se desean reproducir las condiciones de oleaje en el canal del laboratorio, a partir de la extracción de datos oceanográficos. Esta zona se corresponde con el área de mar que pertenece a las instalaciones de Bimep. Además, a lo largo de este trabajo se hará referencia y se explicará la metodología llevada a cabo durante los ensayos realizados en el canal de pequeñas dimensiones actualmente disponible en el laboratorio docente de Mecánica de Fluidos. Dado que la experiencia adquirida en este canal ha resultado ser útil a la hora de diseñar y dimensionar el nuevo canal, conviene describirlo así como alguno de los ensayos realizados en él.

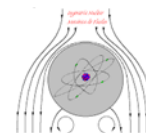
3.1 Área de estudio: Bimep

El nombre de Bimep corresponde a las siglas Biscay Marine Energy Platform, es una empresa pública fundada en 2011, que pertenece en un 92% al EVE (Ente Vasco de la Energía) y el 8% restante al IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía). Consiste en una instalación situada a casi 2 kilómetros de la costa de Armintza (Lemoiz) que sirve para la investigación, evaluación y explotación de dispositivos undimotrices en fase pre-comercial y comercial.

La creación de Bimep surgió dentro del Plan de Ciencia, Tecnología e Innovación (PCTI) Euskadi 2020. Dentro de él se planteó por parte del Gobierno Vasco apostar por la energía de las olas, apoyándose en las capacidades y necesidades energéticas e industriales del País Vasco.

Bimep cuenta con todos los permisos necesarios para la instalación y testeo de dispositivos de aprovechamiento undimotriz, además de la infraestructura que requieren para su uso, es decir, es un lugar donde las empresas que diseñan prototipos para el aprovechamiento de la energía undimotriz pueden instalarlos y probarlos para comprobar su comportamiento en mar abierto. Por tanto, Bimep puede ser considerado como una herramienta muy útil y necesaria para la validación de los prototipos antes de su comercialización.

La zona ocupada por Bimep es de 5,2 km², comprendiendo en ella profundidades que van desde los 50 m hasta los 90 m. Consiste, por tanto, en un área con un potencial energético medio-alto, de unos 20 kW·m⁻² de frente de ola, lo que le convierte en un lugar idóneo para la prueba de prototipos. Además, está situada cerca del puerto de Bilbao, a 15 kilómetros, y cuenta con buenas comunicaciones tanto por carretera como a la red eléctrica.



En la Ilustración 2 puede verse el área que abarca Bimep. En ella, se pueden observar los 7 puntos señalados con boyas de balizamiento que delimitan la zona y también las 4 zonas de fondeo donde se pueden ubicar los prototipos, representadas por círculos.

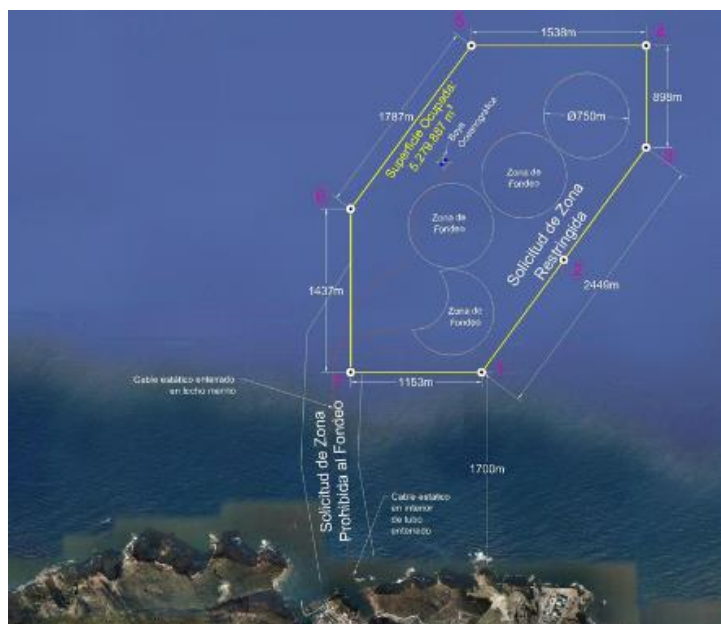


Ilustración 2: Localización y dimensiones de la zona de pruebas de Bimep [3]

Desde su inauguración Bimep cuenta con todos los permisos necesarios y ofrece garantías para la instalación de dispositivos de aprovechamiento de energía de las olas. Debido al auge de la energía eólica *offshore* a nivel mundial, desde hace unos años se ha trabajado en conseguir los permisos administrativos y medioambientales requeridos para la instalación de aerogeneradores. En junio de 2018 se ha dado luz verde a la explotación de la zona para el aprovechamiento de la energía eólica *offshore*, esto hace que Bimep pueda albergar proyectos mucho más ambiciosos que combinen ambos tipos de energía, la eólica y la undimotriz.

Bimep fue inaugurada en 2015, y desde ese año hay instalados diversos equipos auxiliares, boyas de medición y conectores submarinos que continúan su funcionamiento actualmente. Desde octubre de 2016, Bimep alberga la instalación de un dispositivo de captación de olas creado por la empresa vasca Oceantec [4]. Este dispositivo está basado en la tecnología de columna de agua oscilante (OWC) que consiste en aprovechar el movimiento del aire que circula por el interior del dispositivo. Este dispositivo posee una turbina en el interior, y cuando el aire se mueve en sentido ascendente al entrar agua por la parte inferior del dispositivo, es el desplazamiento del propio aire quien provoca el movimiento de los álabes de una turbina, que finalmente es la que genera energía eléctrica.

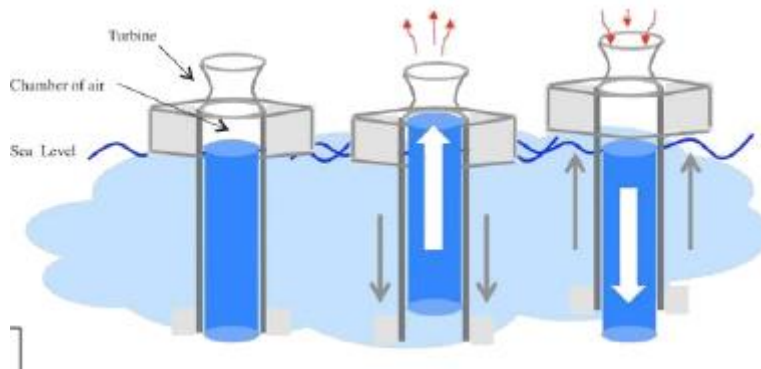


Ilustración 3: Funcionamiento de la boya flotante con el sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC) [4]

Este dispositivo, llamado MARMOK-A-5, de 42,0 m de longitud y 5,0 m de diámetro, se trata de un equipo de baja potencia, 30 kW [4]. Una vez que se lleven a cabo los ensayos con este prototipo se prevé el diseño de un dispositivo comercial de 300 kW.



Ilustración 4: MARMOK-A-5 instalado en Bimep [4]

El canal de olas objeto de estudio en el presente proyecto, pretende servir como herramienta para aquellos proyectos de investigación en los que, antes de llegar a construir un prototipo de grandes dimensiones, puedan ser probados los modelos correspondientes a escala de laboratorio.

3.2 Canal de referencia

La necesidad de instalar un nuevo canal de olas surge a raíz de las carencias detectadas en el canal previamente instalado en el laboratorio, que no reúne las características adecuadas para asegurar unos resultados acordes con los cálculos teóricos. Sin embargo, los resultados obtenidos en diferentes ensayos, han sido de gran utilidad a la hora de diseñar el nuevo canal; por esto se le denomina canal de referencia.

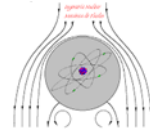
Se trata de un canal de 2,955 m de longitud, 0,40 m de ancho y 0,50 m de altura. La estructura está formada por varios perfiles de aluminio que soportan la plataforma de acero inoxidable que hace de fondo del canal. Las paredes del canal son de metacrilato transparente, lo que permite observar perfectamente la evolución de las olas cuando se realizan los ensayos. Cualquier canal de olas se define por tener tres zonas perfectamente diferenciadas: zona de generación, de propagación y de extinción de la ola.



Ilustración 5: Canal de referencia

La zona de generación de oleaje tiene una longitud de 0,295 m y consiste en un sistema de tipo pistón. Está formada por una pala vertical, dispuesta perpendicular al fondo de canal, unida a un actuador lineal (motor LinMot ® P01-23x80x210). En los bordes de la pala se han adherido unas tiras de silicona para minimizar el rozamiento con las paredes y evitar en la medida de lo posible el paso del agua de un lado de la pala al otro.

El actuador permite un desplazamiento lineal máximo del pistón de 210 mm, puede generar una fuerza máxima de 255 N y alcanzar una velocidad máxima de 6,0 m/s. El valor de potencia



máxima que puede ser suministrada al motor es de 1 kW, a través de la unidad de potencia CM CAMTEC HPV1000, que transforma la corriente alterna de la red en corriente continua [5].



Ilustración 6: Zona de generación del canal de referencia

La zona de propagación comprende 2,11 m de la longitud total del canal. En esta zona se colocan los medidores del nivel del agua, que en este canal son transmisores de ultrasonidos.

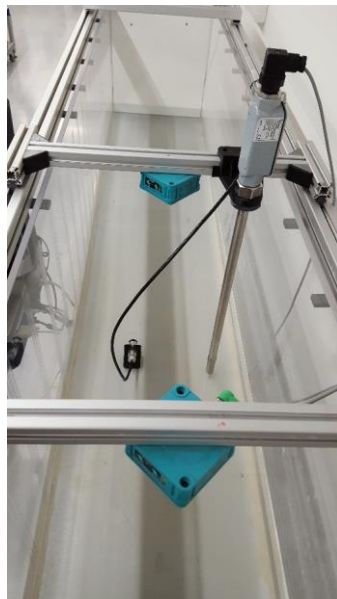
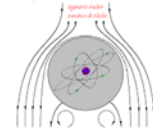


Ilustración 7: Zona de propagación del canal de referencia

Los medidores están sujetos a unos perfiles que se pueden mover a lo largo del canal y, en función del ensayo que se esté realizando se pueden acercar o alejar entre ellos, según convenga. Los medidores deben estar situados a una distancia de la zona de generación tal que se asegure la medición de la ola completamente desarrollada.

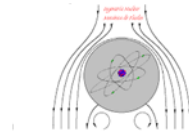


En bibliografía se indica que esta distancia debe comprender por lo menos una longitud de onda correspondiente a la ola objeto de estudio [5]. Asimismo, deben situarse a una distancia suficiente de la zona de extinción para evitar la influencia de la reflexión de las olas que no se disipan de forma completa[6]. Por tanto, la longitud del canal es uno de los aspectos más significativos, ya que la longitud de onda de las olas generadas vendrá completamente condicionada por la longitud útil de la zona de propagación.

En cuanto a la zona de extinción - también conocida como playa - está formada por una superficie lisa de un material plástico rígido, que reposa sobre en el fondo del canal en el extremo opuesto a la zona de generación. Esta parte del canal debe estar perfectamente diseñada ya que es la responsable de disipar toda la energía que contiene la ola, motivo por el cual también es conocida como la zona de absorción. Esta zona ocupa una longitud de 0,55 m. La playa absorbidora se ha diseñado con el objetivo de que sea móvil y, por tanto, puede moverse por una guía vertical situada en la pared del fondo del canal. De esta manera, se pueden conseguir distintas inclinaciones de la misma. La capacidad de poder modificar el ángulo de la playa es de vital importancia ya que permite trabajar con la misma playa cuando se generan olas de distintas alturas o incluso también trabajando a distintos calados en el canal.



Ilustración 8: Zona de extinción del canal de referencia



4 Beneficios

Los beneficios que aporta este proyecto se pueden dividir fundamentalmente en cuatro: sociales, de investigación, de formación y económicos.

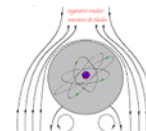
Sociales: La instalación del canal de olas contribuye a fomentar investigaciones relacionadas con la energía undimotriz a escala de laboratorio, una fuente de energía limpia, renovable e inagotable y con un impacto ambiental despreciable en comparación con las energías procedentes de recursos fósiles. Teniendo en cuenta el potencial de la energía undimotriz en la costa vasca, todos los avances que se lleven a cabo en el desarrollo de este tipo de energía, ayudarán al País Vasco a depender en menor medida de recursos como el petróleo o el gas natural, es decir, a ser en mayor medida autosuficiente energéticamente, y cómo no, a coadyuvar a una más que necesaria transición energética. La mejora de esta tecnología, sin duda ayudaría a que la ciudadanía se conciencie de que la energía renovable, además de ser medioambientalmente más beneficiosa, podría ser también beneficiosa a nivel económico.

El auge de las energías marinas en el País Vasco, viene apoyado también porque la industria vasca cuenta con un potente tejido empresarial que engloba todas las actividades referentes a este tipo de energías con la participación de más de 350 empresas [2]. A medida que va aumentando el desarrollo tecnológico en relación a la explotación de este tipo de energías, se requiere más personal especializado y, por tanto, se genera más puestos de trabajo dentro de este ámbito.

En concreto, este canal de olas va a suponer una herramienta para las empresas que quieran testar sus modelos antes de pasar a la fase de prototipado. De este modo, podrán mejorar sus modelos, reduciendo así el coste y la duración de sus proyectos.

Investigación: Hasta la instalación de este canal, se estuvo trabajando en las instalaciones de la universidad con un canal de 3 metros de longitud. El nuevo canal va a permitir realizar ensayos más próximos a la realidad, minimizando pérdidas por rozamiento con las paredes, permitiendo el correcto desarrollo del oleaje producido a lo largo del canal y contando con un actuador que permita la simulación de un mayor rango de olas diferentes. Además de esto, va a permitir la investigación de otros efectos fundamentales en el estudio de la energía de las olas, como es la reflexión de las mismas, la interacción con estructuras flotantes, dispositivos de extracción de energía, etc. Por tanto, va a suponer una herramienta que permita seguir realizando investigaciones relevantes en este campo.

A día de hoy, en el País Vasco no hay instalado ningún canal de estas características, y, por tanto, no es posible llevar a cabo estudios con modelos. Este tipo de infraestructura resulta conveniente para estudiarlos antes de hacerlo en canales de mayor tamaño o en el mar. Por tanto, el diseño e instalación de este canal responde a la necesidad de contar con medios para el estudio de dispositivos de generación de energía en las primeras fases de desarrollo.



Formación: La instalación de este canal va a permitir el desarrollo de nuevos proyectos como Trabajos Fin de Grado o Máster de cualquiera de las titulaciones impartidas en la Escuela de Ingeniería de Bilbao (EIB). Además, se puede convertir en una herramienta para futuras prácticas dentro de los distintos Grados y Másteres ofertados en la EIB.

Contar con un canal de estas características en las instalaciones de la EIB puede ser beneficioso para poder actualizar el programa de alguna asignatura conceptos teóricos sobre el oleaje, métodos de aprovechamiento, desarrollo de equipos de generación de olas... y poder realizar también prácticas en él. Es la manera idónea de introducir a los/las alumnos/as en este sector que ahora está en desarrollo y tiene un futuro prometedor.

Económicos: Según Cotec, fundación para la innovación, "una compañía puede incrementar el valor añadido de su oferta, ganar en competitividad y reducir costes"[7], esto se puede trasladar a la universidad. Con este proyecto la UPV/EHU ganará en competitividad en un sector en auge, las energías renovables *offshore* y añadirá valor añadido a su oferta. Además, la inversión en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) hace a los países más ricos, y son éstos precisamente los que más invierten en investigación. Cualquier modelo económico que esté ligado al I+D+i va a ser siempre más resistente a la hora de sufrir crisis económicas. La relación entre nivel de gasto en I+D+i y riqueza de los países puede verse en el siguiente gráfico.

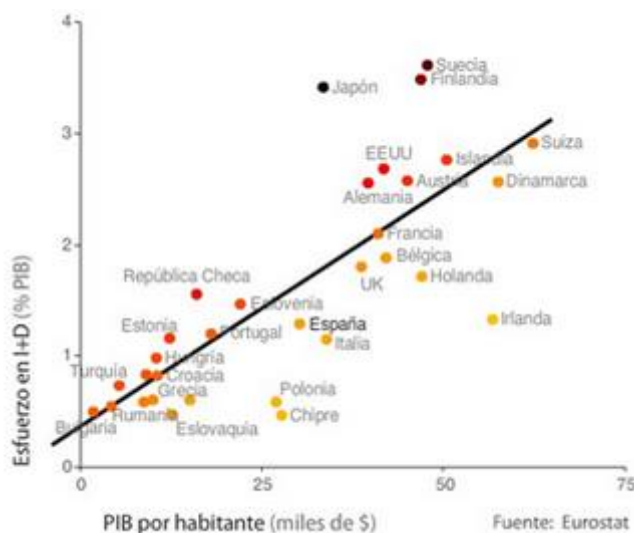


Ilustración 9: Nivel de gasto I+D y riqueza por países [7]

5 Estado del arte

5.1 Teoría de olas

En este apartado se van a explicar las diferentes teorías y conceptos que hay que tener en cuenta y con los que hay que trabajar al enfrentarse al estudio teórico del oleaje [8]. Este proyecto se centra en el estudio del oleaje regular, por lo que las teorías que se explican también son referentes a este tipo de oleaje. Existen hasta siete teorías que estudian este tipo de oleaje, la teoría lineal, las teorías de Stokes del segundo hasta el quinto orden, la teoría interna de olas solitaria y la teoría cnoidal [9]. Es complicado determinar cuál resulta más conveniente utilizar en las diferentes situaciones que se presentan. Existe una herramienta que predice cuál es la teoría que hay que usar en función de parámetros de ola, periodo y altura significativa y profundidad de la zona en que se da el oleaje. Esta herramienta es el diagrama de Le Méhauté desarrollada por el ingeniero del mismo nombre, que establece unos límites para las diferentes teorías de olas [10].

5.1.1 Teoría Lineal de olas

También se le conoce como teoría de Airy o teoría de Stokes de primer orden. Es la teoría más simple para el estudio del oleaje y es válida cuando se cumplen algunas simplificaciones para analizar el comportamiento de una ola en un fluido. Hay que considerar que el estudio de las olas reales es muy complejo, por lo que resulta necesaria la aplicación de estas simplificaciones. A continuación, se enumeran las hipótesis que se manejan con esta teoría [11].

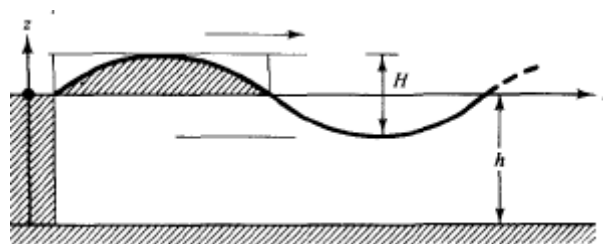
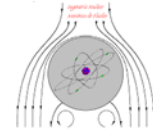


Ilustración 10: Estructura de un problema con condiciones de contorno en 2 dimensiones [12]

- La ola es regular, no evoluciona con el tiempo ni entra en contacto con ningún obstáculo que le haga cambiar.
- La ola es bidimensional.
- El fluido es incompresible; la densidad será constante a lo largo del tiempo.



- d) El fluido es no viscoso, las no linealidades relativas a la viscosidad no se contemplan.
- e) El fluido es irrotacional. Junto con la simplificación anterior, se traducen en que el fluido es ideal por lo que existirá un potencial de velocidad. Se cumplirá para el fluido la ecuación de continuidad.
- f) Los efectos de la tensión superficial y de turbulencia se consideran despreciables, no aparecen las no linealidades que éstos introducen.
- g) El fondo es profundo e impermeable. Introduce condiciones de contorno en el problema a resolver.
- h) No hay pérdida de energía independientemente de las distancias en que se propague.
- i) La altura de la ola es pequeña en comparación con su longitud y la distancia al fondo.

Las ecuaciones de la Teoría Lineal son la ecuación de conservación de masa y la de conservación del momento.

- Conservación de masa en la componente horizontal: $u(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial x}$
- Conservación de masa en la componente vertical: $w(x, z, t) = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$
- Conservación del momento: $-\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P}{\rho_w} + g \cdot z = 0$

donde P es la presión, ρ_w es la densidad del agua y g es la gravedad.

La ecuación diferencial de segundo orden que define el movimiento de las olas es la ecuación de Laplace.

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

Para poder integrar la ecuación, se definen a continuación las condiciones de contorno referentes a la superficie libre y al fondo.

- En la superficie libre, $z=0$, la presión es la atmosférica, $P=0$.

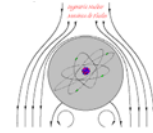
$$-\frac{\partial \phi}{\partial t} + g \cdot \eta = 0$$

- En la superficie libre se considera que la velocidad es totalmente vertical.

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

Como la amplitud es pequeña en comparación con longitud de ola se puede considerar:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z}$$



- En el fondo, $z=-h$, la velocidad es completamente horizontal, $w=0$.

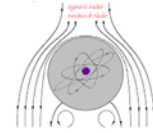
$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$$

Se exponen a continuación los resultados de la Teoría de Airy, en función de la profundidad relativa.

Tabla 1: Ecuaciones de la teoría de Airy [13]

Profundidad relativa	Aguas someras $\frac{1}{20} \geq \frac{h}{\lambda}$	Aguas intermedias $\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	Aguas profundas $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$
Perfil, η	$\frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	$\frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	$\frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$
Velocidad, C	$\sqrt{g \cdot h}$	$\frac{g \cdot T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\frac{g \cdot T}{2\pi} = C_0$
Longitud de onda, λ	$T \cdot \sqrt{g \cdot h}$	$\frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\frac{g \cdot T^2}{2\pi} = \lambda_0$
Velocidad de grupo, C_g	$\sqrt{g \cdot h}$	$\frac{C}{2} \cdot \left[1 + \frac{4\pi h}{\lambda} \frac{1}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right]$	$\frac{g \cdot T}{4\pi} = \frac{C}{2}$
Velocidad horizontal del agua, u	$\frac{H}{2} \cdot \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \cos \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(h+z)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \cos \theta$	$\frac{\pi \cdot H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)} \cos \theta$
Velocidad vertical del agua, w	$\frac{\pi \cdot H}{T} \left[1 + \frac{z}{h}\right] \sin \theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(h+z)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \sin \theta$	$\frac{\pi \cdot H}{T} e^{\left(\frac{2\pi z}{\lambda}\right)} \sin \theta$

Estas ecuaciones conducen a obtener la cantidad de energía que transporta cada ola, y en función de ésta, la potencia que la ola transfiere al agua. Estos parámetros resultan sin duda importantes a la hora de estudiar el potencial del oleaje.



La ecuación de la energía, como suma de la potencial y la cinética:

$$E = E_c + E_p = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{16} + \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{16} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8}$$

Para calcular la potencia basta con multiplicar la energía por la velocidad de grupo, C_g , que en el caso de oleaje regular es igual a la velocidad de propagación de una ola solitaria.

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2}{8} \cdot C_g$$

5.1.2 Teoría de Stokes

La Teoría de Stokes parte de la Teoría Lineal y por ese motivo, como se ha dicho anteriormente la Teoría de Airy también es conocida Teoría de Stokes de primer orden. Sin embargo, a diferencia de la Teoría de Airy, la de Stokes describe el oleaje de forma no lineal. En el caso de la Teoría de Stokes de segundo orden, se añade un término que aproxima la solución al perfil de la ola. También se desarrolla para órdenes superiores que acercan aún más a la realidad los resultados, pero añaden dificultades al estudio.

En la Teoría de Stokes de segundo orden, el perfil de onda definido tiene crestas más altas y senos más planos. Las olas se asemejan más a las que se dan en zonas de aguas intermedias [14].

El desarrollo de esta teoría conduce a las ecuaciones mostradas en la siguiente tabla:

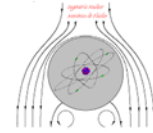


Tabla 2: Ecuaciones de la teoría de Stokes de segundo orden

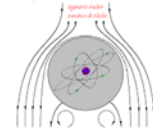
Profundidad relativa	Aguas intermedias $\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$
Perfil, η	$\frac{H}{2} \cos(kx - wt) + \frac{\pi \cdot H^2}{2 \cdot L} \frac{\cosh(kh)[2 + \cosh(2kh)]}{(\sinh(kh))^3} \cos(kx - wt)$
Velocidad, C	$\frac{g \cdot T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$
Longitud de onda, λ	$\frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$
Velocidad de grupo, C_g	$\frac{C}{2} \cdot \left[1 + \frac{\frac{4\pi h}{\lambda}}{\sinh\left(\frac{4\pi h}{\lambda}\right)}\right]$
Velocidad horizontal del agua, u	$\frac{\pi H}{T} \frac{gT}{\lambda} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - wt) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda}\right) c \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - wt)$
Velocidad vertical del agua, w	$\frac{\pi H}{T} \frac{gT}{\lambda} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - wt) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{\lambda}\right) c \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - wt)$

5.1.3 Clasificación de las olas en función de la profundidad relativa

En este apartado se detallará la clasificación de las olas en función de la profundidad relativa: relación entre el calado o profundidad, h , y la longitud de onda, λ , de la ola en cuestión. Esta clasificación da pie a poder discernir tres regiones perfectamente diferenciadas: olas de aguas someras, intermedias y profundas. A continuación, se detallan las características de cada una de estas tres regiones:

- **Aguas profundas:** $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$

El oleaje que acontece en aguas profundas viene caracterizado porque la trayectoria que siguen las partículas de agua describen una órbita de forma casi circular. La relación entre el calado y la longitud de onda es tal, que el fondo marino o el del canal no afecta



a la forma de la trayectoria que siguen las partículas. Según va aumentando la profundidad, el tamaño de la órbita decrece exponencialmente.

- **Aguas intermedias:** $\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$

En el caso del oleaje de aguas intermedias, el fondo marino comienza a tener influencia sobre la forma de la órbita que siguen las partículas de agua. El movimiento que siguen las partículas es elíptico y el tamaño de las órbitas decrece, pero de forma más suave que en aguas profundas.

- **Aguas someras:** $\frac{1}{20} \geq \frac{h}{\lambda}$

Las olas de aguas someras o poco profundas se caracterizan por tener un perfil totalmente deformado por la proximidad al fondo marino. El movimiento de las partículas se convierte en una oscilación puramente longitudinal.

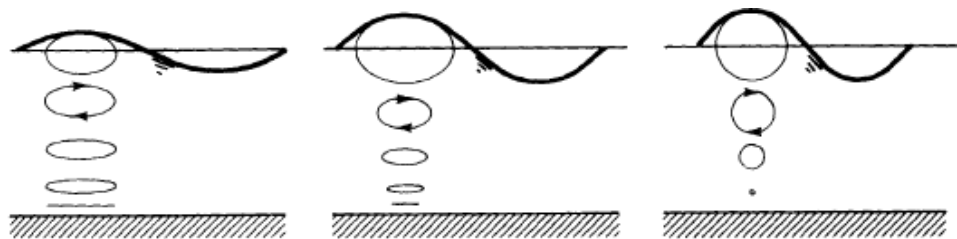


Ilustración 11: Movimiento de las partículas de agua en función de la profundidad relativa [13]

5.1.4 Diagrama Le Méhauté

El diagrama de Le Méhauté es una herramienta que ayuda a determinar cuál de las teorías de olas resulta más adecuada para el estudio analítico de cada tipo de oleaje. Delimita las zonas de validez de cada una de las teorías, basándose en el periodo de ola, profundidad y altura significativa de ola.

La forma de trabajar con este diagrama consiste en, una vez que se conocen las características de la zona de la que se quiere analizar, profundidad, periodo y altura de ola, se calculan las relaciones de los ejes y se sitúan los puntos sobre el diagrama. Directamente queda indicada cuál de todas las teorías de olas conviene utilizar para los cálculos teóricos.

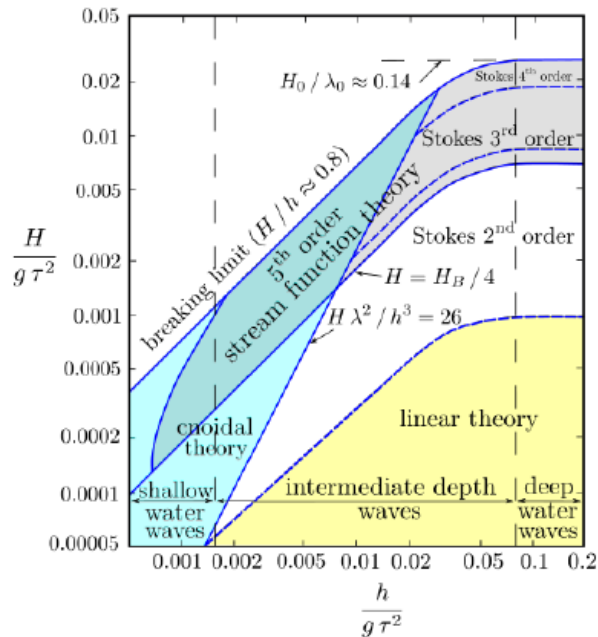
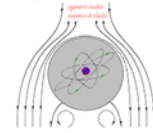


Ilustración 12: Diagrama de Le Méhauté [13]

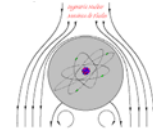
Como puede verse en el diagrama, representado en la Ilustración 12, para el oleaje en zonas pocas profundas con una altura significativa de la ola pequeña, resulta más conveniente utilizar la teoría Cnoidal. Sin embargo, si se aproxima a la zona de rotura de ola, cuando se cumple que la relación entre altura de ola significativa y profundidad es aproximadamente igual a 0,8, resulta más conveniente utilizar la teoría de Stokes de 5º orden. En zonas intermedias de oleaje, se observa que en función del valor de los parámetros se deberá trabajar con la Teoría Lineal, la de Stokes de 2º orden o de órdenes superiores. Para zonas de profundidad relativa alta, también dependerá del valor de los parámetros cuál es la teoría más adecuada.

Dentro de este diagrama están representadas líneas de un factor adimensional, el número de Ursell (Ur). Este parámetro adimensional ayuda a definir el rango de aplicación de las teorías, diferenciando entre las distintas teorías de Stokes, lineal y Cnoidal.

El número de Ursell se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Ur = \frac{H \cdot \lambda^2}{h^3}$$

Los valores límites que están establecidos, son que para un valor del número de Ursell mayor que 21,6 se aplicará la teoría de Stokes, y para valores menores se deberá utilizar alguna de las otras teorías expuestas.



5.2 Instalaciones para la simulación del oleaje

En los laboratorios se utilizan principalmente dos tipos de estructuras para la simulación de las condiciones del mar. Estas se diferencian principalmente por generar olas en 2 o 3 dimensiones. En aquellos tanques de olas más estrechos, con una de las dimensiones mucho mayor que las otras dos, se reproducen olas en 2 dimensiones y se conocen habitualmente como canales. En este tipo de instalaciones se llevan a cabo desde hace muchas décadas ensayos en ingeniería marítima y costera ya que se utilizan para analizar el comportamiento de barcos, comprobar la resistencia de estructuras - como diques de abrigo de puertos - y otras muchas aplicaciones en condiciones concretas de oleaje. En los últimos años, con el auge en la investigación sobre las energías marinas *offshore*, los canales y los tanques se están utilizando principalmente para realizar ensayos con prototipos de captadores undimotrices y estructuras flotantes de la energía eólica *offshore*.

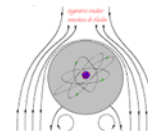
La longitud de los canales es mucho mayor que su anchura y altura. En estas estructuras se suele utilizar un único generador de olas. A la hora de estudiar el oleaje en un canal hay que tener en cuenta que, al tratarse de una estructura que limita la anchura de las olas, esto introduce condiciones de contorno que no se contemplan en el estudio de un tanque de 3 dimensiones.



Ilustración 13: Canal de olas instalado y construido por *Edinburgh Designs* [15]

El canal de la Ilustración 13 fue diseñado y construido por la empresa *Edinburgh Designs* para la *Stony Brook University*, en el estado de Nueva York. Las dimensiones son de 25 metros de longitud, 1,5 metros de ancho y una profundidad que puede alcanzar 1 metro.

Los tanques de olas de 3 dimensiones se caracterizan por ser estructuras de mayor tamaño que los canales, sobre todo en lo que a la anchura hace referencia. En los de 3 dimensiones se utiliza



más de un generador de olas, lo que permite que puedan actuar de forma independiente. Esto permite realizar ensayos con condiciones de oleaje más realistas. En la Ilustración 14 se puede observar el tanque de olas de la *Cantabria Coastal and Ocean Basin* (CCOB), instalado en el Instituto Hidráulico Ambiental de Cantabria (IH Cantabria).

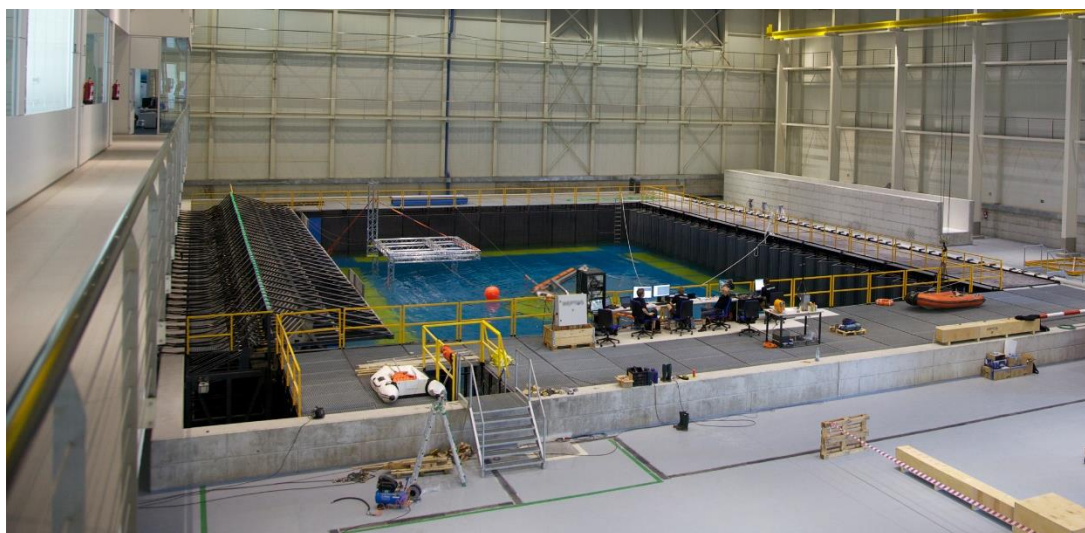


Ilustración 14: Tanque de olas instalado en el IH de Cantabria [16]

El IH Cantabria es un referente en el estado por disponer de unas instalaciones perfectamente adecuadas para reproducción de oleaje y la prueba de diferentes dispositivos. Este tanque tiene 44 metros de ancho, 30 metros de largo y su profundidad es variable, pudiendo llegar a los 3,4 metros. Cuenta con 64 palas que pueden operar de forma independiente, permitiendo la generación de oleaje multidireccional. Además, cuenta con 12 agitadores de corriente y un dispositivo portátil de generación de viento que puede alcanzar los 20 m/s. Así, en un tanque de estas características se pueden aplicar todas las cargas que sufriría un dispositivo instalado en mar abierto y permite obtener unos resultados más realistas [17].

La instalación de un tanque de 3 dimensiones frente a un canal tiene dos desventajas fundamentales: el espacio y la inversión necesarios. Estos tanques ocupan una superficie muchas veces mayor a la de un canal y en cuanto al aspecto económico, es indudable que al disponer de un mayor número de elementos y requerir una obra de mayor envergadura, la inversión necesaria es mucho mayor. El tanque instalado en el IH de Cantabria, de la imagen superior supuso una inversión aproximada de 27 millones de euros [16].

5.3 Partes de un canal de olas

En este apartado se describen las partes en las que se divide un canal, así como los elementos principales que las componen, para posteriormente explicar su funcionamiento.

La estructura de los canales de olas generalmente se divide en tres zonas: la de generación de olas, la de propagación y la de extinción.

Zona de generación: Se encuentra en uno de los extremos del canal y, como su propio nombre indica, es donde se produce la formación del oleaje. Los elementos que componen esta parte son el generador, el sistema hidráulico, el actuador hidráulico y el sistema de control electrónico. El generador, habitualmente con forma de pala, es el componente más importante del canal, motivo por el cual se han desarrollado numerosos estudios que han resultado en distintas configuraciones de generación de oleaje. A lo largo de este proyecto se llevará a cabo un análisis de las diferentes geometrías que se pueden utilizar.

El proceso para la generación del oleaje comienza introduciendo en el sistema informático que controla el movimiento del sistema de control parámetros como la carrera de la pala, la velocidad y la aceleración-deceleración con la que se describe el movimiento de la misma. El periodo con el que se mueve el sistema de generación se corresponderá con el periodo de la ola generada.

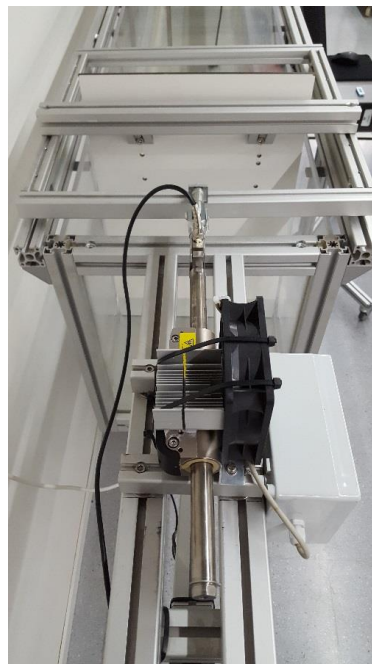
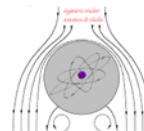


Ilustración 15: Vista superior de la zona de generación del canal de referencia



Zona de propagación: Esta sección del canal es la más larga. Este hecho se debe a que el oleaje que se genera en la sección de generación, debe ser debidamente desarrollado, para lo cual, se requiere espacio. Se estima que, para obtener una ola completamente desarrollada, es necesario disponer de 2 veces la longitud de onda de la ola generada.[5] En esta zona se puede observar cómo es la evolución de la ola, su perfil y cómo es su desarrollo a lo largo del canal. Es la parte del canal donde se suelen ubicar los medidores que van conectados al ordenador. De hecho, no conviene colocar los dispositivos de medida en la zona de generación ya que en zonas próximas de la pala la ola no se ha formado del todo y además está influenciada por el efecto de la aceleración de la propia pala. Por tanto, esta es la zona de medición por excelencia por el hecho de que el oleaje producido deja de tener la influencia del movimiento de la pala. A través de los medidores ubicados en esta sección del canal se obtienen datos sobre la elevación de la superficie libre, que permitirán también obtener información que permita caracterizar la ola generada.

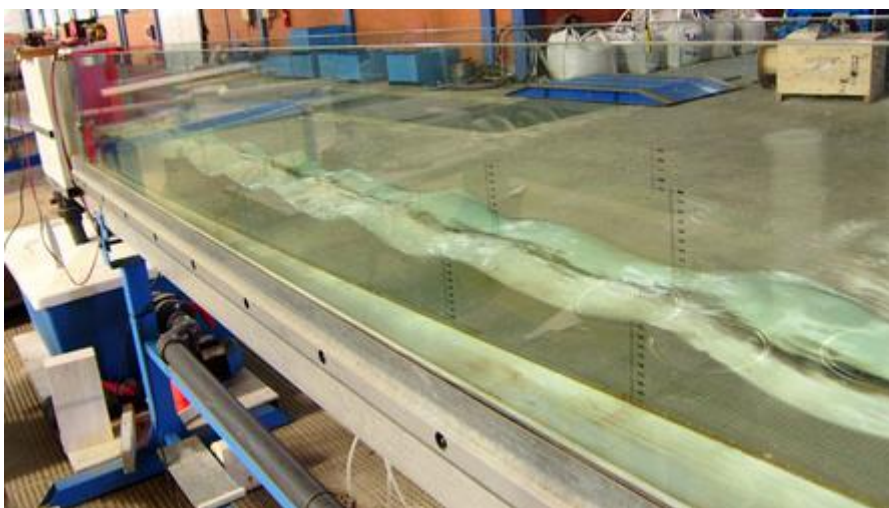
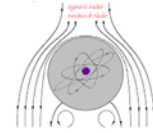


Ilustración 16: Zona de propagación de un canal de olas [18]

Zona de extinción: Se corresponde con el extremo del canal contrario a la generación. Fundamentalmente existen dos tipos de sistemas de absorción: activos y pasivos. Los sistemas activos funcionan con algoritmos de control que hacen que el movimiento del generador se vaya modificando en función de la altura de la ola que le llega. Se superpone un movimiento al propio de la generación. Los sistemas pasivos consisten en unas estructuras que actúan a modo de playa, de hecho, suelen recibir este nombre, cuando se trata de lechos porosos compuestos por rocas o piedras de determinado diámetro.

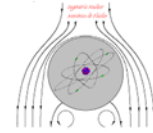


Si no se situara ningún elemento absorbente, las olas simplemente rebotarían contra la pared del canal, reflejándose prácticamente por completo, y entorpeciendo el desarrollo de las olas incidentes.



Ilustración 17: Sistema pasivo de extinción [19]

Las configuraciones que tienen los elementos de absorción pasiva son diversos, y su diseño dependerá en gran medida del estudio que se desee realizar. Por lo general, en caso de desear llevar a cabo estudios relacionados con la obtención de energía de las olas, lo habitual es tener por objetivo disipar la mayor parte de la energía de las olas que ya han transcurrido por el dispositivo en cuestión, para que no reboten. Por tanto, los dispositivos de absorción consisten, por lo general, en una rampa apoyada sobre el fondo del canal, que actúa a modo de playa. En su superficie se le pueden colocar piedras u otros elementos que hagan de obstáculo a las olas. Existen algunos estudios realizados sobre las distintas configuraciones de playas, en cuanto a la altura de las mismas, su dirección respecto al frente de ola, los elementos que en ella se incluyen. Al chocar contra estos obstáculos se produce la absorción de la mayor parte de la energía de la ola, sin embargo, habrá una pequeña parte de esa energía que no se disipe, siendo reflejada y viajando en sentido contrario a las olas que se generan a través del generador. En el caso de este proyecto, no se entra a analizar el efecto de la reflexión sobre las olas incidentes. Sin embargo, la instalación del canal podría dar lugar a ensayos con distintas configuraciones de playas para analizar la reflexión que se ocasiona[20].



6 Análisis de alternativas

En este apartado se van analizar cada una de las partes del canal, así como los elementos que las componen. Se realizará un análisis de las distintas opciones que existen para, en el siguiente apartado desarrollar el diseño completo del canal con las soluciones adoptadas en cada caso.

6.1 Zona de generación

En la zona de generación los elementos de mayor importancia son el generador de olas y el actuador. Inicialmente se analizará la geometría y las características de los tipos de generadores que son comúnmente utilizados en los canales de olas. El objetivo de este análisis es exponer las características principales de las alternativas en cuestión, para poder determinar cuál es el tipo de generador idóneo en función de las condiciones de oleaje que se desean conseguir.

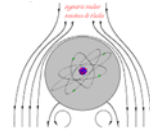
En los canales de olas se utilizan habitualmente dos tipos de generadores que se caracterizan por el movimiento que desarrolla cada uno de ellos; los de tipo pistón y tipo flap. En cualquier caso, ambos sistemas se basan en disponer de una superficie que es movida por un actuador. Si bien el nombre de cada uno de ellos hace referencia al movimiento que realizan, las geometrías dentro de cada tipo pueden variar. En este caso se van a analizar los sistemas de un grado de libertad por ser éstos los más sencillos. Los grados de libertad hacen referencia a las variables que son necesarias definir para determinar la posición de un elemento, cada una de las variables está asociada a un tipo movimiento. En el espacio cualquier sólido posee seis grados de libertad, seis movimientos independientes entre sí, tres rotaciones y tres traslaciones. En el caso concreto de los generadores de olas de un grado de libertad, el movimiento inducido por el actuador consiste en bien, la traslación a lo largo del fondo del canal o la rotación alrededor del fondo.

6.1.1 Conceptos teóricos

Uno de los aspectos más importantes a la hora de analizar los generadores es el tipo de ola que son capaces de generar. Para el estudio de las características de los generadores de olas conviene basarse en la *Wavemaker Theory* [8]: la Teoría de Generación de Olas. Esta teoría establece que el volumen de agua desplazada por el generador es igual al volumen de la cresta de la ola generada. El tipo de ola que se genere dependerá del tipo de pala que se utilice, ya que la manera en que se desplace el generador determinará la ola generada[8].

Por tanto, en el caso del volumen de agua desplazada por el generador de tipo pistón, vendrá determinado por la carrera, S , recorrida por la pala, el calado, h y la anchura del canal, d :

$$V=S \cdot h \cdot d$$



El volumen de la cresta de la ola, en base a su desarrollo sinusoidal se puede calcular de la siguiente manera:

$$\int_0^{\lambda/2} \left(\frac{H}{2}\right) \cdot \sin kx \cdot d \cdot dx$$

Resolviendo la integral, igualando y operando con ambos términos:

$$\frac{H}{S} = k \cdot h$$

En el caso del generador de tipo flap, debido al tipo de movimiento que realiza este dispositivo, el volumen de agua desplazada es:

$$\frac{S \cdot h \cdot d}{2}$$

Resolviendo de la misma manera queda:

$$\frac{H}{S} = \frac{k \cdot h}{2}$$

Siendo S la carrera de la pala, h el calado del canal, H la altura de ola y k el número de ola.

Para la misma carrera de pala, la de tipo pistón desplaza dos veces la cantidad de agua que desplaza la de tipo flap, por lo que generará una ola casi dos veces más grande.

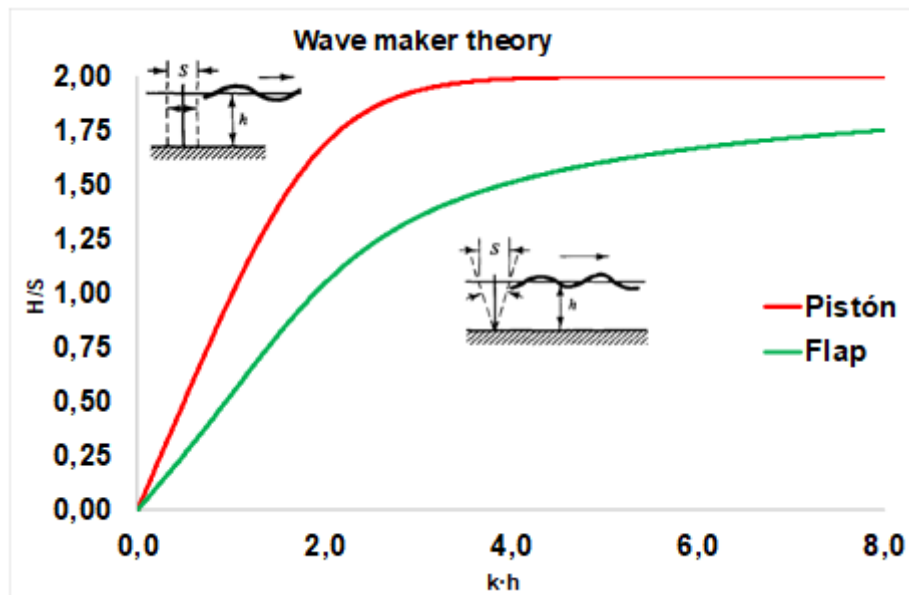
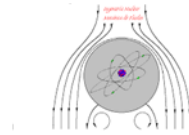


Gráfico 1: WaveMaker Theory para pistón y flap

En el Gráfico 1 están representadas en el eje Y la relación entre altura de ola y la carrera del generador, y en el eje X el producto del número de onda y el calado. Teniendo en cuenta que el



número de onda k es igual a $2\pi/\lambda$, lo que se representa en ese eje es la profundidad relativa (h/λ).

La profundidad relativa, junto con el tipo de generador influye de manera muy significativa en el movimiento de las partículas a la hora de generar la ola, tal y como se muestra a continuación:

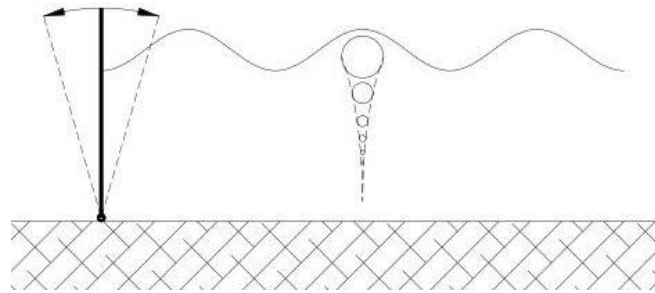


Ilustración 18: Movimiento del generador de tipo flap para olas de aguas profundas, $h/\lambda > 0,5$ [15]

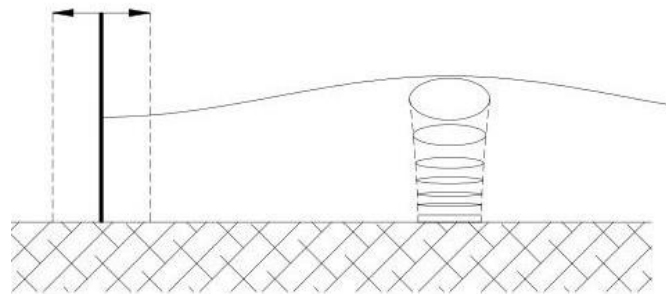
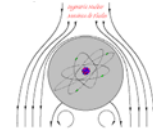


Ilustración 19: Movimiento del generador de tipo pistón creando olas de aguas poco profundas, $h/\lambda < 0,05$ [15]

Estas relaciones de generador y tipo de ola que se genera no son tan estrictas como a priori pueda parecer. En apartados posteriores de este trabajo se demostrará que también se podrán generar olas en aguas poco profundas con generadores de tipo flap, y en aguas profundas con generadores tipo pistón.



6.1.2 Generador de tipo pistón

El generador del tipo pistón consiste en una superficie plana vertical. La pala se coloca perpendicular al fondo del canal y su movimiento es longitudinal y en el sentido de la generación de la ola. El movimiento descrito puede verse representado en la Ilustración 21. Las palas de tipo pistón no tienen bisagras ni juntas de sellado en contacto con el agua, por lo que pueden ser utilizadas en aguas que contengan sedimentos [15].

Relacionándolo con lo explicado en el apartado de Estado del Arte, al producir oleaje de mayor longitud se consigue una profundidad relativa más pequeña, lo que hace que los generadores de tipo pistón sean más convenientes para el estudio de oleaje poco profundo o intermedio.

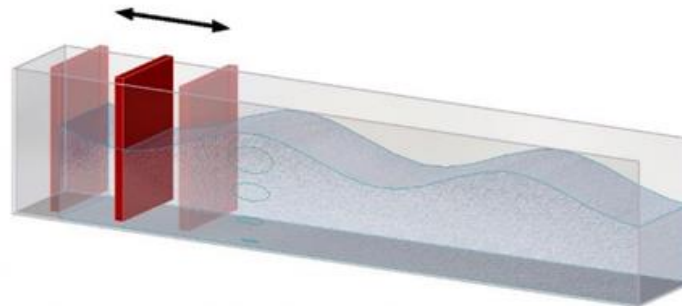


Ilustración 20: Funcionamiento generador tipo pistón [15]

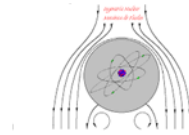
A través de la *WaveMaker Theory*, se llega a determinar la ecuación que rige el movimiento de un generador de tipo pistón. Esta ecuación consiste en la relación entre altura de ola y carrera del generador.

$$\frac{H}{S} = \frac{2 \cdot (\cosh 2 \cdot k_p \cdot h - 1)}{(\sinh 2 \cdot k_p \cdot h) + (2 \cdot k_p \cdot h)}$$

donde k_p corresponde al número de onda y h a la profundidad del canal.

Los actuadores que se encargan del movimiento de estos generadores están suspendidos de una estructura apoyada sobre las paredes del canal. También es posible realizar el diseño del generador de manera que no pase agua hacia el otro lado de la pala, a través de una membrana que limita el paso del agua de un lado al otro.

A continuación, se muestran los resultados correspondientes a los cálculos llevados a cabo para determinar la carrera necesaria para unas condiciones determinadas de altura de ola, longitud



de ola y calado del canal. Para ello, se ha establecido un rango de longitudes de ola, de 1,0 a 4,0 metros, alturas de ola de 0,10, 0,075, 0,05 y 0,025 metros y calados de entre 0,10 y 0,60 metros. Uno de los parámetros más importantes en relación a la propagación de la ola es su longitud, por tanto, para asegurar que la ola se desarrolla completamente se estima que la distancia en la que se propaga debe ser el doble que la longitud de ola [5]. Por lo que teniendo en cuenta que la zona de propagación del canal que se va a instalar mide aproximadamente 9,0 metros, una ola de longitud máxima correspondiente a 4,0 metros asegura el cumplimiento de dicho requisito.

Para cada valor de longitud de onda, se han analizado las parejas de valores correspondientes a calado y altura de ola. En los siguientes gráficos se han representado todos los casos estudiados, y se han eliminado aquellos que se han considerado que no son realizables. El generador de tipo pistón, no impone ningún tipo de restricción geométrica como ocurre con otros generadores, sin embargo, sí que existen algunas restricciones. Existen algunas situaciones que no se consideran posibles de realizar asegurando unos buenos resultados de simulación. Concretamente, se considera que con calados de 0,1 y 0,2 metros no se va a poder trabajar ya que resulta complicado simular con esos valores olas con las longitudes que se han calculado. Lógicamente, con un calado de 0,1 metros no se van a poder completar olas que tenga de altura también 0,1 metros. Es conveniente que el calado sea al menos el doble de la altura de ola que se prevé conseguir.

Así, en los siguientes gráficos se muestran los resultados obtenidos, dejando a un lado los casos que no se pueden llevar a cabo.

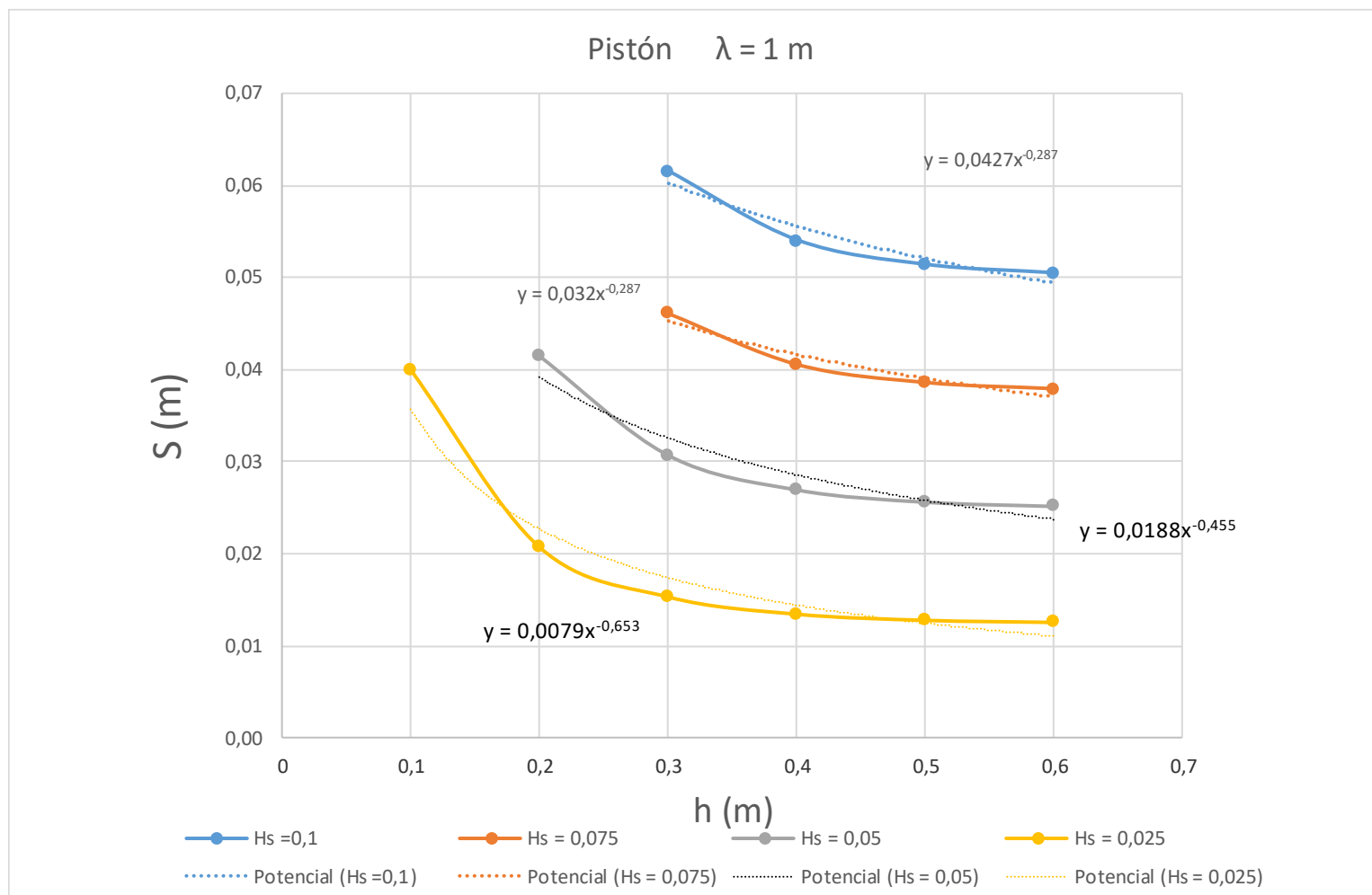
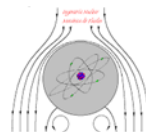


Gráfico 2: Carrera del pistón para longitud de onda de 1 metro

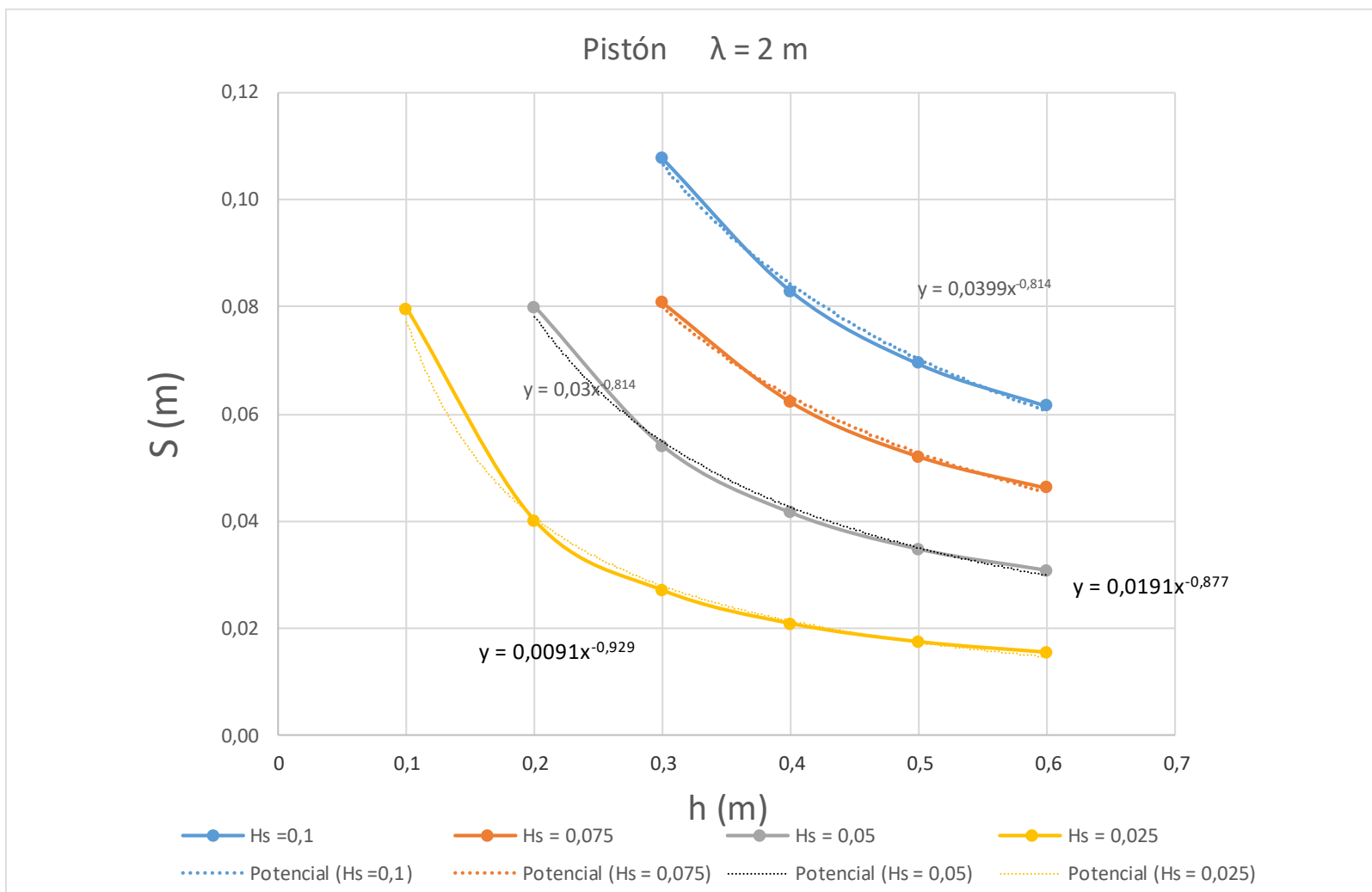
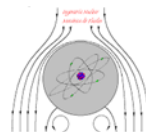


Gráfico 3: Carrera del pistón para longitud de onda de 2 metros

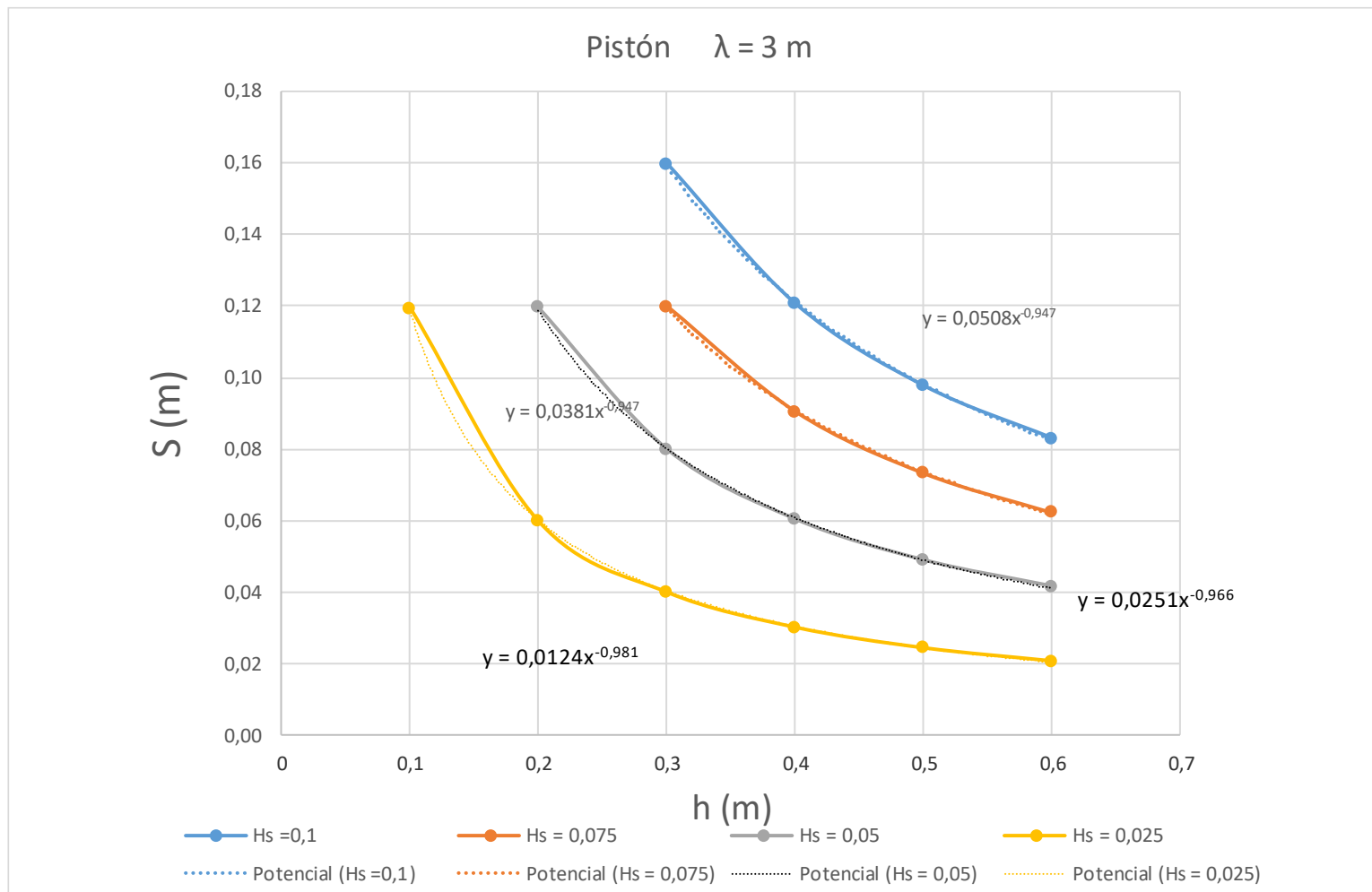
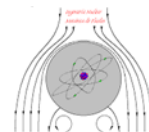


Gráfico 4: Carrera del pistón para longitud de onda de 3 metros

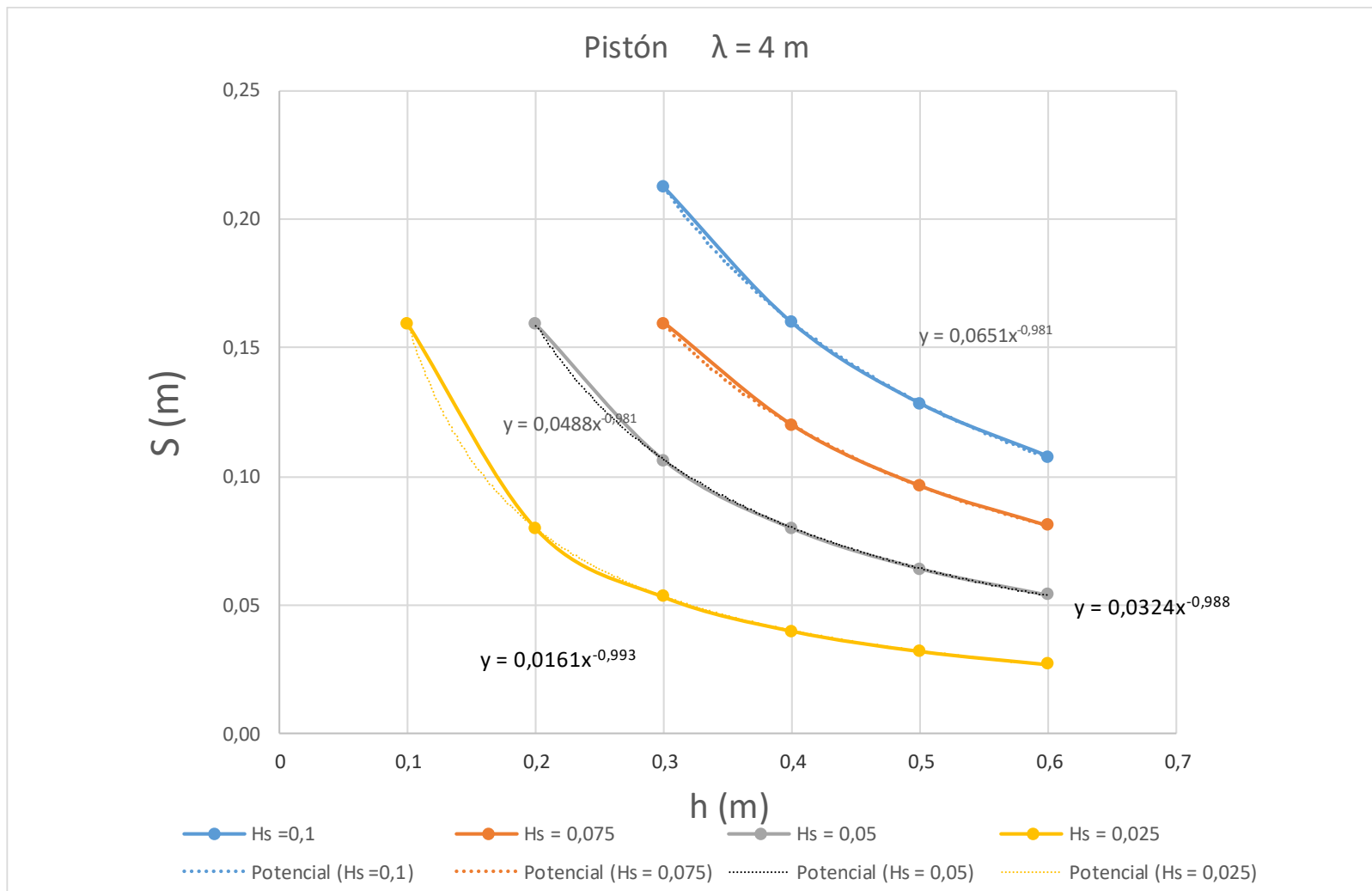
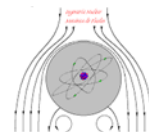
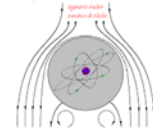


Gráfico 5: Carrera del pistón para longitud de onda de 4 metros



En las siguientes tablas se muestran los valores de carrera obtenidos para los casos que pueden llevarse a cabo en la realidad, marcando con un guion aquellos que se han descartado.

Tabla 3: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 1,0$ m

	h=0,1 m	h=0,2 m	h=0,3 m	h=0,4 m	h=0,5 m	h=0,6 m
H=0,10 m	---	---	0,061	0,054	0,051	0,050
H=0,075 m	---	---	0,046	0,041	0,039	0,038
H=0,50 m	---	0,041	0,031	0,027	0,026	0,025
H=0,025 m	0,040	0,021	0,015	0,014	0,013	0,013

Tabla 4: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 2,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	---	---	0,108	0,083	0,069	0,061
H=0,075 m	---	---	0,081	0,062	0,052	0,04
H=0,050 m	---	0,080	0,054	0,041	0,035	0,031
H=0,025 m	0,080	0,040	0,027	0,021	0,017	0,015

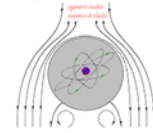


Tabla 5: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 3,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	_____	_____	0,160	0,121	0,098	0,083
H=0,075 m	_____	_____	0,120	0,090	0,073	0,062
H=0,050 m	_____	0,119	0,080	0,060	0,049	0,041
H=0,025 m	0,119	0,060	0,040	0,030	0,024	0,021

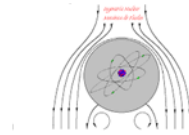
Tabla 6: Valores de carrera del pistón para $\lambda = 4,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	_____	_____	0,212	0,160	0,128	0,108
H=0,075 m	_____	_____	0,159	0,120	0,096	0,081
H=0,050 m	_____	0,159	0,106	0,080	0,064	0,054
H=0,025 m	0,159	0,080	0,053	0,040	0,032	0,027

Se han representado cuatro estados posibles para el generador de tipo pistón. Se comprueba que a mayor longitud de onda la carrera necesaria será mayor. El caso más extremo, mayor carrera, se da para una longitud de onda igual a 4,0 metros, con un calado del canal de 0,3 metros y para una altura de ola igual a 0,10 metros. A pesar de que se ha trabajado con esta profundidad, en general se evitará trabajar con una profundidad tan pequeña. En este caso la carrera necesaria sería de 0,212 metros.

6.1.3 Generador de tipo flap

El generador de tipo flap, al igual que el de tipo pistón, consiste en una superficie plana. En este caso, la sección inferior de la pala se encuentra en contacto con el fondo del canal, fijada a él por medio de unas bisagras. La parte superior está unida a un pistón que será nuevamente el empleado de mover el flap. En reposo su posición natural es perpendicular al fondo del canal,



pero en funcionamiento, el actuador hace desplazar únicamente la parte superior de la pala, variando así la inclinación de la misma.

En la ilustración 22 se observa el movimiento que sigue el generador y la trayectoria que siguen las partículas de agua en base a la ola generada. A diferencia del generador de tipo pistón, las olas que genera son de longitud de onda corta en comparación con la profundidad del canal, por lo que su uso resulta más apropiado cuando se desea generar oleaje en aguas profundas.

A pesar de que se recomienda el uso de un tipo de generador determinado para cada tipo de oleaje, profundo o somero, no hay que olvidar que estas recomendaciones se han obtenido a través de ensayos en canales de grandes dimensiones. En cada caso particular deberá estudiarse cuál de los tipos de generadores es capaz de reproducir las olas que se pretenden obtener.

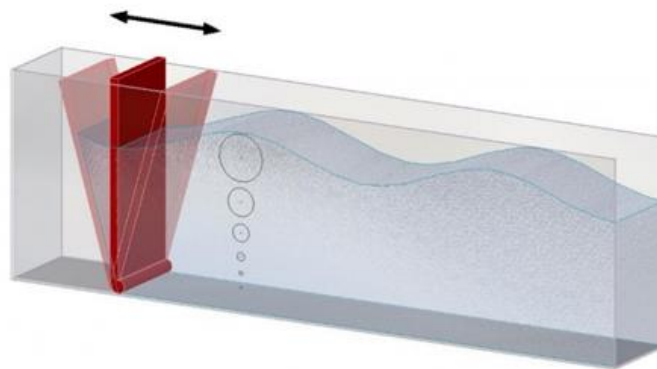


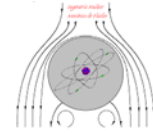
Ilustración 21: Funcionamiento generador tipo flap [15]

La ecuación que describe el movimiento de una pala de tipo flap se muestra a continuación, en la que se relaciona la altura de ola con la carrera del generador.

$$\frac{H}{S} = 4 \cdot \left(\frac{\sinh k_p \cdot h}{k_p \cdot h} \right) \cdot \left(\frac{(k_p \cdot h \cdot \sinh k_p \cdot h) - (\cosh k_p \cdot h + 1)}{(\sinh 2 \cdot k_p \cdot h) + (2 \cdot k_p \cdot h)} \right)$$

donde k_p corresponde al número de ola y h a la profundidad del canal.

Una de las características de diseño de los generadores de tipo flap es la inclinación que alcanza la pala, medida en grados, que dependerá de la carrera del actuador y del sistema de control que



se instale en el canal. Para un control simple es recomendable que la inclinación alcance como mínimo 12 grados hacia cada lado. En el caso de que se implemente un sistema de control más avanzado podría llegarse hasta los 18 grados [15]. Otro aspecto de diseño que hay que tener en consideración es la altura de la pala. Como referencia de diseño se estima conveniente que un 35% de la altura de la pala sobresalga del agua [15].

En cuanto a la carrera máxima que es capaz de tener este tipo de generador, hay que hablar de la existencia de un límite. En función de la profundidad que se tenga en el canal y de la inclinación de la pala se establece la carrera máxima que es capaz de proporcionar el generador. Un valor habitual de la inclinación de las palas de tipo flap es de 15°. Por tanto, se ha calculado para cada profundidad cuál es la carrera máxima permitida teniendo en cuenta que en total abarcará un ángulo de 30°.

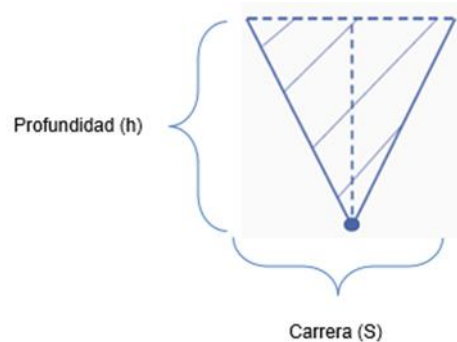
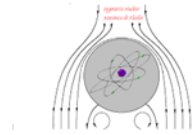


Ilustración 22: Características geométricas de un generador tipo flap

Tabla 7: Carrera máxima un generador tipo flap para las distintas profundidades a las que se podría trabajar en el canal objeto de diseño.

h [m]	S_{máx} [m]
0,10	0,0536
0,20	0,1072
0,30	0,1608
0,40	0,2144
0,50	0,2679
0,60	0,3215



De forma análoga a los cálculos realizados para un generador de tipo pistón, a continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada longitud de onda, con un valor máximo de ésta de 4 metros y trabajando con alturas de ola de 0,10, 0,075, 0,05 y 0,025 metros.

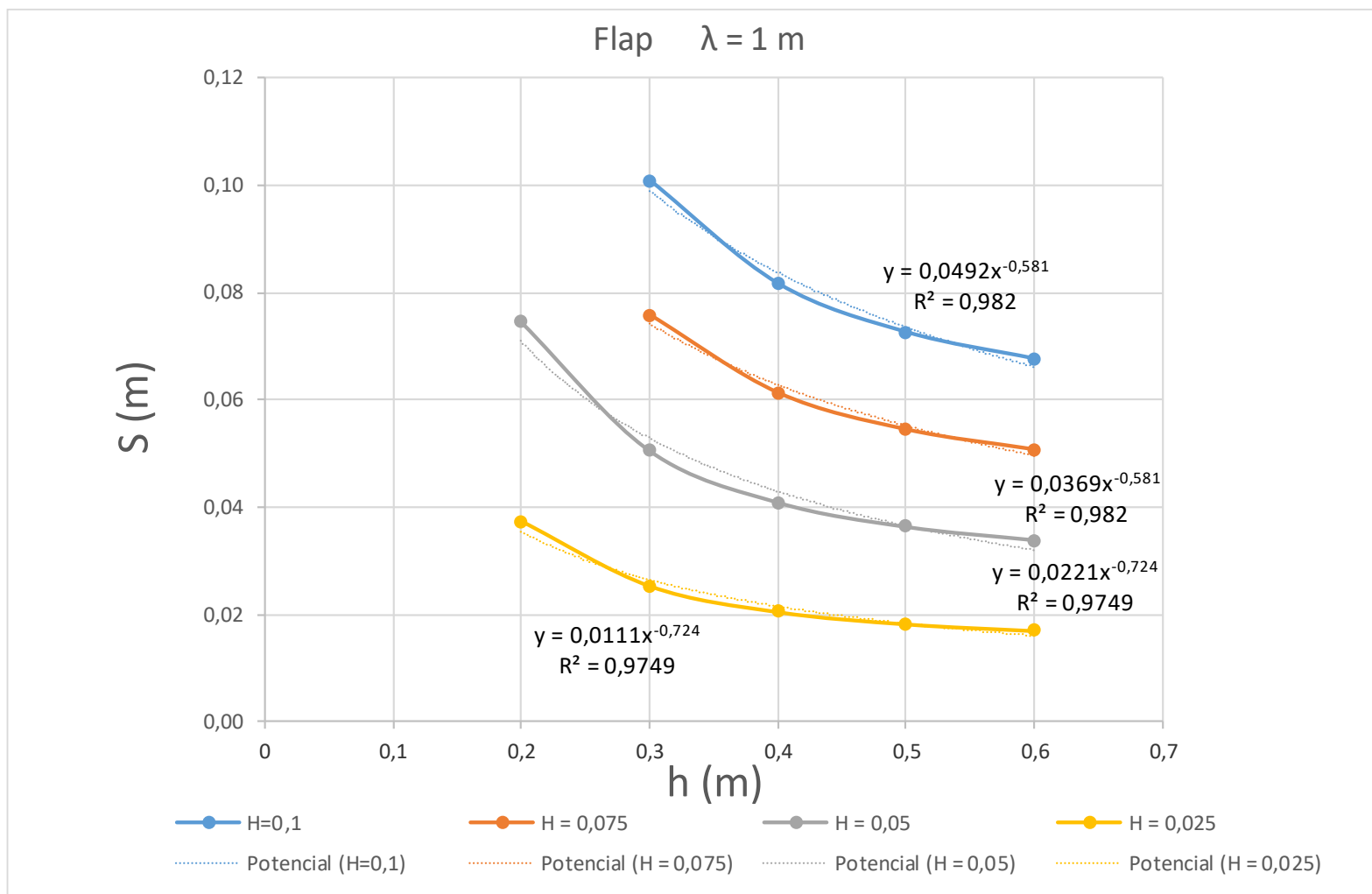
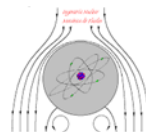


Gráfico 6: Carrera del flap para longitud de onda de 1,0 m

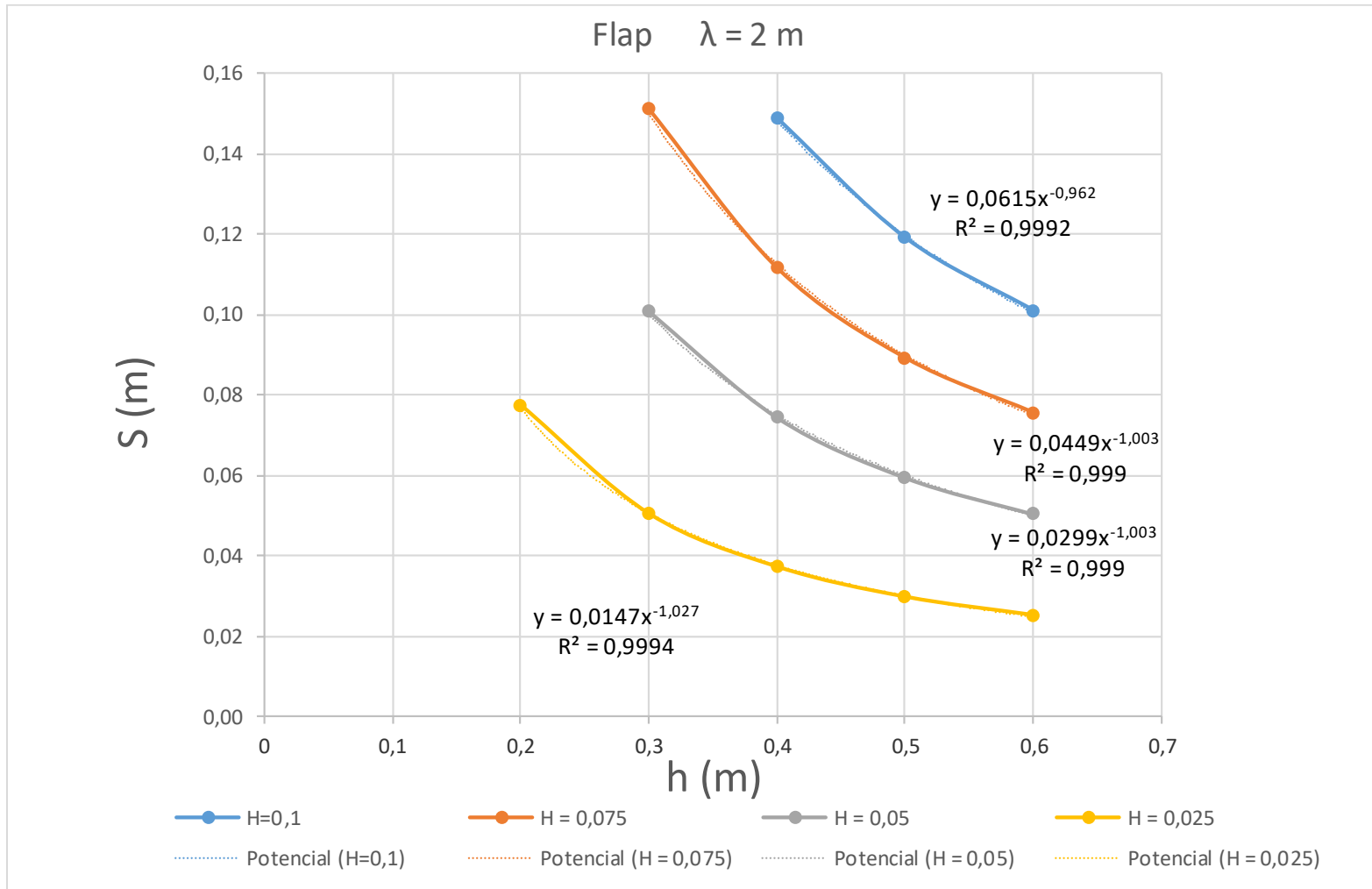
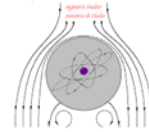


Gráfico 7: Carrera del flap para longitud de onda de 2,0 m

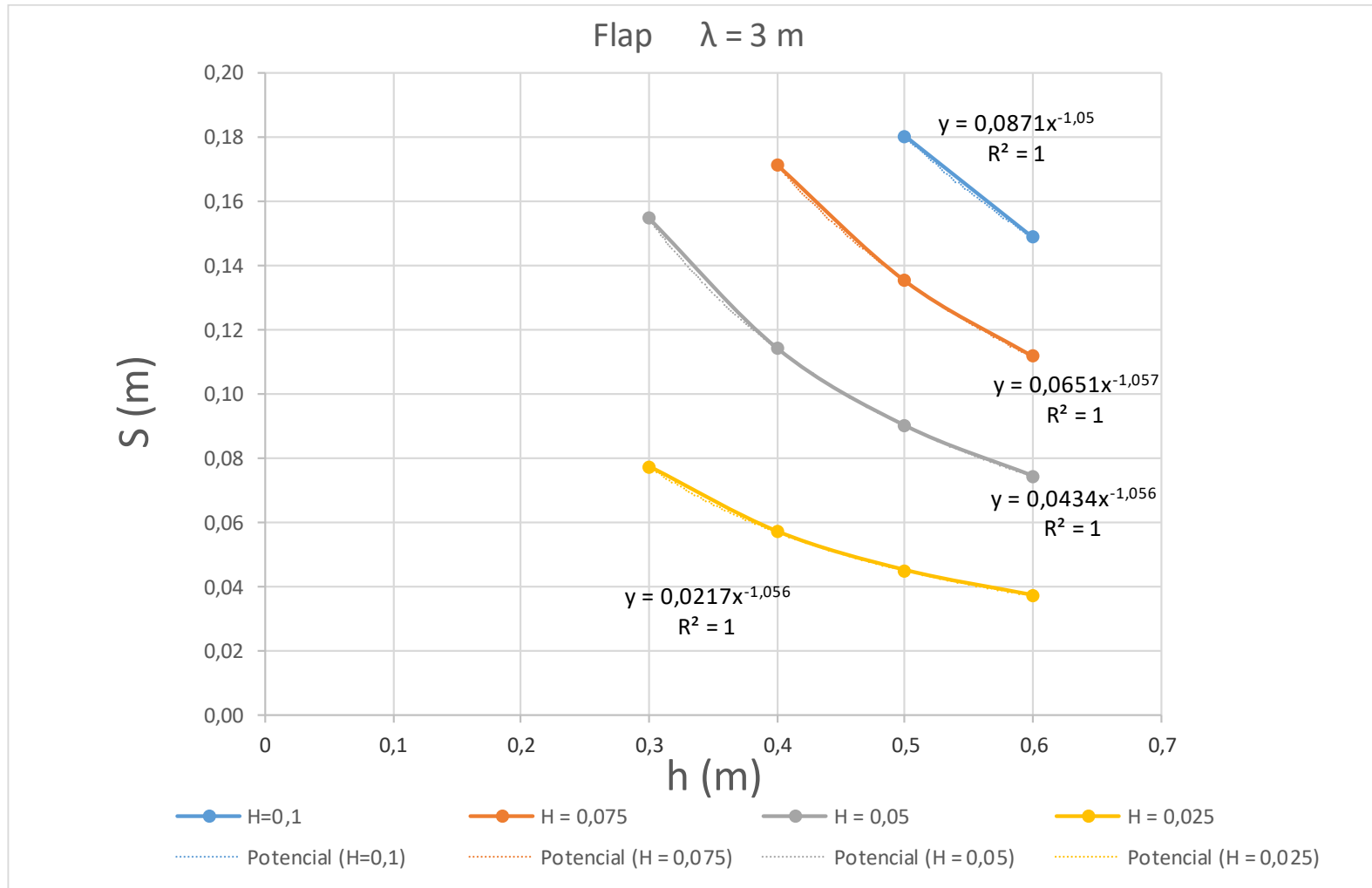
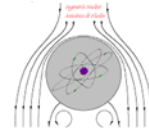


Gráfico 8: Carrera del flap para longitud de onda de 3,0 m

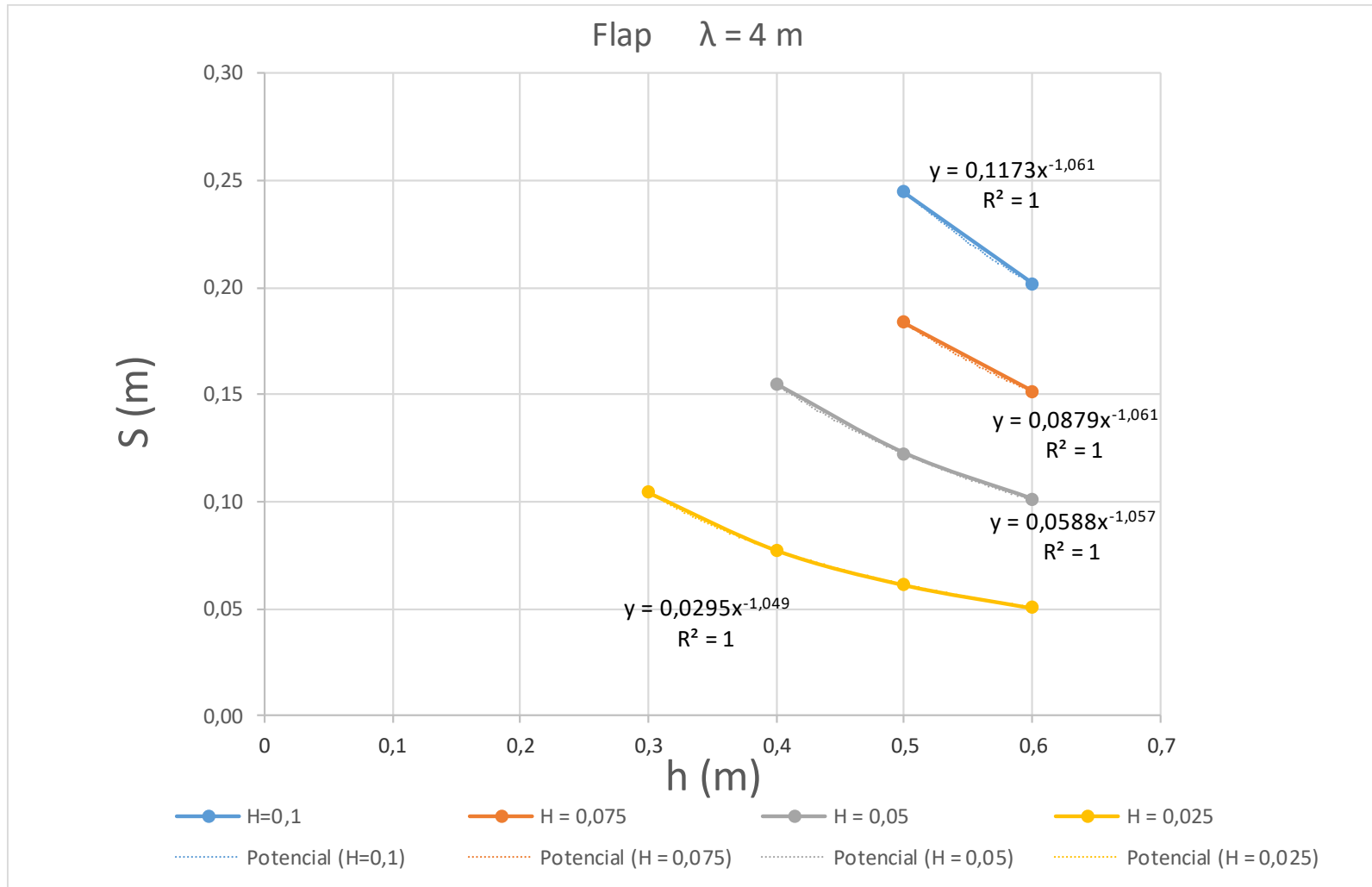
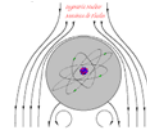
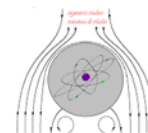


Gráfico 9: Carrera del flap para longitud de onda de 4,0 m



Tal y como se ha especificado en la Tabla 7, existen restricciones en relación a la carrera máxima posible de la pala. Cuando se trabaja con una longitud de onda igual a 1 metro, no será posible trabajar con un calado de 0,1 metros para ninguna longitud de onda y tampoco se podrá hacer con un calado de 0,2 metros si se quieren obtener olas de 0,1 y 0,075 metros de altura. El hecho de que no se vayan a conseguir las condiciones de oleaje con una profundidad de 0,1 metros no va a ser un factor determinante a la hora de elegir el generador, ya que es un valor de calado con el que se evitará trabajar. A medida que aumenta la longitud de ola hay más restricciones a distintas profundidades. En el caso de olas de 2,0 metros de longitud de onda, el generador nunca podrá lograr la carrera necesaria para formar las olas a 0,1 metros de profundidad y sólo se podrá trabajar con calados de 0,2 metros para conseguir olas de 0,025 metros de altura. Para las olas de mayor altura, de 0,1 metros, aparece la restricción de carrera a 0,3 metros de profundidad. Con longitudes de onda igual a 3,0 metros, en ningún caso se podrá trabajar a profundidades de 0,1 y 0,2 metros y para olas de 0,075 y 0,1 metros, además, tampoco se podrá hacer con calados de 0,3 y 0,4 metros. Para olas de 0,075 a 0,4 metros de calado teóricamente sí se pueden conseguir, pero el valor de la carrera necesario se encuentra muy cerca del límite, este es un valor que en principio podría darse, pero convendría verificar empíricamente en caso de que el flap fuese la elección. Finalmente, al trabajar con longitudes de onda de 4,0 metros, aparecen el mayor número de casos limitantes. Nunca se podrán reproducir las olas a 0,1 y 0,2 metros, si se trabaja con un calado de 0,3 metros únicamente se podrán obtener olas de 0,025 metros de altura y para 0,4 metros de calado, olas de altura igual a 0,025 y 0,05 metros.

Para entender mejor estas aclaraciones, se van a mostrar los resultados recogidos en las siguientes tablas, una para cada longitud de onda. Los casos imposibles de realizar se han señalado con un guion y en los casos posibles se indica el valor de la carrera.

Tabla 8: Valores de carrera del flap para $\lambda = 1,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	—	—	0,101	0,082	0,073	0,068
H=0,075 m	—	—	0,076	0,061	0,054	0,051
H=0,050 m	—	0,074	0,050	0,041	0,036	0,034
H=0,025 m	—	0,037	0,025	0,020	0,018	0,017

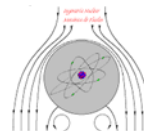


Tabla 9: Valores de carrera del flap para $\lambda = 2,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	_____	_____	_____	0,149	0,119	0,101
H=0,075 m	_____	_____	0,151	0,112	0,089	0,076
H=0,050 m	_____	_____	0,101	0,074	0,060	0,050
H=0,025 m	_____	0,077	0,050	0,037	0,030	0,025

Tabla 10: Valores de carrera del flap para $\lambda = 3,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	_____	_____	_____	_____	0,180	0,149
H=0,075 m	_____	_____	_____	0,171	0,135	0,112
H=0,050 m	_____	_____	0,155	0,114	0,090	0,074
H=0,025 m	_____	_____	0,077	0,057	0,045	0,037

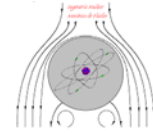


Tabla 11: Valores de carrera del flap para $\lambda = 4,0$ m

	h=0,10 m	h=0,20 m	h=0,30 m	h=0,40 m	h=0,50 m	h=0,60 m
H=0,100 m	_____	_____	_____	_____	0,245	0,202
H=0,075 m	_____	_____	_____	_____	0,184	0,151
H=0,050 m	_____	_____	_____	0,155	0,122	0,101
H=0,025 m	_____	_____	0,104	0,077	0,061	0,050

6.1.4 Otros tipos de generadores

En cuanto a la geometría de los generadores de olas, en este Trabajo Fin de Máster se ha hecho referencia siempre a aquellos formados por una superficie plana, por su sencillez operacional y constructiva, así como por ser aquellos que son utilizados en la mayoría de los canales. Sin embargo, existen otros tipos de generadores que se utilizan con menos frecuencia, que son los que tienen forma de cuña, conocidos como *wedge-shaped*. En el esquema representado en la siguiente imagen (Ilustración 24) se muestra su movimiento que, en este caso, y a diferencia de los casos anteriores, es vertical. Las ecuaciones que se utilizan para los generadores de tipo pistón y tipo flap [8] pueden utilizarse para este tipo de pala ya que no introducen adicionales condiciones de contorno a la hora de su análisis matemático.

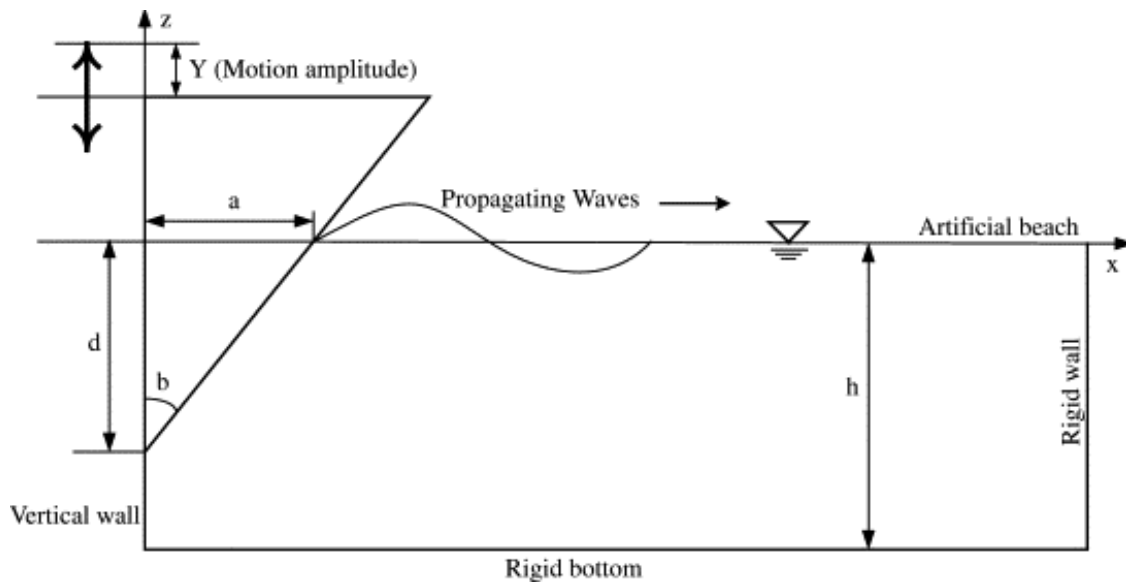
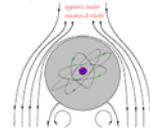


Ilustración 23: *Generador de olas en forma de cuña*[12]

Los generadores de olas más simples se pueden combinar entre ellos, dando lugar a configuraciones más complejas. Se aumenta el número de grados de libertad del sistema.

Utilizar una pala con 3 grados de libertad asegura mayor calidad del oleaje porque permite reducir el efecto de la reflexión en las olas que se están generando. El esquema de un sistema con dichas características puede observarse en la siguiente imagen, donde la pala se divide en dos secciones y los actuadores están situados en el punto superior, intermedio y final de la misma. Sin embargo, disponer de este tipo de sistemas supone un elevado coste, debido a que se necesitarían 3 actuadores, que hace que no resulte rentable para un proyecto de estas características. Además, se requeriría un sistema de control más complejo que contemple los aspectos relacionados con la propia reflexión del oleaje.

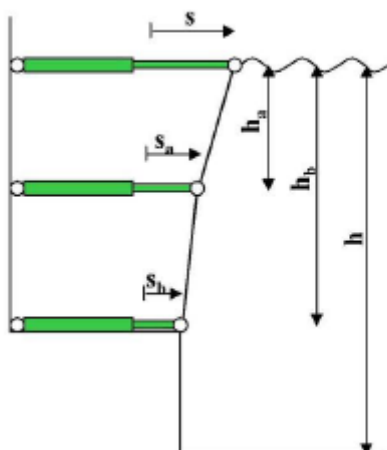


Ilustración 24: Generador de 3 grados de libertad [21]

Cuando se busque mayor calidad se puede optar por los generadores de 2 grados de libertad, de tipo flap-flap y flap-pistón.

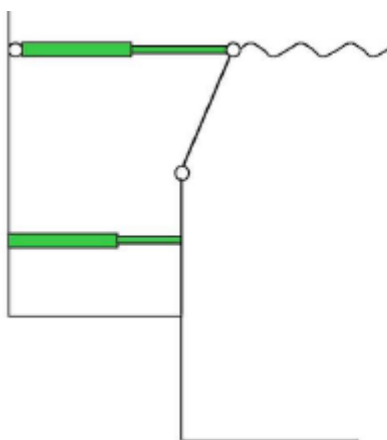


Ilustración 25: Generador de 2 grados de libertad, tipo flap-pistón [21]

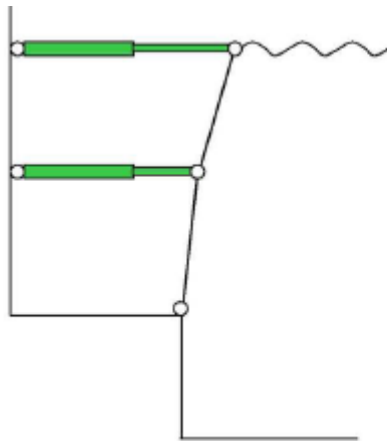
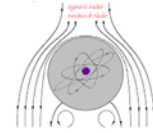


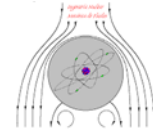
Ilustración 26: *Generador de 2 grados de libertad, tipo flap-flap [21]*

6.2 Zona de propagación

El aspecto más importante de la zona de propagación es la longitud. Ésta debe ser lo suficiente como para que la ola quede libre de cualquier tipo de efecto externo, como puede ser la aceleración de la pala en la generación. Por dicho motivo, se establece que la longitud mínima de la zona de propagación debe ser por lo menos de dos longitudes de onda [5] de la ola que se genera. De este modo, se garantiza que la ola quede fuera de la influencia de efectos externos pudiendo considerarse que está completamente desarrollada. Por tanto, cualquier tipo de medición que se lleve a cabo, podrá considerarse adecuada. Esta limitación en cuanto a la longitud hace que, en función del espacio disponible, se limite la longitud de onda de las olas a generar en el canal. Este aspecto se aborda en el apartado *8.1.1 Emplazamiento disponible para la instalación*.

La zona de propagación es sin lugar a duda la de mayor extensión del canal y, por tanto, es necesario tener en consideración otra serie de aspectos como son el material de la instalación, el peso del mismo y el peso máximo cuando el canal está lleno. En consecuencia, se deberá definir qué sistema utilizar para sustentar toda la estructura.

En relación al material, es preferible que las paredes laterales sean transparentes con el objetivo de poder observar la propagación de las olas a lo largo del canal. Por ese motivo, se contemplan tanto el metacrilato y el vidrio como materiales susceptibles de ser empleados para este fin. El metacrilato al ser un material más nuevo que el vidrio y no estar tan extendido su uso, resulta más caro. Otra ventaja que tiene el vidrio frente al metacrilato es la resistencia a la compresión. Mientras que el del vidrio templado tiene una resistencia a la compresión de 1000 MPa [22], la del metacrilato es de entre 72,4 y 131 MPa [23]. Por otro lado, el vidrio es más pesado que el metacrilato por lo que resulta más difícil a la hora de montarlo.



Los dos tipos de vidrio que se plantean como opciones a instalar como parte del canal son el vidrio templado y el vidrio laminado. Al vidrio templado se le aplica un tratamiento térmico, lo que hace que tanto su resistencia térmica como mecánica se vean aumentadas en comparación con el vidrio laminado. Otra diferencia entre estos dos tipos de vidrios es que el vidrio templado por su moderado espesor y flexibilidad puede ser manipulado fácilmente y puede ser taladrado en caso de ser necesario, sin embargo, el vidrio laminado suele ser más espeso. Por otra parte, el vidrio laminado se utiliza como refuerzo de aislamiento acústico, pero el vidrio templado no es muy eficaz contra la contaminación acústica.

Para el resto de la estructura, se pueden considerar tanto el hierro como el aluminio. Todos ellos deberán ser materiales capaces de trabajar sin deteriorarse en un ambiente húmedo, por ello el material que debe manejarse conviene que sea inoxidable, un buen ejemplo es el acero inoxidable.

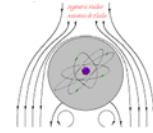
Para canales de longitud considerable, como el que es objeto de estudio, es necesario disponer de un sistema de bombeo que sirva para llenar y vaciar el canal de forma rápida y precisa.

6.3 Zona de extinción

La zona de extinción del canal de olas está ubicada en el extremo opuesto a la zona de generación. El objetivo de esta zona es disipar la energía de las olas mediante un sistema de extinción, ya sea activo o pasivo. Los sistemas de extinción activos y pasivos se diferencian básicamente en que los primeros implementan modificaciones en la generación de las olas a lo largo de los ensayos y los segundos no varían la generación. Los sistemas de extinción activos se caracterizan por ser más caros y requerir de mayor mantenimiento que los pasivos. Esto hace que la mayoría de los sistemas empleados sean pasivos, ya que además ofrecen la posibilidad de poder modificar su forma, porosidad, posición... El objetivo principal de los sistemas de absorción de energía pasivos, también conocidos como “playas” es evitar que las olas se reflejen sobre las olas incidentes, perturbando tanto las olas que están siendo generadas como las mediciones que se puedan llevar a cabo en ellas. Así, se diseñan de manera que absorban la mayor cantidad de energía, y que por tanto la reflexión mínima.

Antes de analizar las diferentes opciones de diseño del sistema de absorción, conviene tener en cuenta las siguientes conclusiones que se extraen de los estudios llevados a cabo por Lean (1967) apoyándose en la teoría lineal de olas.

1. Independientemente del tamaño del sistema de absorción, siempre va a darse la reflexión de parte de las olas.



2. Una playa de pendiente constante tendrá la misma eficiencia que una playa de profundidad constante el doble de larga. A medida que la longitud de la playa de pendiente constante aumente, el grado de absorción disminuirá.
3. Una buena manera de reducir la longitud es diseñando la playa con un perfil parabólico.
4. Como mínimo se estima que las olas se reflejan un 10% con playas de longitud equivalente a entre el 50% y 75% de la longitud de onda.

En este apartado se analizarán únicamente aquellos dispositivos de absorción de energía denominados como pasivos. Para ello, los parámetros de ola a tener en cuenta son la altura, H , y longitud de onda, λ , además, por supuesto del calado, h .

La relación entre la altura y longitud de ola, determina la pendiente de la ola. Las olas caracterizadas por tener una pendiente pequeña, $H/\lambda \approx 0,01$, son más difíciles de amortiguar que aquellas de pendiente alta, $H/\lambda \approx 0,07$. Las primeras prácticamente no rompen al chocar con la playa, y por el contrario las de pendiente alta rompen disipando más energía en el choque.

La clasificación principal que se hace de las playas las separa en permeables e impermeables. Las primeras son las más utilizadas ya que se ha demostrado experimentalmente que son más eficientes y más fáciles de mantener y manejar. En general se suelen utilizar playas permeables, ya que resultan menos costosas y las impermeables requieren mayor mantenimiento para asegurar que no se filtra el agua.

La eficiencia de las playas permeables depende de tres variables que tienen cierta dependencia entre sí.

- **Pendiente:** En referencia a la inclinación de la playa, existen tres modelos de diseño muy diferenciados. Por una parte, están los modelos que no presentan ningún tipo de inclinación, es decir, consiste en una pared vertical colocada en la parte posterior del canal, o simplemente la pared que ya forma parte de la estructura.

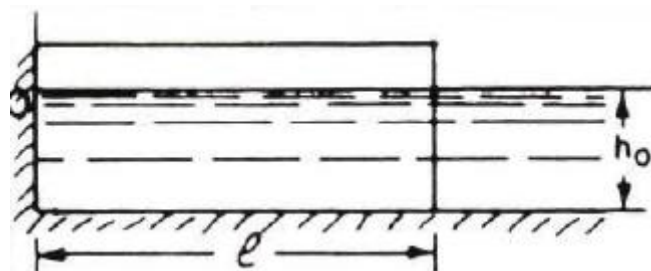
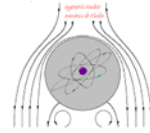


Ilustración 27: Playa sin inclinación [24]

Este diseño no proporciona buena eficiencia en cuanto a la reflexión y sólo se utiliza en el caso de canales una longitud muy grande. Si se coloca una pared perpendicular al fondo del canal, separada una distancia suficiente del final del canal es recomendable



que deje pasar las olas al otro lado de la misma, por ejemplo, estar formada por barras o que contenga agujeros para permitir el paso del agua.

El siguiente modelo referente a la inclinación, es el que mantiene la pendiente constante en toda la estructura. Es uno de los sistemas más utilizados dada su sencillez de diseño y buenos resultados demostrados empíricamente.

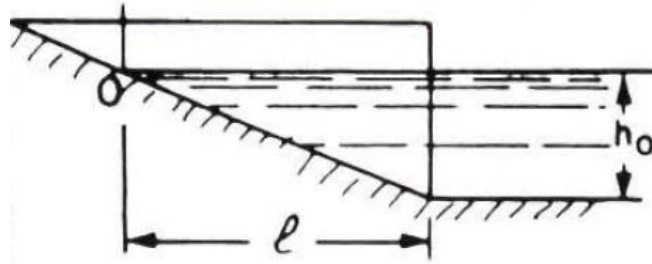


Ilustración 28: Playa con pendiente constante [24]

Como puede verse en la Ilustración 29 la playa mantiene la misma pendiente desde la superficie hasta el fondo del canal.

El último diseño es más sofisticado y requiere de un mayor estudio para su desarrollo. La playa cambia su inclinación a lo largo de la superficie. Este sin duda resulta el modelo más eficiente. Lo que se busca es que la parte superior, la que sobresale del agua del canal, sea lo más horizontal posible y que se vaya adquiriendo una inclinación de forma parabólica suave hasta el tramo final, en contacto con el canal que es donde adquiere una inclinación más pronunciada. Un esquema de este modelo puede verse en la Ilustración 30.

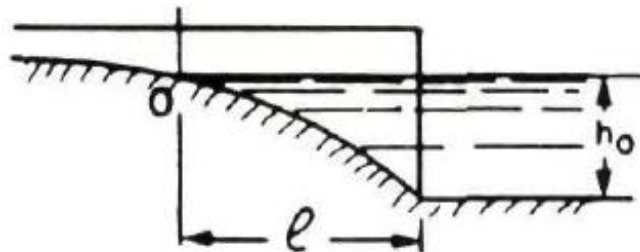
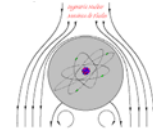


Ilustración 29: Playa con cambio de pendiente [24]

- **Rugosidad y porosidad:** Estos aspectos hacen referencia al material que se utilice y los elementos que se puedan incluir sobre la playa. Son aspectos que afectan a la reflexión, pero no son tan determinantes como el resto de factores. El aumento de la



porosidad, incluyendo pequeños agujeros en la superficie y la rugosidad, colocando piedras sobre la playa, disminuye el coeficiente de reflexión. Un aumento de la porosidad de un 70%, disminuye la reflexión en un 2%.

En la Ilustración 31 puede verse un diseño de playa utilizado para realizar algunos ensayos en el canal de referencia instalado en el laboratorio de la universidad. Cuenta con una superficie en forma de malla y con piedras en su interior, que conforman un lecho poroso.



Ilustración 30: Playa formada por una superficie en malla y con piedras

- Forma y perfil de la playa:** En cuanto al perfil de la playa, puede tratarse de una superficie recta, de la inclinación que se considere, o se le puede dar un perfil determinado. Se ha demostrado que los diseños con perfiles parabólicos o circulares otorgan la máxima eficiencia. Se puede diseñar la playa superponiendo dos rectas, buscando que la inclinación en la parte superior sea suave y en la parte inferior más fuerte, consiguiendo más eficiencia que manteniendo la misma pendiente en toda la playa.

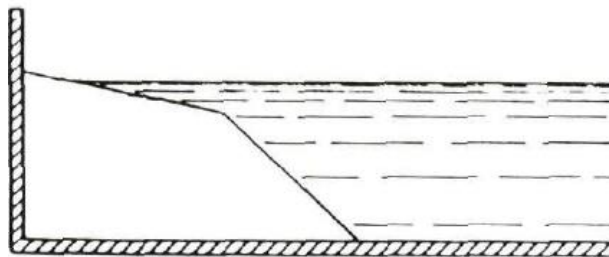


Ilustración 31: Playa formada por dos superficies rectas [24]

O bien, realizar un diseño más complejo haciendo que la playa siga un perfil parabólico.

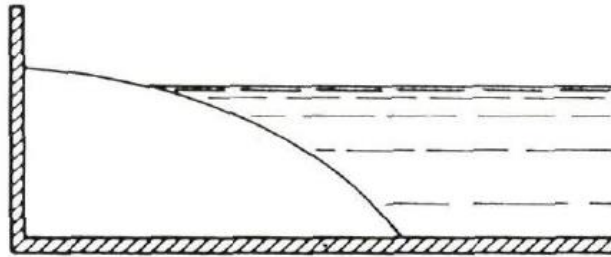


Ilustración 32: Playa con perfil parabólico [24]

Realizar un diseño con perfil parabólico puede resultar algo complejo, por lo que se puede recurrir a un perfil circular, que con un radio grande se aproxima en parte al perfil parabólico. Un diseño de este tipo de playa en el laboratorio *Delft Shipbuilding Laboratory*, en la Universidad Tecnológica de Mekelweg en Holanda.

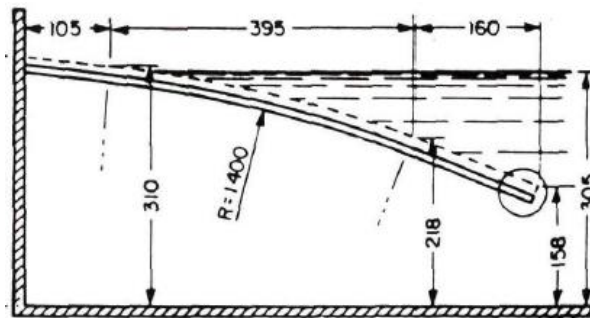
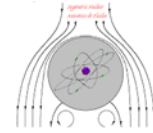


Ilustración 33: Playa con perfil circular [24]

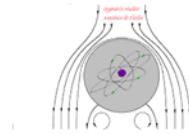


7 Análisis de riesgos

En el presente apartado se va a realizar un análisis de los posible riesgos que pudieran ocasionarse durante la realización de este proyecto.

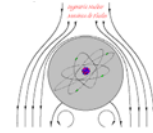
Con el análisis de riesgos del proyecto se pretende evaluar el impacto de los elementos de riesgo, con el fin de conocer los puntos débiles del mismo, y saber cómo actuar en caso de que ocurran. A continuación se van a enumerar los factores de riesgo, el impacto que causarían en el proyecto y la forma en que proceder en caso de que se den.

- **Retraso en la recepción de materiales:** En caso de que la llegada de alguno de los elementos se retrasara acarrearía la acumulación de tareas y esto supondría el retraso en la instalación del canal. Lo recomendable en este caso es realizar una reordenación de las tareas para poder terminar la instalación con el menor retraso posible.
- **Distribución de las cargas:** Al hacer el diseño de la estructura se debe tener en cuenta que las cargas estén repartidas correctamente, de lo contrario cuando la estructura se encuentre montada y se comience con el llenado del canal éste se rompería por las zonas que reciben mayores esfuerzos. A pesar de que este proyecto no contempla el estudio de resistencia del canal, sin entrar en mayor detalle, como solución se recomienda fortalecer la estructura con más perfiles para que soporten las cargas de forma equilibrada. En el caso concreto de este proyecto, los servicios de Arquitectura de la EIB han sido los encargados de realizar los cálculos correspondientes de reparto de cargas que garanticen la seguridad a la hora de operar con el canal. La primera solución que se propuso para realiza una buena distribución de las cargas fue instalar una columna en el garaje que soportase el peso del canal. Esta idea fue desechada por las obras que se requerían en la estructura del edificio, por tanto, se optó por hacer la estructura sobre la que apoyan las paredes del canal más ancha, para que la carga soportada por metro cuadrado de superficie sea menor.
- **Suelo del laboratorio:** El suelo del laboratorio resulta un factor de riesgo ya que para un equipo de las dimensiones del canal que va a ser instalado resulta necesario que no existan inclinaciones en él. La falta de rectitud del suelo se traduciría en irregularidades en el nivel de agua del canal. La solución que se propone en este caso es la de incorporar bajo los apoyos del canales unas juntas que aseguren su correcto nivelado.
- **Paredes del canal:** Los cristales que forman las paredes laterales del canal suponen uno de los elementos de mayor riesgo a la hora de la puesta en marcha del canal. Una vez que el canal esté en funcionamiento, si como consecuencia del agua en el interior,



los cristales comenzasen a agrietarse sería necesario retirarlos y cambiarlos por otros que pudiesen soportar la carga del agua.

- **Generador instalado:** Una vez que se encuentre funcionando se comprobará empíricamente si el generador de olas es capaz de llegar a los resultados obtenidos analíticamente, cumpliendo así la ya mencionada *WaveMaker Theory*. En caso de que no se llegaran a los resultados previstos, sería necesario la sustitución del generador por otro que sí consiguiese las condiciones que se prevén, bien sea cambiando sus dimensiones o sustituyéndolo por otro tipo de generador.



8 Selección de la solución. Diseño completo del canal de olas

8.1 Aspectos a considerar en la instalación del canal de olas

A lo largo de este apartado se va a dar un enfoque global de aquellos los aspectos que hay que tener en cuenta a la hora de abordar el diseño de la instalación de un canal de olas. Una vez explicados, en los posteriores apartados serán particularizados al canal definido en el presente proyecto.

8.1.1 Emplazamiento disponible para la instalación

Sin lugar a duda esta es una de las principales características que va a condicionar el diseño del canal. En el caso de que no hubiese ningún tipo de restricción de longitud a ocupar por el canal, se estipularía una escala para reproducir el oleaje y, en consecuencia, se diseñaría el canal de acuerdo a esos cálculos. De este modo sería posible buscar una solución que permitiese minimizar los efectos debidos a la escala reducida, sin que esto llegase a afectar al modelo a implementar [25].

El emplazamiento elegido para el canal es el laboratorio docente de Mecánica de Fluidos ubicado en el Edificio II de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Este laboratorio cuenta con numerosos equipos que a día de hoy son utilizados en las prácticas que se llevan a cabo en las asignaturas correspondientes y, por tanto, ocupan cierto espacio del laboratorio. Este hecho lleva a tener que considerar cómo disponer estos equipos, con el objetivo de aprovechar al máximo el espacio disponible en el laboratorio.

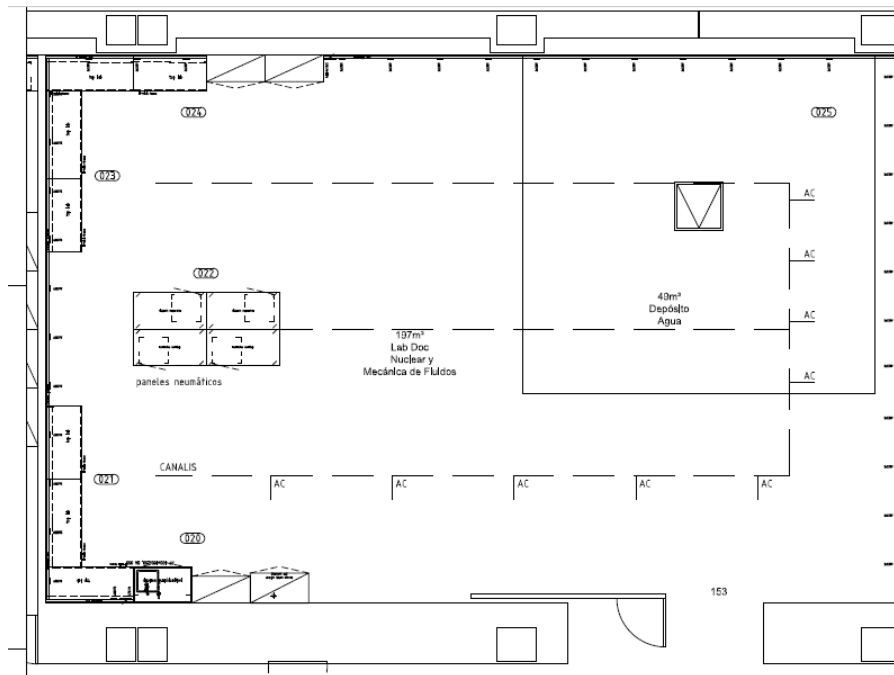


Ilustración 34: Plano del laboratorio docente de Mecánica de Fluidos

Se deberá analizar la situación del laboratorio, ver cuántos dispositivos hay, qué espacio ocupan, si es preciso y posible, hacer una reubicación de los mismos... Teniendo en cuenta la forma que tiene un canal como el que se va a instalar, con una longitud muy grande en comparación con la anchura, lo idóneo sería realizar un diseño de la planta del laboratorio, con los elementos ya instalados y añadiendo el canal. Esto conllevaría la redistribución de las distintas máquinas que haya en el laboratorio, puede que en algunos casos no sea posible realizar un cambio de ubicación de ellas, también se debe de tener en cuenta esto.

En la Ilustración 35 se muestra la disposición del canal en uno de sus extremos, Algunos equipos se han movido a otras zonas del laboratorio. Con el propósito de facilitar la circulación a través del laboratorio y ganar en espacio, uno de los extremos del canal, el correspondiente a la zona de generación se ha situado lo más próximo posible a la pared.

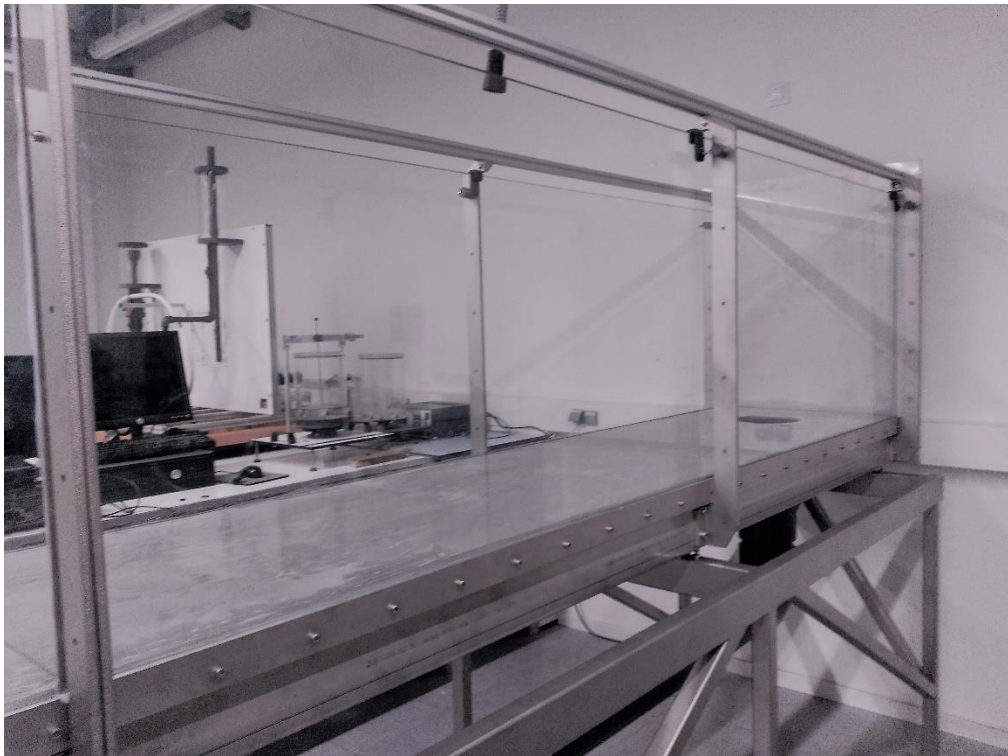


Ilustración 35: Posición del extremo del canal en el laboratorio, zona de generación

8.1.2 Presupuesto para la instalación y el mantenimiento

Otro aspecto fundamental que condiciona en mayor medida el diseño del canal es el presupuesto disponible. En general, para este tipo de instalaciones, los componentes a los que se le atribuyen mayores costes económicos son la obra civil, el actuador y la instrumentación requerida para la generación [25].

Cada una de estas partidas presupuestarias tendrá mayor o menor peso en función de las dimensiones del canal y de la calidad de los elementos que vayan a componerlo.

Independientemente del tamaño del canal, el actuador va a suponer un porcentaje elevado del presupuesto total, dado que es uno de los elementos de mayor importancia.

La inversión para la adquisición y compra de este canal es llevada a cabo por la UPV/EHU dentro del Plan Estratégico 2012-2017 que busca mejorar el equipamiento docente y promover la investigación y el compromiso social. El presupuesto está dividido en los varios elementos que forman el canal y las tareas que se deben llevar a cabo para su montaje y funcionamiento. Se recogen en la Tabla 12.

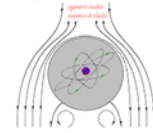


Tabla 12: Presupuesto completo para la instalación del canal

PRESUPUESTO	
Obra civil	1.500 €
Canal	16.600 €
Estructura	12.000 €
Playa	1.800 €
Actuador	4.250 €
Generador de olas	2.100 €
Tarjeta	1.900 €
Bombas	4.500 €
TOTAL	44.650 €

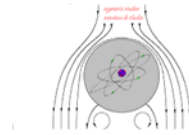
8.1.3 Naturaleza de los ensayos previstos

El tipo de ensayos que se quieran desarrollar en el canal va a influir en el diseño, ya que afectará principalmente a su geometría. También influirá a la hora de elegir o utilizar un tipo de generador de olas.

En función de, si se pretenden realizar ensayos simulando profundidades constantes o irregulares, el diseño del canal y del equipamiento para el mismo cambiará. Se planteará la incorporación de fondos regulables, depósitos de agua en la zona inferior del canal, equipos de bombeo que faciliten la evacuación de agua y la regulación, etc.

Otro aspecto que se puede incluir en la configuración del canal es la rugosidad del fondo, tratando de simular una batimetría concreta; y también, los distintos diseños y disposiciones de la playa van a depender del tipo de ensayo. En cuanto al diseño de la playa, se tratará en mayor detalle en posteriores apartados.

Existe la posibilidad de llevar a cabo ensayos más ambiciosos incluyendo dispositivos que simulen corrientes en el fondo o viento en la superficie. Sin duda estos equipos permiten realizar pruebas más acordes a la realidad, pero también conllevan un incremento del presupuesto.



8.1.4 Escala de los ensayos

El objetivo principal de un canal de olas es poder reproducir condiciones oleaje diversas que permitan llevar a cabo la mayor variedad de ensayos en él.

Con los datos metaoceánicos que se disponen y con los cálculos teóricos que se lleven a cabo para determinar la escala que se aplicará en el laboratorio, se determinarán las condiciones de oleaje a reproducir en el canal. Generalmente, se utilizarán los parámetros de altura de ola, H , y el periodo, T , para definir el tipo de oleaje que se da con mayor frecuencia en el área de Bimep.

Antes de comenzar con el diseño del canal es conveniente realizar cálculos relativos a la escala de los ensayos que se van a llevar a cabo, dado que esto ayudará a determinar ciertas características del diseño del canal, como puede ser la longitud mínima necesaria en la zona de propagación. Además, se va a conocer la relación altura-longitud de ola que se va a simular, y eso ayudará a tener una idea de las dimensiones del canal se requieran para llevar a cabo la reproducción de ese oleaje.

Las escalas que se utilicen en el laboratorio, van a determinar la profundidad mínima de canal necesaria para que se llegue a un estado estacionario, sin que a las olas generadas les lleguen a afectar las olas reflejadas. La longitud de la zona intermedia del canal va a poder modificarse de un ensayo a otro, acercando o alejando la playa de la zona de generación.

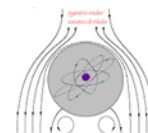
8.2 Condiciones de oleaje

8.2.1 Obtención de los datos

Cuando se quieren reproducir las condiciones de oleaje de una zona concreta el primer paso consiste en hacer un estudio del recurso de ese lugar, condiciones de oleaje y condiciones del fondo. Para este proyecto los datos que nos interesan son los referentes al oleaje. En consecuencia, el estudio batimétrico, las condiciones del fondo marino no van a tener relevancia en este trabajo, únicamente la profundidad de la zona, pero no en qué condiciones se encuentra.

En este apartado se explicará cómo se han obtenido los datos relativos al oleaje en Bimep, sin considerar el recurso eólico ni las corrientes marinas, para continuar exponiendo posteriormente el tratamiento de datos correspondiente.

Para la obtención de datos *in situ* se utiliza una boya direccional, que además de medir la altura y frecuencia de las olas, genera datos estadísticos de las propias olas y del entorno, como temperatura y presión. La instalación, los dispositivos de comunicación y el mantenimiento de la



boya es responsabilidad del Centro tecnológico experto en innovación marina y alimentaria. AZTI, perteneciente a Tecnalia. La boya en cuestión se llama WAVESCAN. Tal y como se puede observar en la Ilustración 35, la boya cuenta con cuatro paneles solares gracias a los cuales obtiene la energía suficiente para obtener datos y transmitirlos a la costa. Dispone también de baterías de litio que se usan en días con menor radiación solar. Finalmente, posee un sistema GPS que monitoriza su posición en todo momento, y sistemas de control que se activarían en caso de que se quedara a la deriva, mandando señales al centro de control situado en la costa. Todos los datos recogidos por la boya se guardan en un almacenamiento interno y son transmitidos al centro de control de la costa, utilizando la comunicación por radio o satélite.

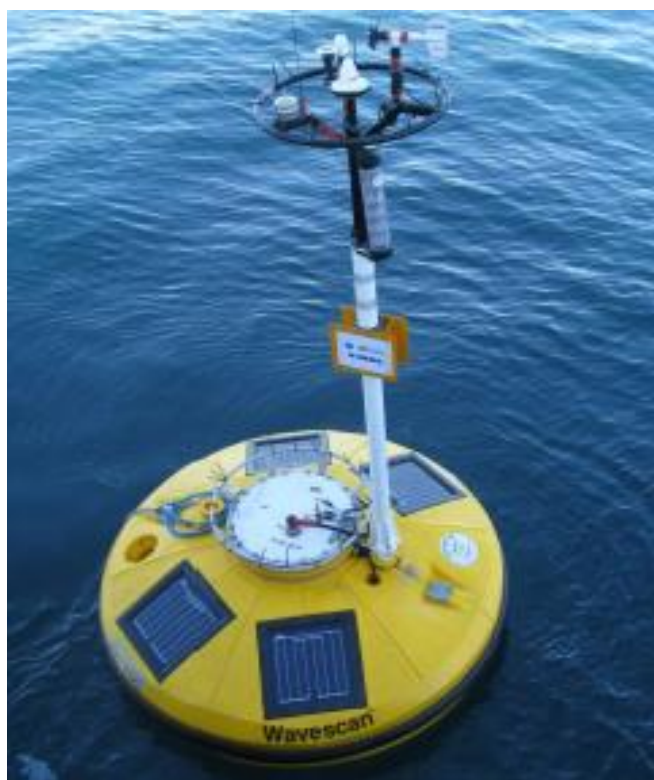


Ilustración 36: Boya WAVESCAN desarrollada por AZTI [26]

En cuanto a las características de la boya, su carcasa en forma de disco puede separarse en dos, lo que facilita las labores de transporte y mantenimiento. En el interior de la boya se ubica el sistema electrónico, el transformador y el sensor de olas. Además, cuenta con un mástil que soporta los sensores meteorológicos y la antena. En la parte inferior de la boya está colocada una quilla con un contrapeso para evitar el posible vuelco de la boya. La boya está anclada al fondo marino con un amarre que se caracteriza por dejar libertad de movimiento y minimizar así los efectos adversos del mar en la boya.

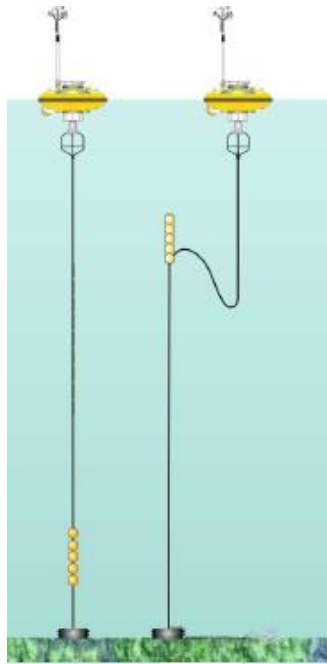
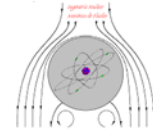
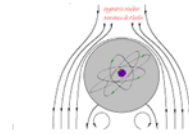


Ilustración 37: WAVESCAN y sistema de amarre al fondo marino [26]

Dentro de la boya se encuentra el sensor que mide la altura y dirección de las olas, denominado *Fugro Oceanor Wavesense*. A partir de estas series de datos, se obtienen diversos parámetros como la altura significativa de ola, el periodo de pico, periodo de las olas que llegan a la boya con más energía, la principal dirección de olas, etc. Estas series de datos son enviados a la costa una vez cada hora.

Para validar estos datos se sigue la metodología recomendada en IEC TS 62600-101:2015 (*International Electrotechnical Commission*) para la evaluación del recurso de las olas. Esta metodología está incluida en el documento "*International Standard*", orienta y establece algunos requisitos que se deben cumplir en proyectos de barcos y estructuras *offshore*. El proceso de validación se caracteriza por tener varios pasos intermedios, pero básicamente consiste en la comparación de los datos obtenidos en los tres años de medida de la boya, desde 2009 hasta 2012, con los datos que había recogidos de la zona desde 1985. La validación de los datos ha sido llevada a cabo por el IHCantabria, Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria, que además de esto, ha realizado la caracterización completa de la zona, incluyendo el estudio del viento, corrientes, nivel del mar y batimetría. Para conocer los valores medios de los parámetros de la zona, altura significativa de ola, periodo de pico, etc., se ha utilizado una herramienta proporcionada por el IH Cantabria, AMEVA, que permite introducir los datos recopilados de determinados parámetros y realizar un estudio estadístico de los mismos. Los datos que resultan de mayor interés para el análisis del oleaje son la altura significativa de ola y el periodo de pico. Los datos utilizados para realizar el análisis abarcan el periodo entre el 1 de enero de 1985 y el 31 de diciembre de 2015. Dentro de todos los datos recogidos existen series de datos de corrientes, nivel del mar, oleaje y del viento. Este trabajo se centra en el estudio de



las olas por lo que los únicos datos que se utilizan son los referentes al oleaje. Los parámetros recogidos son la dirección medida en grado, la altura de ola, medida en metros y el periodo de pico en segundo. Las series de datos recogidas son horarias.

8.2.2 Tratamiento posterior de los datos

En este apartado se va a desarrollar el procedimiento seguido para tratar los datos oceánicos obtenidos por la boya situada en Bimep, con el fin de conseguir los valores medios que serán utilizados en los siguientes apartados. Estos resultados van a servir para definir los valores límites de la zona y representarlos en el diagrama de Le Méhauté, obtener el factor de escala que será necesario utilizar en el canal y conocer los valores de parámetros característicos de ola que se van a implementar en las simulaciones.

Partiendo de los datos obtenidos por la boya WAVESCAN, que ha sido explicado en el apartado 8.2, se procede a trabajar con la herramienta AMEVA. Con este programa se pueden obtener valores medios y aproximaciones estadísticas de valores mensuales, anuales... También se pueden hacer previsiones de aquí a unos años de cuáles serán los valores límites que se obtendrán en cuanto a altura de ola, periodo de pico... Es una herramienta muy útil para trabajar con grandes series de datos. Además, como es una extensión de Matlab, resulta cómodo pasar información del propio programa a Ameva.

En Ameva se introducen las tablas de datos recogidos por la boya en forma de tabla. En primer lugar, se trabaja con la altura significativa de ola, que se va a representar en función de la frecuencia de ocurrencia. Los resultados obtenidos se muestran en los Gráficos 14 a 17 del apartado 9.2.1 *Datos oceánicos*.

8.3 Características del canal

El canal definido en este proyecto está formado por 5 módulos de 2,50 metros de longitud cada uno; lo que hace que la longitud total sea de 12,50 metros. La altura del canal respecto del suelo es de 1,836 m. Se ha añadido un depósito subterráneo con una profundidad de 1,5 m, por lo que el conjunto total hace una altura de 3,336 m.

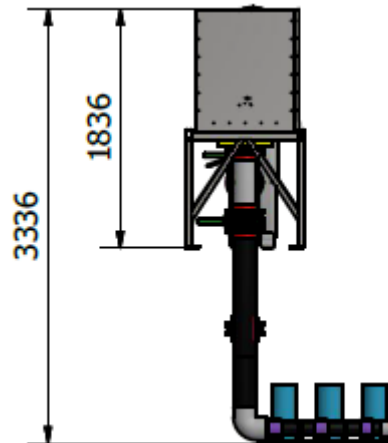
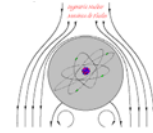


Ilustración 38: Perfil del canal con altura total, disposición de las bombas

Las paredes laterales del canal tienen una anchura de 0,820 m. Sin embargo, como medida de diseño para asegurar una buena distribución de las cargas, la anchura total de la placa sobre la que se apoyan las paredes es de 0,900 m.

En cuanto a las paredes del canal se ha utilizado el vidrio laminado, en total 10 piezas de 2,490 m de largo por 0,725 m de ancho. Tienen un gran espesor para asegurar mejor la resistencia a las cargas de compresión que sobre las paredes ejercerá el agua del canal. En cuanto al material, en un primer lugar se descartó el metacrilato por su elevado coste frente al vidrio. Finalmente, se han instalado paredes de vidrio templado ya que además de aportar más resistencia a la estructura, permiten que su manipulación sea más sencilla a la hora del montaje.

La rugosidad de las paredes es pequeña para evitar que afecte al desarrollo de las olas. El hecho de que las paredes sean transparentes permitirá utilizar dispositivos de medida láser.

En las Ilustraciones 40 y 41 puede verse el esquema del canal con las dimensiones de cada una de las partes que componen la estructura.

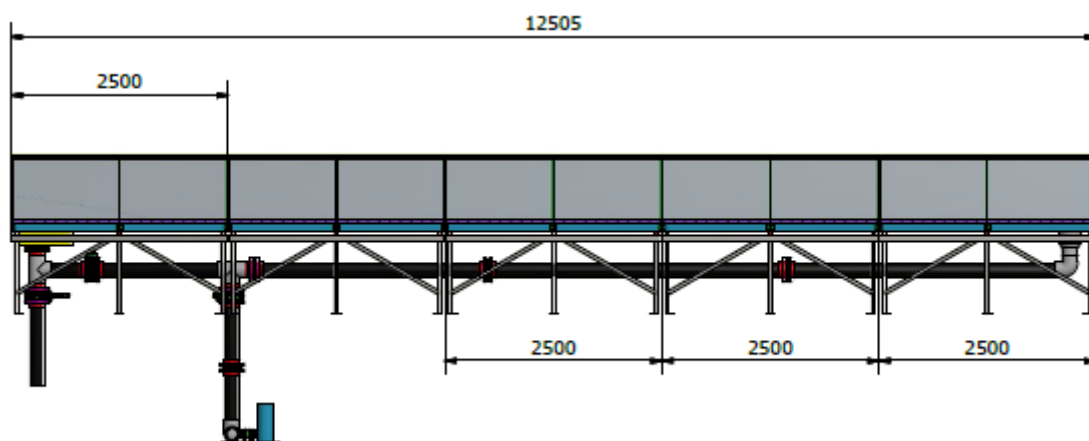


Ilustración 39: Alzado del canal, unidades en mm

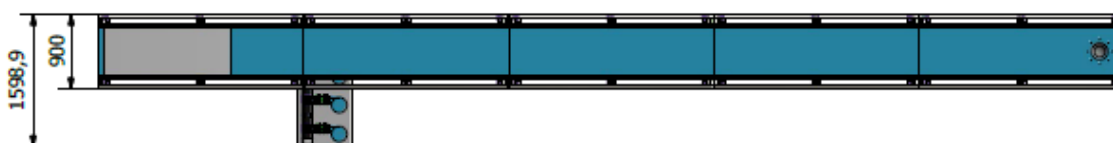


Ilustración 40: Planta del canal, unidades en mm

En la planta del canal, Ilustración 41, se ve la disposición de las bombas con respecto a la estructura.

Los perfiles que conforman la estructura del canal están elaborados en acero inoxidable, por ser éste un material idóneo para trabajar en un ambiente húmedo. A la hora de realizar el diseño final del canal se han añadido perfiles que permiten reforzar la estructura frente a las cargas de compresión. Cada módulo cuenta con un apoyo vertical en el centro del perfil horizontal que lo forma y además, dos perfiles diagonales que unen los apoyos exteriores con el central.

Este diseño hace que las dimensiones operativas del canal para la generación de olas se de 12,5 m (largo) x 0,6 m (ancho) x 0,8 m (alto).

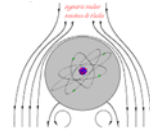
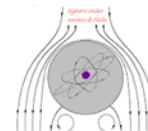


Ilustración 41: Estructura del canal

En las caras laterales de cada módulo, también se han añadido refuerzos para asegurar la estabilidad y sujeción de la estructura, como puede verse en las Ilustraciones 42 y 43.



Ilustración 42: Vista lateral de la estructura del canal



En cuanto al fondo del canal, denominado solera, está formado por distintas placas que se apoyan sobre los perfiles metálicos. Se trata de placas lisas elaboradas en acero inoxidable. En un primer momento, dado que para la instalación no se han tenido en cuenta los datos geológicos de Bimep, no se ha añadido sobre el fondo ningún elemento que pueda actuar a modo de sedimento. Para futuros ensayos se podrían añadir sin interferir en el diseño del canal.

De las tres zonas que conforman el canal, sobre la que más tiempo y esfuerzo se ha invertido en el proceso de análisis ha sido la zona de generación. Además de determinar qué tipo de generador de olas resulta más apropiado emplear, se deciden otros aspectos que interfieren directamente en el diseño de la estructura. Se barajó el uso de lonas para que el agua no pasase de un lado al otro del generador, es decir, que la zona de generación fuese seca. Finalmente, se ha optado por una zona de generación húmeda ya que resulta una forma de diseño más sencilla y que requiere de menos mantenimiento que la opción en seco.

La Ilustración 44 muestra la estructura completa del canal, la estructura metálica así como las paredes y la playa montadas.

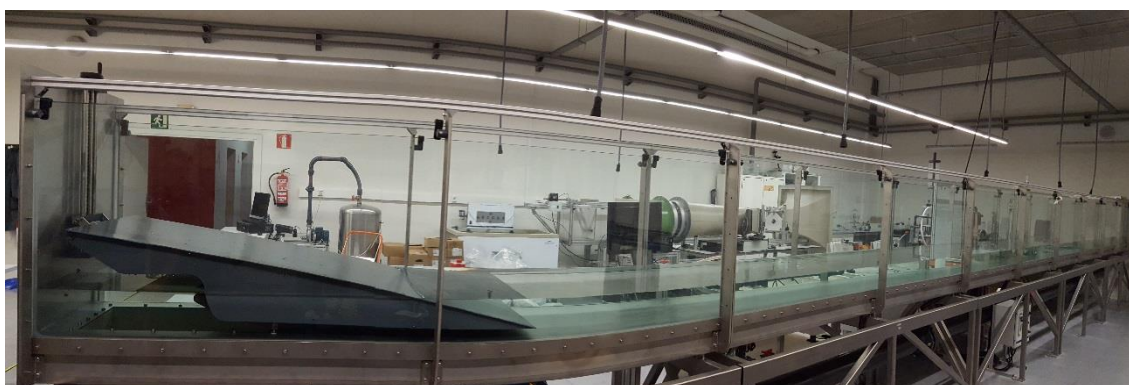
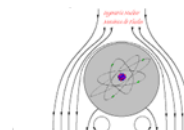


Ilustración 43: Vista completa del canal de olas en el laboratorio



8.4 Elementos del canal de olas

Se van a analizar los distintos elementos que conforman el canal de olas: el generador, la playa y los distintos componentes auxiliares que se han instalado.

8.4.1 Generador de olas. Comparación entre pistón y flap.

Para realizar una comparación efectiva entre los generadores de tipo pistón y flap se van a considerar los siguientes aspectos: i) las restricciones que cada sistema de generación, ii) la relación de H/S alcanzada, iii) el tipo de ola generada y iv) la potencia requerida. Estos cuatro aspectos se abordarán teniendo en consideración que el diseño de este canal tiene por objetivo principal poder simular a escala de laboratorio el oleaje que se da en la zona de Bimep. Sin embargo, también se debe contemplar la posibilidad de que en un futuro se puedan generar olas que permitan desarrollar otro tipo de estudios, así como otras utilidades del propio canal, como puede ser su uso como canal.

8.4.1.1 Restricciones de cada tipo de generador

Como se ha visto en el apartado 6. *Análisis de Alternativas*, para cada tipo de generador se dan ciertas limitaciones. A simple vista se pone de manifiesto que el uso de un generador tipo flap conlleva una serie de restricciones más estrictas que el generador de tipo pistón debido a los ángulos máximos de inclinación asumibles por este sistema.

En la Tabla 13 se muestran estos límites. Se exponen los valores calculados para cada longitud de onda, en función de la altura de ola, H , y el calado, h . Para los cálculos se ha establecido un rango de profundidad entre 0,1 m y 0,6 m, para una altura de ola de entre 0,025 m y 0,1 m. Se muestran los valores calculados para la carrera de pala.

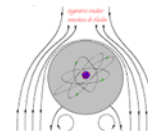


Tabla 13: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 1,0 m

$\lambda = 1,0 \text{ m}$								
		h [m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H[m]	0,100	S pistón [m]	0,050	0,051	0,054	0,061	0,083	0,160
		S flap [m]	0,068	0,073	0,082	0,101	0,149	0,310
	0,075	S pistón [m]	0,038	0,039	0,041	0,046	0,062	0,120
		S flap [m]	0,051	0,054	0,061	0,076	0,112	0,232
	0,050	S pistón [m]	0,025	0,026	0,027	0,031	0,041	0,080
		S flap [m]	0,034	0,036	0,041	0,050	0,74	0,155
	0,025	S pistón [m]	0,013	0,013	0,014	0,015	0,021	0,040
		S flap [m]	0,017	0,018	0,020	0,025	0,037	0,077

Tabla 14: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 2,0 m

$\lambda = 2,0 \text{ m}$								
		h [m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H[m]	0,100	S pistón [m]	0,061	0,069	0,083	0,108	0,160	0,318
		S flap [m]	0,101	0,119	0,149	0,202	0,310	0,632
	0,075	S pistón [m]	0,046	0,052	0,062	0,081	0,120	0,239
		S flap [m]	0,076	0,089	0,112	0,151	0,232	0,474
	0,050	S pistón [m]	0,031	0,035	0,041	0,054	0,080	0,159
		S flap [m]	0,050	0,060	0,074	0,101	0,155	0,316
	0,025	S pistón [m]	0,015	0,017	0,021	0,027	0,040	0,080
		S flap [m]	0,025	0,030	0,037	0,050	0,077	0,158

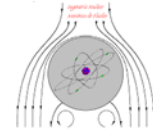
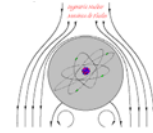


Tabla 15: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 3,0 m

$\lambda = 3,0 \text{ m}$								
		h [m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H[m]	0,100	S pistón [m]	0,083	0,098	0,121	0,160	0,239	0,477
		S flap [m]	0,149	0,180	0,229	0,310	0,471	0,952
	0,075	S pistón [m]	0,062	0,073	0,090	0,120	0,179	0,358
		S flap [m]	0,112	0,135	0,171	0,232	0,353	0,714
	0,050	S pistón [m]	0,041	0,049	0,060	0,080	0,119	0,239
		S flap [m]	0,074	0,090	0,114	0,167	0,236	0,476
	0,025	S pistón [m]	0,021	0,024	0,030	0,040	0,060	0,119
		S flap [m]	0,037	0,045	0,057	0,077	0,118	0,238

Tabla 16: Valores de carrera máxima para longitud de onda igual a 4,0 m

$\lambda = 4,0 \text{ m}$								
		h [m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H[m]	0,100	S pistón [m]	0,108	0,128	0,160	0,212	0,318	0,637
		S flap [m]	0,202	0,245	0,310	0,417	0,632	1,271
	0,075	S pistón [m]	0,081	0,096	0,120	0,159	0,239	0,477
		S flap [m]	0,151	0,184	0,232	0,313	0,474	0,953
	0,050	S pistón [m]	0,054	0,064	0,080	0,106	0,159	0,318
		S flap [m]	0,101	0,122	0,155	0,209	0,316	0,635
	0,025	S pistón [m]	0,027	0,032	0,040	0,053	0,080	0,159
		S flap [m]	0,050	0,061	0,077	0,104	0,158	0,318



Los valores sombreados en rojo, son aquellos que no pueden darse debido a las restricciones que el sistema flap acarrea con respecto a la carrera. Para el pistón se han señalado en rojo los casos que no se van a poder llevar a cabo por tratarse de situaciones en las que la relación entre altura de ola y profundidad es muy grande.

8.4.1.2 Relación H/S obtenida/alcanzada

Dado que el estudio realizado se apoya en la *Wavemaker Theory*, se han plasmado los resultados obtenidos en las propias representaciones gráficas que muestran la evolución de los dos sistemas de generación en función de los parámetros de diseño y de ola generada. Estos resultados sirven para poder observar de forma gráfica las diferencias existentes en relación a los tipos de generadores y características de ola generada y, además, para observar también el rango que abarca cada tipo de generador en función de las características propias de la generación. Se representan sobre el diagrama de la *Wavemaker Theory* los valores extremos obtenidos, correspondientes a longitudes de onda de 1,0 metros y 4,0 metros.

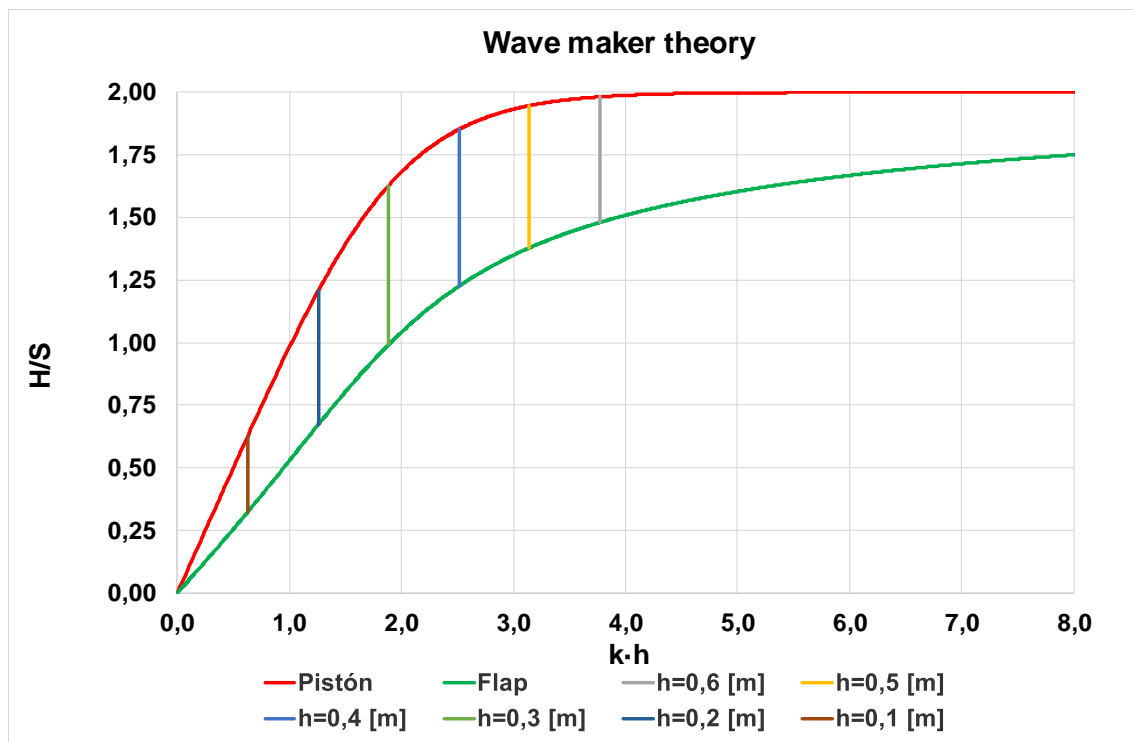


Gráfico 10: Wavemaker Theory para longitud de onda igual a 1,0 metros

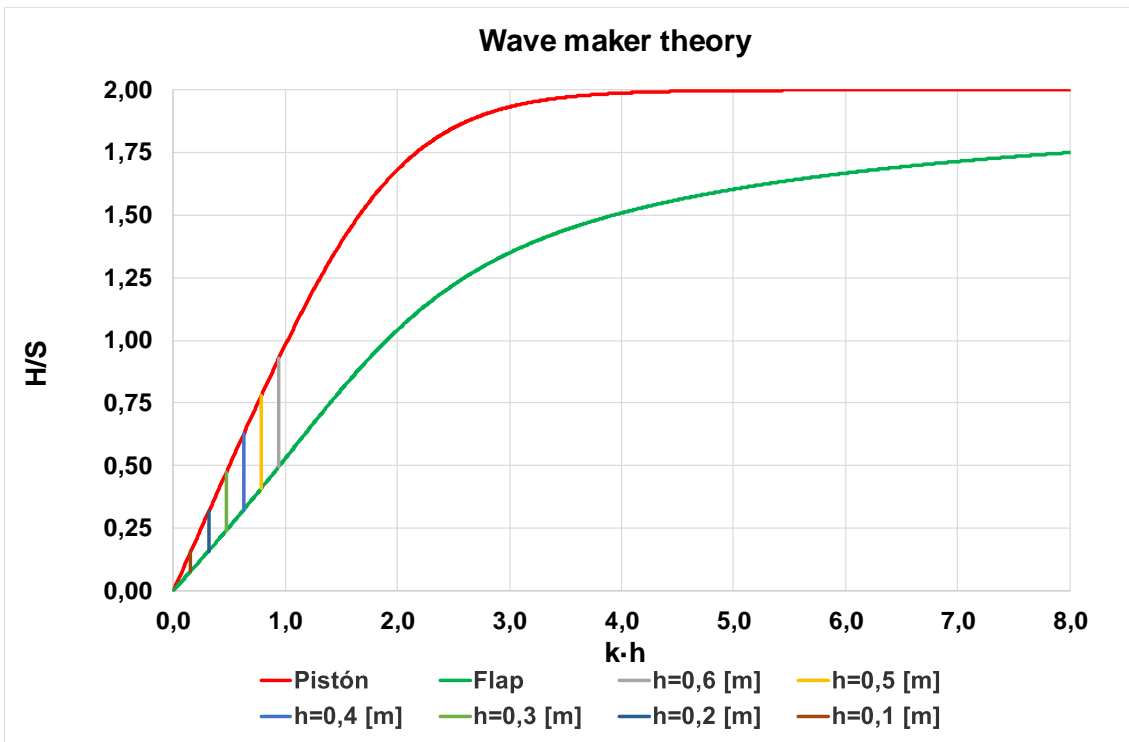
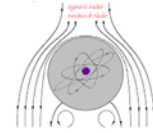


Gráfico 11: Wavemaker Theory para longitud de onda igual a 4,0 metros

Las diferencias en la relación entre la altura y la carrera del generador en ambos gráficos son claras, en las siguientes tablas se ven los valores numéricos, y se añaden también las diferencias porcentuales entre ellas.

Tabla 17: Relación H/S para $\lambda = 1,0$ metros

λ [m]	$\lambda = 1,0$ m					
h[m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H/Spistón (-)	1,982	1,947	1,852	1,627	1,206	0,626
H/Sflap (-)	1,480	1,378	1,225	0,991	0,672	0,323

Tabla 18: Relación H/S para $\lambda = 4,0$ metros

λ [m]	$\lambda = 4,0$ m					
h[m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H/Spistón (-)	0,929	0,780	0,626	0,471	0,314	0,157
H/Sflap (-)	0,496	0,409	0,323	0,240	0,158	0,079

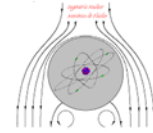


Tabla 19: Comparación relación H/S entre $\lambda = 1.0$ y $\lambda = 4.0$ metros

λ [m]	Comparación entre $\lambda = 1,0$ y $\lambda = 4,0$ m					
h[m]	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
H/Spistón (-)	213,35	249,62	295,85	345,44	384,08	398,73
H/Sflap (-)	298,39	336,92	379,26	412,92	425,32	408,86

8.4.1.3 Tipo de ola generada – Le Méhauté

Otra herramienta utilizada en la parte teórica de este trabajo es el diagrama de Le Méhauté (apartado 5.1.4 Diagrama de Le Méhauté). El objetivo es situar sobre el diagrama de Le Méhauté los valores que se han obtenido en los cálculos teóricos para poder conocer a qué tipo de ola se refiere cada una de las situaciones objeto de estudio en cada tipo de generador. Además, también se ha representado en el propio diagrama de Le Méhauté el área que abarca el oleaje que con mayor frecuencia se tiene en el área de Bimep. De este modo, se podrá conocer cuál de los dos tipos de generadores se encuentra más cerca de las condiciones de oleaje objeto de estudio. El diagrama sobre el que se representa la zona que abarca en él Bimep, es el siguiente.

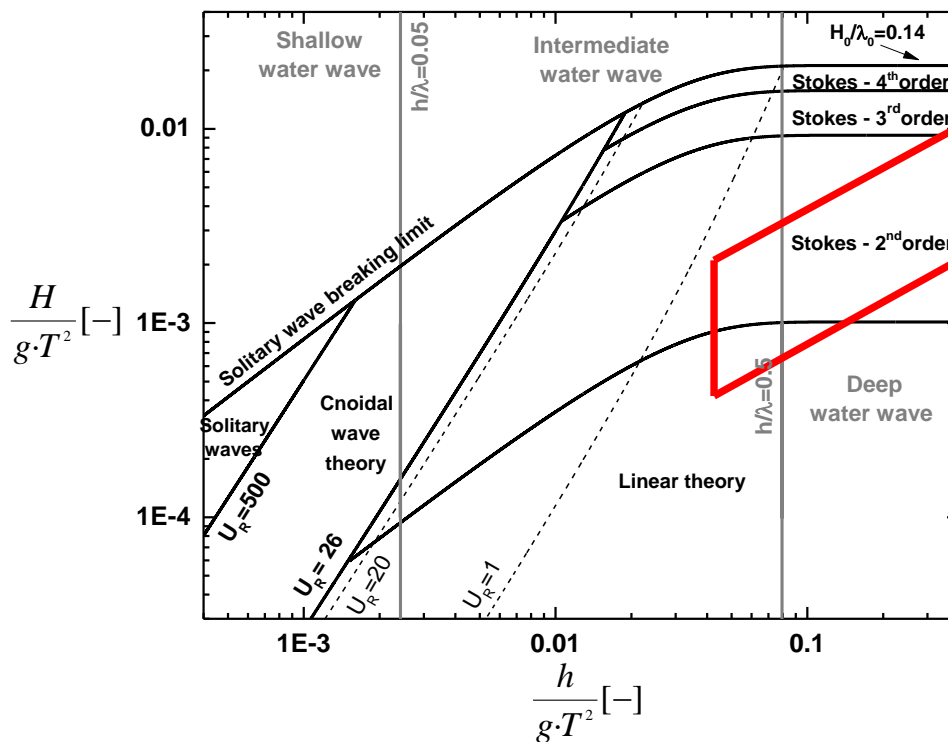
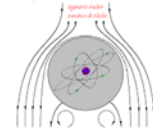


Ilustración 44: Diagrama de Le Méhauté con las condiciones de Bimep representadas



Tanto para los sistemas flap como para pistón, se han representado los puntos con valores de longitud de onda desde 0,5 a 4,0 metros, por considerarse los valores extremos que se pueden operar en el canal del laboratorio. De forma análoga. los calados que se contemplan varían desde 0,1 a 0,6 metros de profundidad.

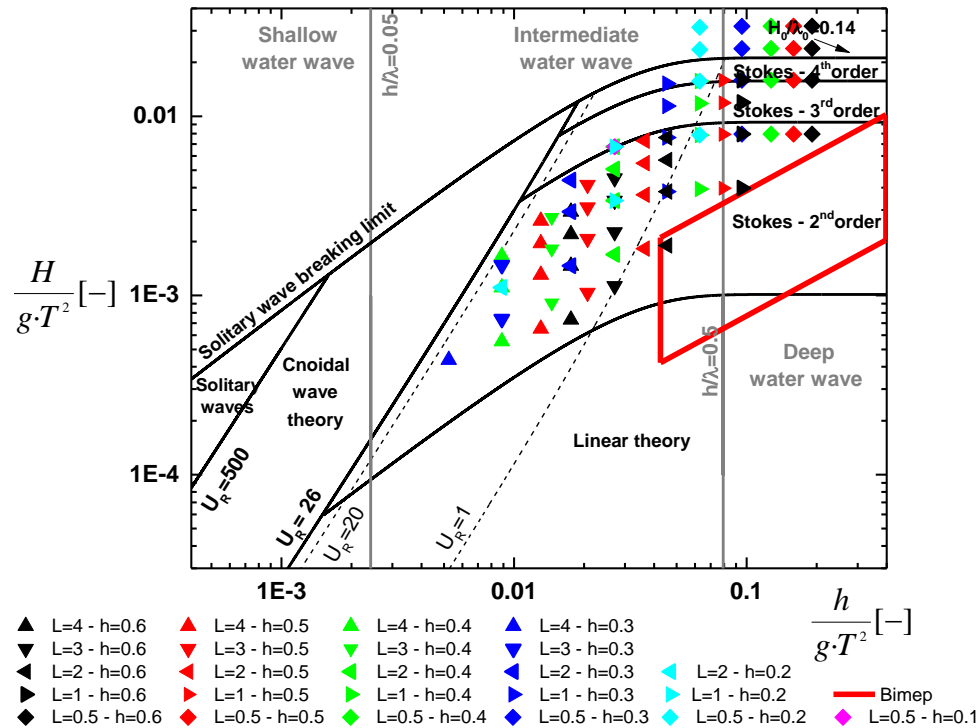


Ilustración 45: Diagrama de Le Méhauté para el generador de tipo Flap

En esta representación se observa que, a menor profundidad los puntos se desplazan hacia la izquierda, y a mayor altura de ola, los puntos se desplazan hacia arriba en el diagrama. Para el generador flap, aquellos valores que por limitaciones del propio sistema de generación no se pueden conseguir, se corresponden con la zona de menores calados en el canal y mayores alturas de ola. De ahí se deduce que, las restricciones debidas a la carrera máxima no van a condicionar el poder conseguir las condiciones de oleaje medidas en Bimep. Para este tipo de generador se observa también que siempre reproduce olas de profundidad relativa intermedia y profunda, lo cual también favorece para conseguir las condiciones de Bimep.

Cabe destacar también que el punto correspondiente a una longitud de onda de 0,5 metros y un calado de 0,1 metros no está representado en el diagrama. Esto se debe a que a la hora de realizar los cálculos queda fuera del mismo. Aun así, no es algo que resulte alarmante ya que resulta complicado trabajar con valores de calado tan bajos y como ya se ha dicho, se va a evitar trabajar con ese valor.

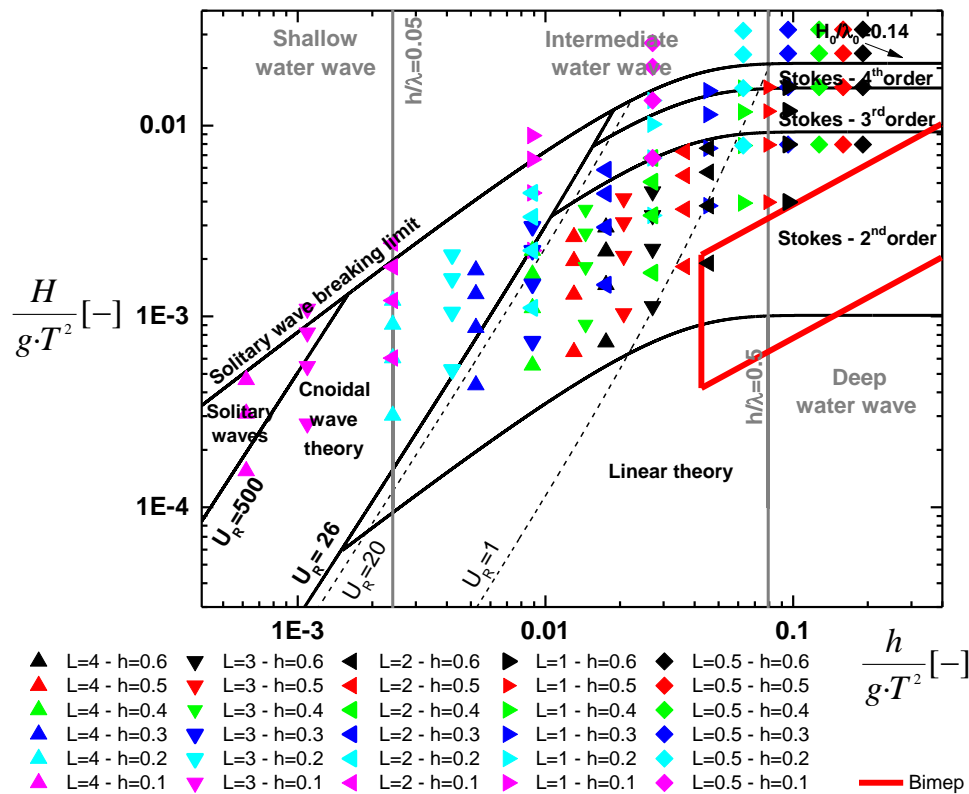
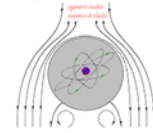
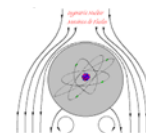


Ilustración 46: Diagrama de Le Méhauté para el generador de tipo Pistón

Para este tipo de generador únicamente se han descartado los puntos de menor calado ya que, con calados tan bajos, de 0,1 y 0,2 metros no se va a poder apreciar con claridad las olas que se quieren reproducir. De forma análoga al estudio realizado para el generador tipo flap, y con el objetivo de que la comparación entre ambos resultados sea efectiva, se han representado los puntos con valores de longitud de onda desde 0,5 a 4 metros y calados desde 0,1 a 0,6 metros de profundidad. En la Ilustración 46 se observa que los puntos son muy próximos a los valores obtenidos para el flap, que también se acercan a las condiciones de Bimep y que la mayoría de los puntos se ubican en aguas intermedias y profundas. Sin embargo, no hay que obviar que el pistón es capaz de generar olas clasificadas dentro del rango de poco profundas (representadas con puntos de color rosa en la Ilustración 47). Este hecho, y la posible elección de este tipo de sistema de generación, el pistón, puede dar lugar a llevar a cabo estudios adicionales que requieran este tipo de oleaje sin perjuicio a que se reproduzcan el tipo de oleaje medido en el área de Bimep.

Por tanto, realizando la comparativo entre ambos, se ve que el generador pistón ofrece un mayor abanico de posibilidades a la hora de conseguir distintas condiciones de oleaje, y que en la mayoría de los casos los resultados se sitúan en el intervalo de las teorías de Stokes. En el caso del flap, todas las parejas de parámetros, longitud de onda y calado, tienen un valor de Ursell



menor que 21,6 y se encuentran dentro del rango en el que el oleaje generado se corresponde con la teoría de Stokes.

8.4.1.4 Potencia teórica requerida por el generador

El último aspecto a considerar en la comparación de ambos generadores y que además influye en el diseño del actuador, es la potencia requerida para conseguir cada tipo de ola.

Para ello, se han llevado a cabo los cálculos teóricos necesarios (apartado 9.2.5 *Potencia necesaria para la generación del oleaje*) para ambos generadores trabajando con longitudes de onda de 1,0 a 4,0 metros, alturas desde 0,025 a 0,10 metros y calados de entre 0,6 y 0,1 metros. Como es lógico, el mayor interés de este estudio radica en conocer la potencia máxima requerida por el actuador que garantice la generación de la ola deseada.

A la hora de calcular la potencia, ésta viene definida por el hecho de que tanto la carrera del generador como la velocidad de la pala son directamente proporcionales a la altura de ola, y que éstas a su vez son proporcionales a la potencia. Por tanto, a mayor altura de ola, se requerirá mayor potencia. En el Gráfico 12 se muestran los resultados obtenidos para los generadores de tipo flap y pistón calculada la potencia para altura de onda de 0,1 metros y longitud de onda de 4,0 metros. En ambos casos se ha prescindido de los valores que resultan imposibles de alcanzar por las restricciones que se han explicado para ambos generadores.

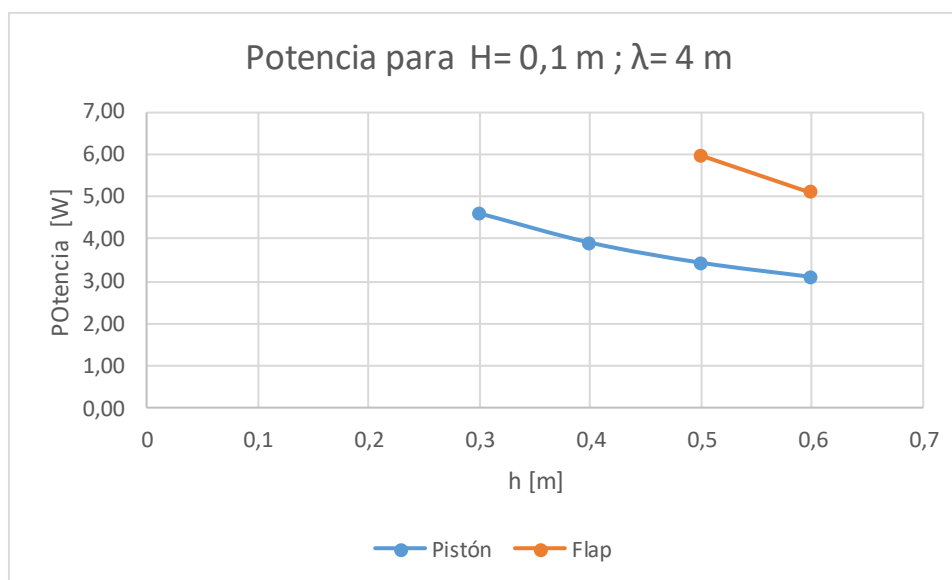
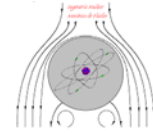


Gráfico 12: Potencia requerida para un pistón y flap para $H=0,10$ m y $\lambda=4,0$ m

Para los mismos valores de longitud de onda y altura, la potencia requerida por el flap es el doble. Como puede comprobarse, las potencias requeridas para los dos casos son pequeñas, el canal actual cuenta con un sistema que puede aportar hasta 750 W de potencia, por lo que, aunque



esto deba tenerse en cuenta, no resulta una condición determinante para decantarse por uno de los generadores. Sin embargo, debe tenerse en consideración que habrá que superar fuerzas de rozamiento debidas al movimiento de la pala con las paredes del canal. Además, cuando se da el movimiento lineal del pistón, en el retroceso la potencia debe de ser tal que supere la inercia del agua que está siendo movida. Por esos dos motivos, resulta imprescindible sobredimensionar la potencia del actuador.

Se plantea un caso extremo para el nuevo canal de olas, con una altura de ola de 0,20 m y una longitud de ola de 4,0 m. En el siguiente gráfico se representan los valores de potencia obtenidos. Con el objetivo de hacer una representación realista de los resultados, se han representado únicamente los valores de los casos que son posibles de realizarse. En este caso estos valores sólo se pueden obtener con el generador de tipo pistón, y por ello, no se ha representado con el generador de tipo flap.

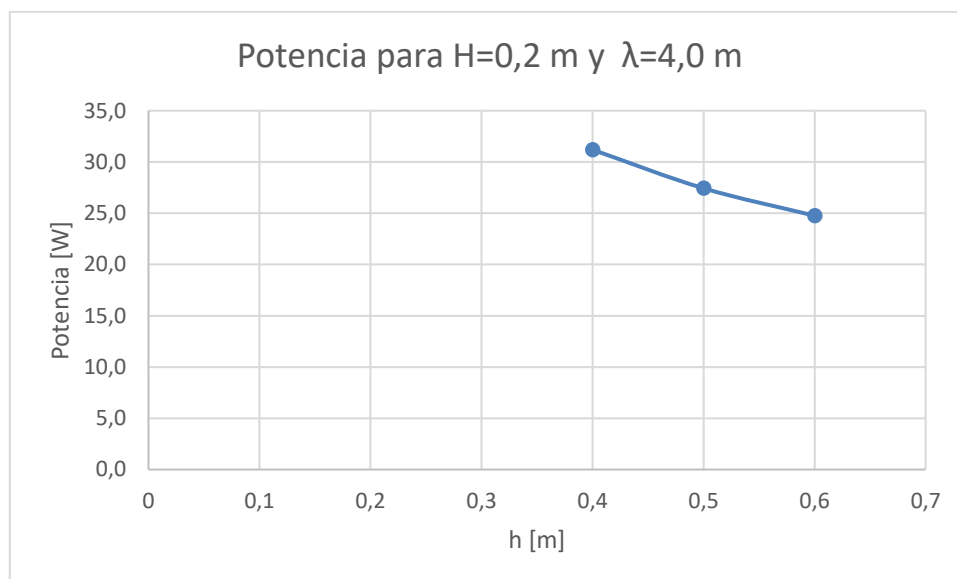
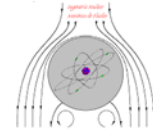


Gráfico 13: Potencia requerida para un pistón para $H=0,2$ m y $\lambda=4,0$ m

El valor máximo requerido en este caso es de aproximadamente 31,2 kW, como se ha dicho estas condiciones van a ser sólo posibles con un generador de tipo pistón, ya que el flap debido a las restricciones geométricas no es capaz de llegar a ellas. Para llegar a este valor se requiere una carrera del generador de 0,32 m.

8.4.1.5 Solución elegida

Una vez que se han estudiado todos estos factores, se decide instalar un sistema de generación de tipo pistón.



Por una parte, este sistema de generación impone menos restricciones geométricas que el sistema de tipo flap, por lo que permite la simulación de una mayor cantidad de casos de los que se han planteado en el análisis.

Además, por los resultados mostrados sobre el diagrama de Le Méhauté, se puede observar como, aunque el sistema de tipo flap se puede acercar algo más a la zona representada por Bimep, el sistema pistón permite un mayor rango de casos. Para futuros ensayos, el pistón va a permitir simular tsunamis, ya que dichas condiciones se encuentran en la zona de olas solitarias. Ofrece la posibilidad de generar mayor número de tipos de oleaje, tanto en aguas profundas como someras.

Otro aspecto a favor de la elección del pistón frente al flap es que su diseño resulta más sencillo. No hay inclinaciones que tener en cuenta y su montaje también es más sencillo también dado que no hay juntas en el fondo del canal.

8.4.2 Playa absorbedora

El sistema de absorción escogido para instalar en la zona de extinción del canal es pasivo, debido a la simplicidad de diseño y que es más económico que cualquier sistema activo. Consiste en una estructura permeable sobre la que romperán directamente las olas que se generen, es un equipo permeable. Está situada en uno de los extremos del canal a una distancia aproximada de 11,0 m del extremo opuesto del canal.

El tipo de perfil escogido es circular, ya que, reúne los dos principales requisitos deseados: i) que la superficie en el extremo final sea prácticamente plana, lo cual mejora la extinción de la ola y por tanto, otorga mejores resultados que otro tipo de disposiciones, y ii) que la pendiente sea muy pronunciada en contacto con el fondo de canal.

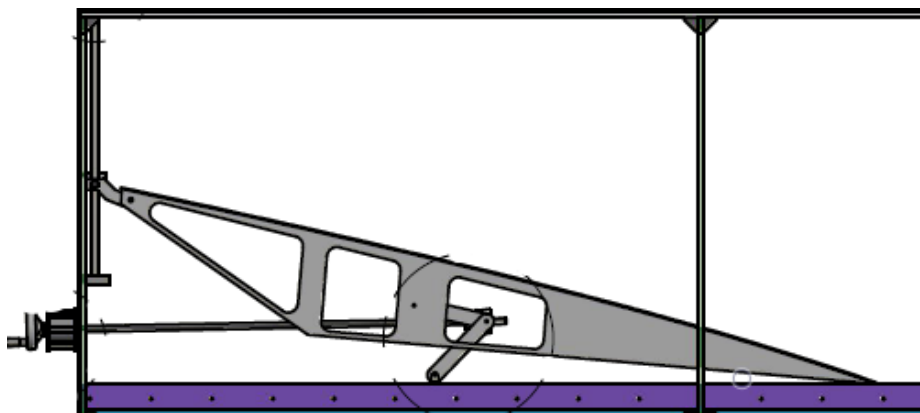


Ilustración 47: Diseño de la playa instalada en el canal

Como se observa en la Ilustración 48, la forma de la playa se asemeja a la de una parábola, pero ha sido desarrollada como una circunferencia, cuyo perfil elegido fue finalmente ajustado a la ecuación de una parábola, lo cual permitía una mayor facilidad a la hora de construirla. Las dimensiones de la playa se corresponden con 0,2 m (alto) x 1,5 m (largo) x 0,6 m (ancho).

En cuanto a la rugosidad de la superficie, ésta se ha diseñado completamente lisa. No se ha añadido ningún tipo de obstáculo ni piedra sobre ella ni se le ha realizado ningún orificio.

La estructura es móvil, se puede variar su inclinación, y así, la altura que alcanza respecto del fondo del canal. Tiene tres puntos de unión con la estructura que forma el canal, dos en la pared lateral y uno en el fondo. Entre el apoyo inferior de la pared y el del fondo hay un sistema de movimiento de tipo manivela. En cambio, el apoyo superior en la pared consiste en una guía por la que la playa asciende apoyándose en la pared. En la Ilustración 49 puede verse el montaje con algunos detalles y en el apartado de *Anexos* se añadirá el plano completo de la playa.

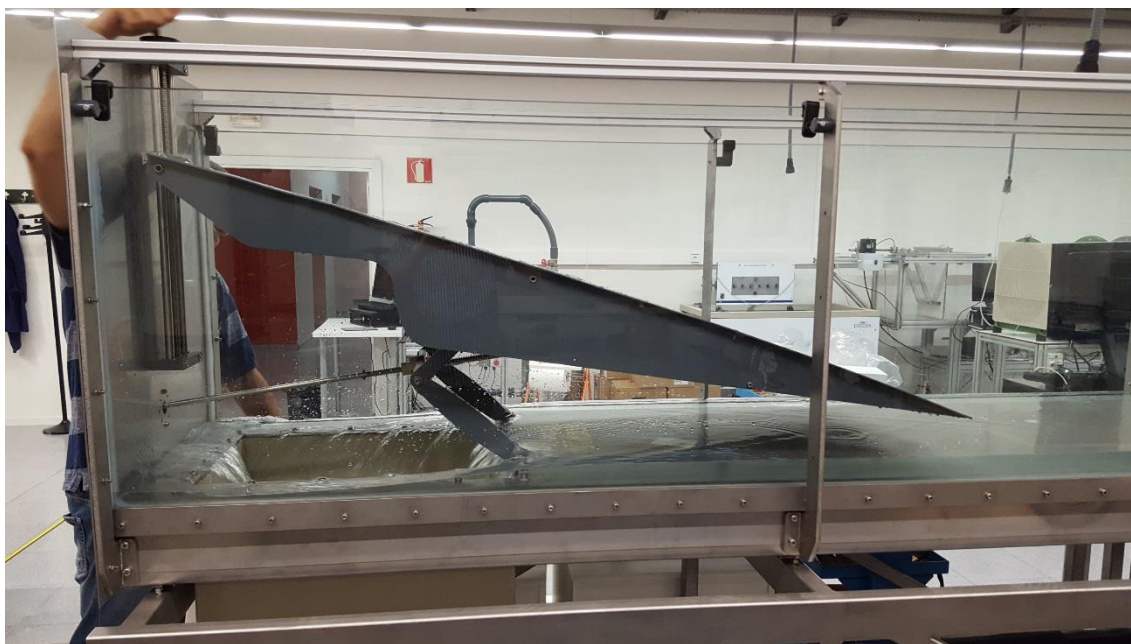


Ilustración 48: Sistema de absorción instalado en el canal

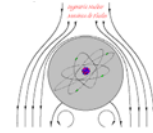


Ilustración 49: Detalle del guiado de la playa

8.4.3 Equipamiento auxiliar del canal

A lo largo de los perfiles superiores instalados en el canal se han instalado diferentes medidores de nivel. Estos medidores ultrasónicos sirven para medir el nivel del agua en la posición en que son colocados. Tienen un rango de detección de entre 30 y 500 mm y una zona de bloqueo, en la cual no es capaz de medir con calidad de entre 0 a 30 mm Su resolución es de 0,2 mm y tienen un retardo de 50 ms en su respuesta.



Ilustración 50: Medidor ultrasónico del nivel del agua

Este tipo de medidores funcionan midiendo el tiempo que tardan los impulsos ultrasónicos en llegar desde el sensor situado en los perfiles hasta la superficie del agua. En la Ilustración 52 se detallan las características geométricas de los medidores instalados en el canal.

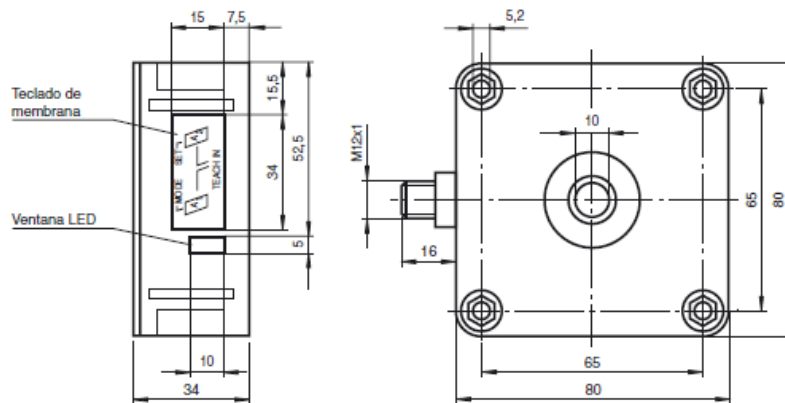


Ilustración 51: Características geométricas de los medidores de nivel

Para facilitar el llenado y vaciado del canal se han instalado tres bombas que conectan el canal con un depósito subterráneo. El depósito tiene una profundidad de 1 metro y una longitud de 8,0 metros. Para poder realizar la conexión entre depósito y canal se han realizado unos orificios en el suelo del laboratorio de 0,2 m de diámetro. Los centros de los orificios están situados a 1,6 metros el uno del otro.

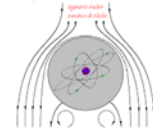
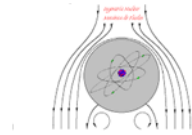


Ilustración 52: Orificios realizados para la conexión entre el canal y el depósito subterráneo

Existen tres puntos de conexión en el canal de olas. El primero está localizado en la zona de generación, mostrado en la Ilustración 54.



Ilustración 53: Conexión entre el tanque subterráneo y el canal en la zona de generación



En la Ilustración 55 puede verse una representación de la zona de extinción y la conexión entre el canal y el depósito subterráneo. Están señalados los puntos donde se realizarán las conexiones y está mostrado también la disposición de la bomba.

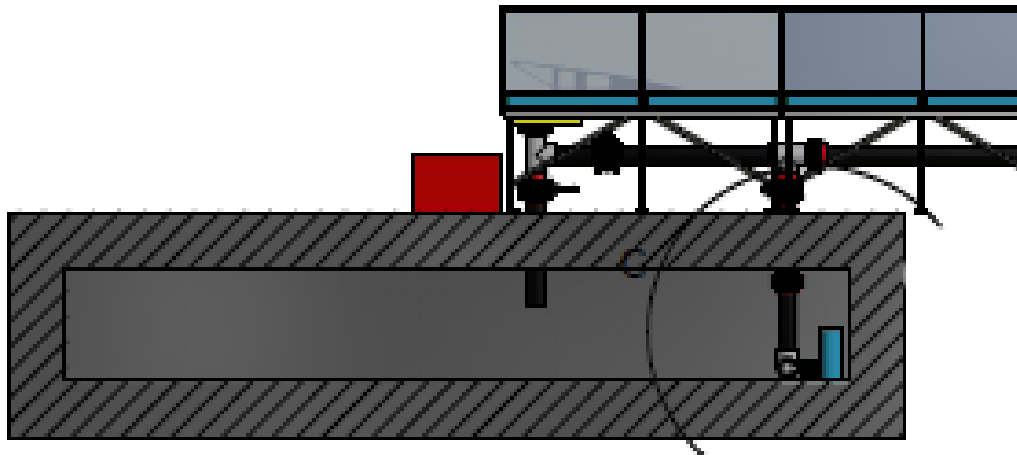


Ilustración 54: Depósito subterráneo y bombas

Las ventajas de instalar un sistema de bombeo son la rapidez con que tanto el llenado como el vaciado del canal se llevarán a cabo, además de asegurar el correcto nivelado del canal. El contar con un depósito también permite plantear proyectos más ambiciosos simulando cambios de nivel a lo largo del canal, es decir, que funcione como un canal de los utilizados en Ingeniería Oceánica.

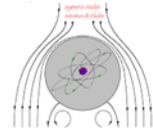


Ilustración 55: Conexión entre el depósito subterráneo y canal en la zona de extinción



Ilustración 56: Sistema de control de las bombas

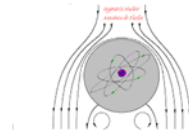
En cuanto a las bombas instaladas son proporcionadas por la empresa Pedrollo, designadas BC 15/50-ST, son bombas sumergibles bicanal realizadas en acero inoxidable. Su caudal máximo es de 750 l/min y admiten una temperatura de hasta 40 °C. Pueden sumergirse hasta una



profundidad de 5 m [27]. El resto de los datos técnicos de las bombas se puede ver en el catálogo adjunto en el apartado de *Anexos*.



Ilustración 57: Bomba BC 15/50-ST [27]



9 Metodología y cálculos realizados

9.1 Diagrama de Gantt

En este apartado se muestra la planificación de las distintas tareas que se han llevado a cabo a lo largo del proyecto. Se muestra en el diagrama de Gantt, herramienta que se utiliza para hacer seguimiento de los proyectos, y en el que se muestra el nombre de las fases y tareas y en la parte derecha la duración de las mismas.

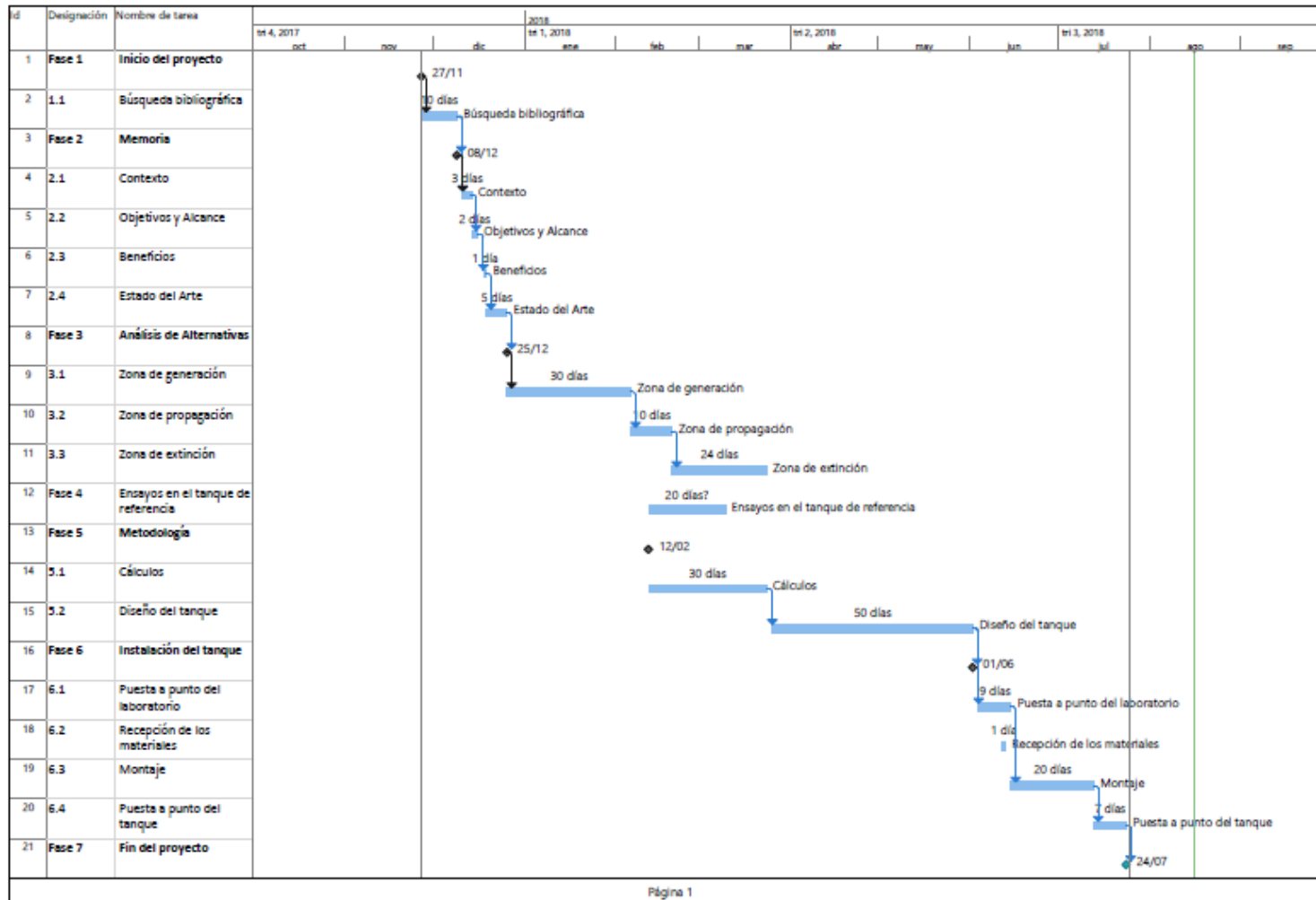
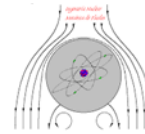
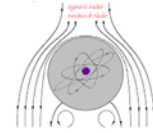


Ilustración 58: Diagrama de Gantt del proyecto



9.2 Cálculos

En este apartado se van a explicar en detalle todos los cálculos que se han realizado previos al diseño y a la instalación del canal. Los primeros cálculos están directamente relacionados con el recurso en la zona de estudio, Bimep. A partir de los datos obtenidos por la boya situada en ella se tratarán esos datos con una herramienta dispuesta por el IH Cantabria, que después se explicará, para determinar unos resultados medios. Además, se definirán las condiciones de oleaje máximas y mínimas para representarlos en el diagrama de Le Méhauté y determinar en qué región del gráfico se sitúa la región y cuál es la teoría de olas más adecuada.

A continuación, se van a analizar los resultados obtenidos de diversos ensayos experimentales realizados en el canal con el que se ya se contaba en el laboratorio. Aunque la precisión de un canal de estas características es mucho menor que la que se tiene en el nuevo canal, para algunas condiciones de mar ha sido útil el estudio en él.

9.2.1 Datos oceánicos

Para el procesado de datos se utiliza la herramienta AMEVA, que es una extensión de Matlab.

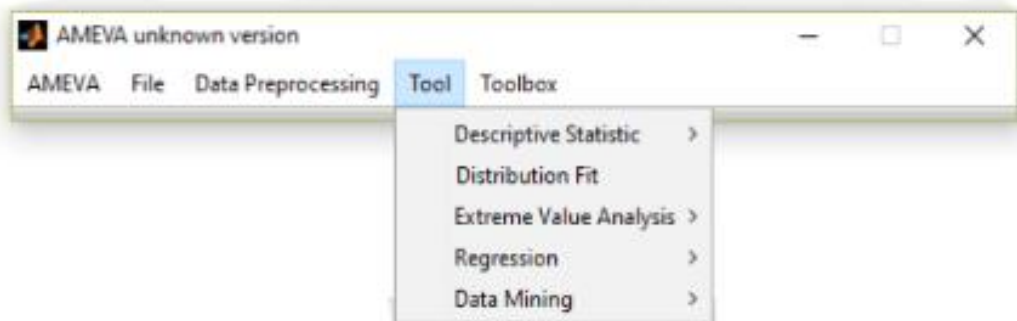


Ilustración 59: Barra de herramientas de AMEVA

Para obtener el histograma de cada variable se selecciona la herramienta *Descriptive Statistic*.

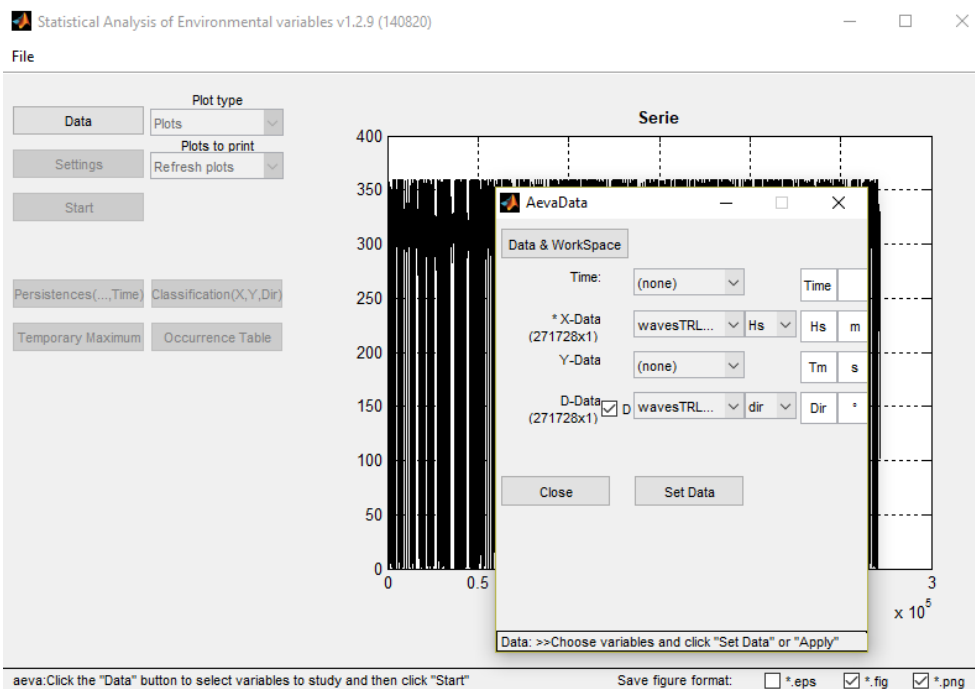
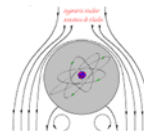


Ilustración 60: Interface de selección de datos AMEVA

Resultados históricos de altura significativa de ola.

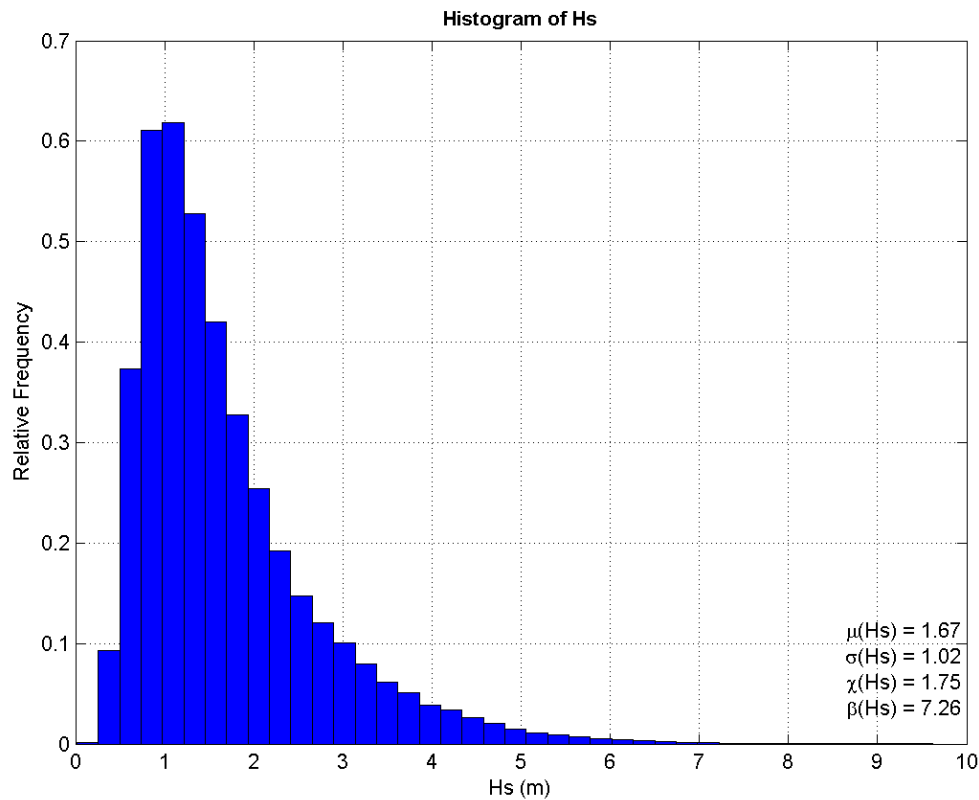


Gráfico 14: Histograma altura significativa Bimep (1985-2015)

Las conclusiones que se extraen de este cálculo son que la media de la altura significativa de ola es de 1,67 metros, siendo el intervalo de olas de entre 1,0 y 1,5 metros el que más se da. El valor máximo real de altura significativa de ola registrado es de 9,62 m.

También se obtienen la rosa de los vientos para conocer las direcciones de las olas y un histograma en 3D que combina los datos de altura y dirección de ola con la densidad de ocurrencia.

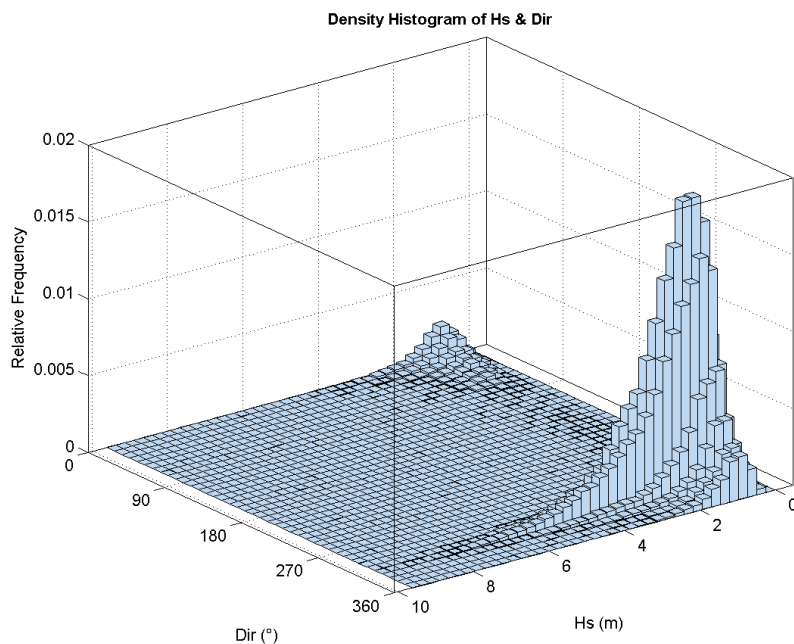


Gráfico 15: Histograma densidad de frecuencia (altura-dirección)

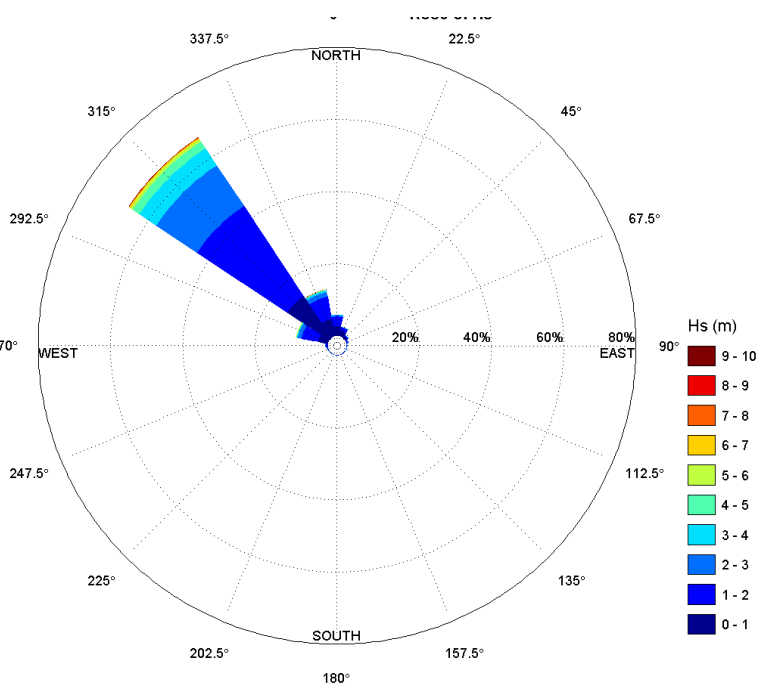
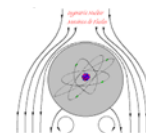


Gráfico 16: Rosa de los vientos Bimep

Para que los resultados sean próximos a la realidad, se descartan el 20% de los casos que ocurren, el 10% de las alturas más bajas y el 10% de las más altas. Esto se hace debido a que se quiere realizar un estudio de las condiciones de oleaje medias y de modo factible para la reproducción en el laboratorio. Se descartan porque se tratan de casos puntuales. De esta



manera, el valor máximo de altura significativa con el que se trabaja es de 2,5 metros y mínimo de 0,5 metros.

La dirección, que se repite en casi el total de los casos, es a 315° con olas que llegan del Noroeste. Se hace lo mismo para el periodo energético de ola.

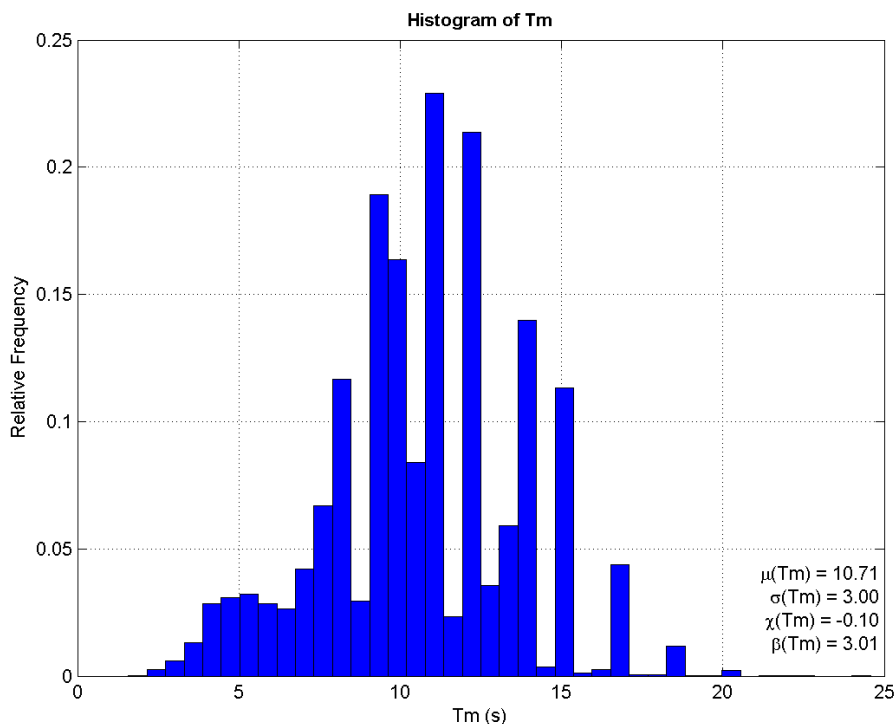


Gráfico 17: Histograma periodo energético Bimep (1985-2015)

En cuanto al periodo energético de ola, se va a trabajar de la misma manera, con el 80% de los casos, los que más se dan. La media del periodo energético es de 9,03 segundos, siendo el intervalo que ocurre con mayor frecuencia en el que incluye periodos entre 8 y 9 segundos. Así, descartando el 20% de los casos que ocurren en menos ocasiones, el valor máximo de periodo para el análisis va a ser de 11 segundos y el mínimo de 5 segundos.

Interesa también conocer los datos de profundidad para trabajar posteriormente con el diagrama de Le Méhauté. Estos datos no se pueden obtener con el software Ameva, se obtienen de las publicaciones realizadas por el IH de Cantabria de caracterización de Bimep. La profundidad máxima que se alcanza en la zona delimitada por las boyas de balizamiento en Bimep es de 108,19 metros y la mínima de 45,95 metros. Como antes, para trabajar de una forma más genérica se trabaja con unos intervalos más reducidos, correspondientes a un 10% inferior, por lo que el valor máximo es de 97,37 metros y el mínimo de 50,54 metros.

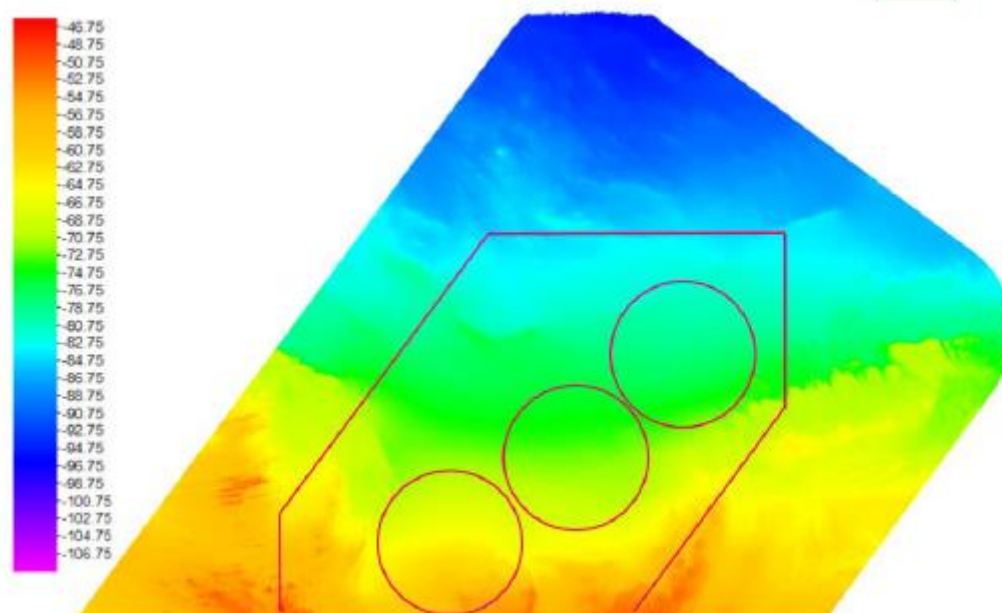


Ilustración 61: Estudio batimétrico de Bimep [26]

A modo de resumen, en la Tabla 20 quedan reflejados todos estos valores, que son los datos iniciales para trabajar el siguiente punto: el diagrama de Le Méhauté.

Tabla 20: Resumen parámetros oceánicos de Bimep

Parámetro	Valor máximo	Valor mínimo
H_s (m)	2,5	0,5
T (s)	11,0	5,0
h (m)	-97,37	-50,54

9.2.2 Diagrama de Le Méhauté

Con los valores máximos y mínimos que se han obtenido en el apartado anterior, se construye un paralelogramo que abarca todos los estados de mar que pueden darse en la zona de estudio.

Para el eje de abscisas la relación es $(h/g \cdot T^2)$ y en el eje de ordenadas $(H/g \cdot T^2)$, siendo h el calado, T , el periodo, g , la gravedad y H la altura de ola.

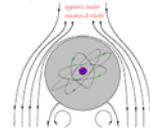


Tabla 21: Puntos de Bimep para el diagrama de Le Méhauté

PUNTOS BIMEP		
	$(h/g \cdot T^2)$	$(H/g \cdot T^2)$
hmín, Hmín - Tmáx	0,043	0,0004
hmín, Hmáx - Tmáx	0,043	0,0021
hmáx, Hmáx - Tmín	0,397	0,0102
hmáx, Hmín - Tmín	0,397	0,0020

De esta manera se están representando los 4 segmentos que forman el cuadrilátero. Ahora se debe representar sobre el gráfico de Le Méhauté original.

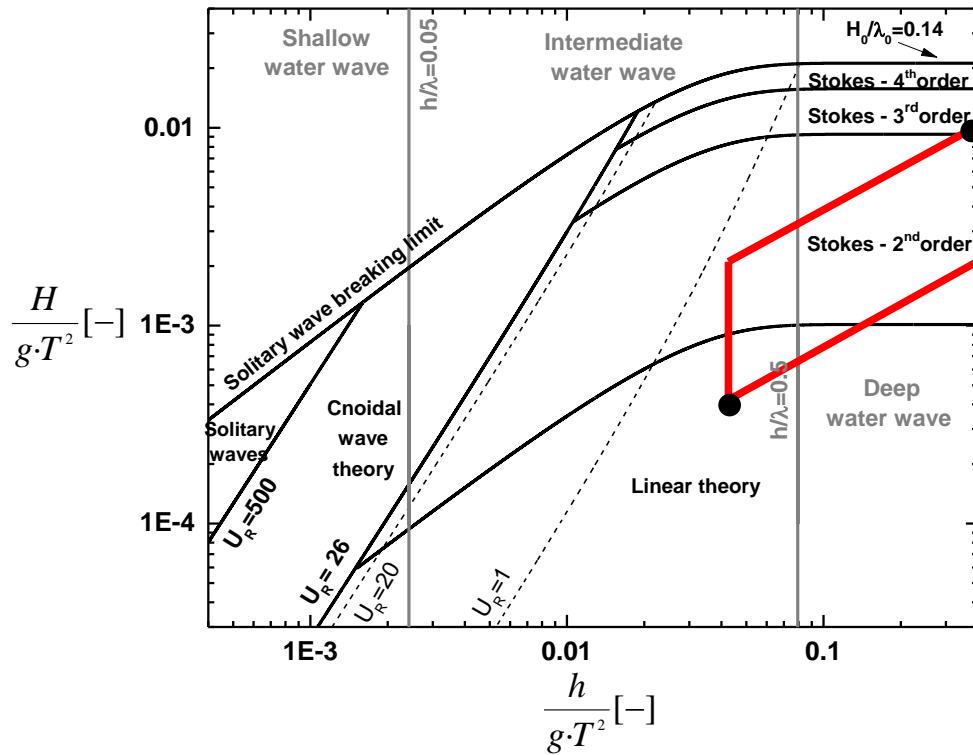
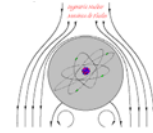


Ilustración 62: Diagrama de Le Méhauté con Bimep representado



La zona roja representa los estados límites de mar que pueden darse en la zona de estudio especificada. Además de asegurar que se está trabajando correctamente, en aguas profundas e intermedias, esta representación sirve para tener la referencia de a qué lugar del diagrama de Le Méhauté debe llegar el generador de olas que se ha incorporado al canal.

Una vez que se representa el diagrama, se realizan una serie de comprobaciones matemáticas.

El número de Ursell es:

$$Ur = \frac{H \cdot \lambda^2}{h^3}$$

Para calcular la longitud de ola se utiliza la ecuación de la *Wavemaker Theory* para aguas intermedias.

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\lambda}\right)$$

En este caso, se van a analizar los valores límite, que coinciden con las parejas de: i) profundidad máxima y periodo mínimo y, ii) profundidad mínima y periodo máximo.

La ecuación anterior, dado que es una ecuación implícita en lo que a la variable λ se refiere, debe resolverse mediante iteración. Los resultados obtenidos de longitud de onda son los siguientes.

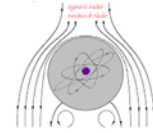
Tabla 22: Valores de longitud de onda y número de Ursell

h (m)	T (s)	λ (m)	h/λ	Ur (-)	
				$H_{\text{máx}}$ (m)	$H_{\text{mín}}$ (m)
50,545	11	178,272	0,284	0,61530	0,12310
97,371	5	39,033	2,49	0,00413	0,00083

Por lo tanto, queda comprobado que todos los valores que puedan encontrarse entre los extremos del área de Bimep son menores de 21,6, por lo que se corrobora también que el área de Bimep está comprendido entre aguas intermedias y profundas.

9.2.3 Escala de laboratorio

El siguiente paso que se tiene que seguir en cualquier ensayo en laboratorio, con un prototipo es el de obtener el factor de escala (F.E.), definido como la relación entre la altura de ola del canal



y la altura de ola, máxima o mínima, del área de Bimep, para así aplicarlo a cada uno de los parámetros. La relación de semejanza geométrica es lineal.

Tabla 23: Factor de escala calculado en base a las alturas de ola medida en Bimep y deseada en el canal

	$H_{canal}/H_{mín}$	$H_{canal}/H_{máx}$
H = 0,10 m	0,20	0,04
H = 0,075 m	0,15	0,03
H = 0,05 m	0,10	0,02
H = 0,025 m	0,05	0,01
H = 0,20 m	0,40	0,08

Partiendo de los valores de λ , T y H considerados como extremos de Bimep, se obtiene la relación entre estos parámetros, correspondiéndose la primera de ellas con el extremo inferior que representa Bimep en el diagrama Le Méhauté, y la segunda, con el extremo superior.

- $H_{mín} = 0,5 \text{ m}$; $T_{e \text{ máx}} = 11 \text{ s}$; $\lambda = 178,272 \text{ m}$ $\rightarrow \lambda/H = 358,78$ [Extremo inferior]
- $H_{máx} = 2,5 \text{ m}$; $T_{e \text{ mín}} = 5 \text{ s}$; $\lambda = 39,033 \text{ m}$ $\rightarrow \lambda/H = 15,61$ [Extremo superior]

A continuación, para conocer las propiedades de las olas semejantes a generar en el canal de olas, se considerarán los valores de altura de ola anteriormente seleccionados, ente 0,025 metros y 0,1 metros, y además, se trabajará también con el valor de altura de ola de 0,2 m, considerado como el caso extremo a conseguir en el nuevo canal. Una vez conocido el F.E. el cálculo es directo.

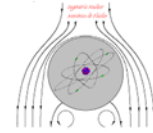


Tabla 24: Longitudes de onda semejantes a obtener en el canal para alcanzar los valores extremos definidos en Bimep.

	Extremo inferior	Extremo superior
	λ [m]	λ [m]
H = 0,10 m	35,88	1,56
H = 0,075 m	26,91	1,17
H = 0,05 m	17,94	0,78
H = 0,025 m	8,97	0,39
H = 0,20 m	71,76	3,12

Tal y como puede observarse existen ciertas condiciones que serán imposibles de reproducir en el canal, dado que las longitudes de onda obtenidas superan con creces las dimensiones del mismo. De hecho, en caso de respetar el criterio que exigía longitudes de onda inferiores a 4,0 metros, no se podrían reproducir las condiciones de Bimep correspondientes al extremo inferior. Dicho de otra forma, para garantizar condiciones semejantes a las de Bimep correspondientes al extremo inferior, y cumplir al mismo tiempo que las longitudes de onda no superen los 4 metros, deberían de producirse olas con alturas inferiores a los 0,0125 metros.

Siendo la relación entre el periodo del canal, considerado como modelo, y el periodo de Bimep, considerado como prototipo, la que se define a continuación:

$$T_{canal} = \sqrt{F \cdot E} \cdot T$$

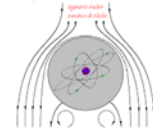


Tabla 25: Periodo del canal aplicando factor de escala

	Extremo inferior	Extremo superior
	$T_{m\acute{a}x\ canal} [s]$	$T_{m\acute{i}n\ canal} [s]$
H = 0,10 m	4,92	1,00
H = 0,075 m	4,26	0,87
H = 0,05 m	3,48	0,71
H = 0,025 m	2,46	0,50
H = 0,20 m	6,96	1,41

De los resultados obtenidos para el periodo, se podrían desprender las mismas conclusiones, dado que bajo las condiciones de diseño impuestas.

9.2.4 Ensayos experimentales

Se realizan distintos ensayos en el canal de referencia con calados de entre 0,1 y 0,4 metros para comprobar si la pala es llegar a alcanzar esas velocidades con las condiciones que se han establecido.

- $h = 0,2\ m$
- $S = 0,05\ m$; $S = 0,15\ m$
- $V = 0,1\ m/s$
- $a=d = 1\ m/s^2$

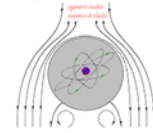


Tabla 26: Comparación entre los resultados teórico y experimentales, con profundidad igual a 0,2 m

Calado=0,2 m	Teórico	Experim	Error	Teórico	Experim	Error
S [m]	0,05			0,15		
H [m]	0,05	0,045	10,00%	0,053	0,05	5,66%
λ [m]	1,232	1,1256	8,63%	3,77	3,32	11,93%
T [s]	1,012	0,9484	6,28%	2,74	2,20	19,71%
V pala [m/s]	0,10	0,1054	6,46%	0,10	0,136	24,77%
P [W]	3,1	3,6	16,13%	9,2	5,33	42,7%

Los errores obtenidos demuestran que el canal de referencia no alcanza las condiciones esperadas. De la Tabla 26 se desprende además que a medida que el volumen de agua a desplazar es mayor, es decir, que el carrera de la pala es mayor, el error aumenta. Este hecho se debe a que el actuador del canal de referencia no alcanza la potencia suficiente, tal y como indica el error calculado en la velocidad de la pala (24,77%); el actuador no trasfiere la potencia necesaria que haga que la pala alcance la velocidad requerida.

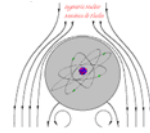
9.2.5 Potencia necesaria para la generación del oleaje

Para llegar a calcular la potencia necesaria para la generación de olas la forma en que se ha trabajado consiste en seguir una serie de pasos partiendo de la *WaveMaker Theory*.

Se fijan valores de calado, longitud de onda y de altura de ola, para mostrar uno de los casos se escogen los siguientes valores.

- $h = 0,3$ m
- $\lambda = 4$ m
- $H = 0,1$ m

$$k \cdot h = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda \cdot h} = 0,471$$



Utilizando la *WaveMaker Theory*, en este caso para un generador de tipo pistón.

$$\frac{H}{S} = \frac{2 \cdot (\cosh 2 \cdot k_p \cdot h - 1)}{(\sinh 2 \cdot k_p \cdot h) + (2 \cdot k_p \cdot h)} = 0,471$$

Se calcula el periodo de la ola.

$$T = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{9,81 \cdot \tanh(k \cdot h)}} = 2,415 \text{ s}$$

La carrera del generador.

$$S = \frac{H}{(H/S)} = 0,21 \text{ m}$$

La velocidad del generador.

$$V = \frac{2 \cdot S}{T} = 0,176 \text{ m/s}$$

La ecuación que se utiliza para estimar la fuerza, calculada en Newton requerida es:

$$F = \frac{\rho \cdot g \cdot S^2 \cdot h^2}{4 \cdot x} \cdot k$$

siendo x la anchura del canal.

Para obtener el valor de la potencia, se debe multiplicar el valor de la fuerza por la velocidad de la ola. Así, la ecuación para el cálculo de la potencia en vatios es:

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot S^2 \cdot h^2}{4 \cdot x} \cdot k \cdot U = F \cdot U$$

Este proceso se sigue con todos los casos planteados, los conjuntos de valores de calado, altura y longitud de onda que se han planteado a lo largo del proyecto y cuyos resultados se han ido mostrando en los distintos apartados.

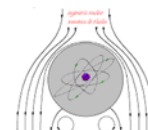
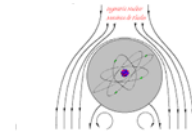


Tabla 27: Cálculos de potencia para distintos calados y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=1,0$ m

				h=0,6m	h=0,5m	h=0,4m	h=0,3m	h=0,2m	h=0,1m
H	0,100 m	Pistón	S [m]	0,050	0,051	0,054	0,061	0,083	0,160
			V[m/s]	0,126	0,128	0,134	0,150	0,191	0,298
			P [W]	2,966	2,170	1,607	1,311	1,350	1,950
		Flap	S [m]	0,068	0,073	0,082	0,101	0,149	0,310
			V[m/s]	0,169	0,181	0,203	0,246	0,343	0,577
			P [W]	1,781	1,529	1,386	1,448	1,954	3,551
	0,075 m	Pistón	S [m]	0,038	0,039	0,041	0,046	0,062	0,120
			V[m/s]	0,095	0,096	0,101	0,113	0,143	0,223
			P [W]	1,251	0,916	0,678	0,553	0,569	0,822
		Flap	S [m]	0,051	0,054	0,061	0,076	0,112	0,232
			V[m/s]	0,127	0,136	0,152	0,185	0,257	0,433
			P [W]	0,751	0,645	0,585	0,611	0,824	1,498
	0,050 m	Pistón	S [m]	0,025	0,026	0,027	0,031	0,041	0,080
			V[m/s]	0,063	0,064	0,067	0,075	0,096	0,149
			P [W]	0,371	0,271	0,201	0,164	0,169	0,244
		Flap	S [m]	0,034	0,036	0,041	0,050	0,074	0,155
			V[m/s]	0,084	0,090	0,101	0,123	0,172	0,289
			P [W]	0,223	0,191	0,173	0,181	0,244	0,444
0,025 m	Pistón	S [m]	0,013	0,013	0,014	0,015	0,021	0,040	
		V[m/s]	0,032	0,032	0,034	0,038	0,048	0,074	
		P [W]	0,046	0,034	0,025	0,020	0,021	0,030	
	Flap	S [m]	0,017	0,018	0,020	0,025	0,037	0,077	
		V[m/s]	0,042	0,045	0,051	0,062	0,086	0,144	
		P [W]	0,028	0,024	0,022	0,023	0,031	0,055	



Se han calculado los valores de amplitud de pala, velocidad y potencia para esos valores de parámetros porque se conoce que estas son posibles de ser obtenidas en el canal de referencia. Sin embargo, en el nuevo canal es probable que se puedan conseguir olas de 0,15 y 0,2 m de altura.

Tabla 28: Potencia requerida para olas de $H=0,2$ m

			h=0,6m	h=0,5m	h=0,4m	h=0,3m	h=0,2m	h=0,1m	
H	0,200 m	Pistón	S [m]	0,215	0,257	0,319	0,425	0,637	1,273
			V[m/s]	0,231	0,260	0,298	0,352	0,439	0,628
			P [W]	24,759	27,432	31,193	36,697	45,697	65,366
		Flap	S [m]	0,403	0,489	0,619	0,835	1,263	2,541
			V[m/s]	0,432	0,495	0,577	0,691	1,263	2,541
			P [W]	40,651	47,609	56,819	69,548	89,197	129,932

El mayor valor de potencia que tiene que conseguir el generador de tipo pistón es de 31,193 W para una profundidad de 0,4 m. Los otros casos son imposibles de realizarse debido a la baja profundidad que incluyen.

9.2.6 Playa

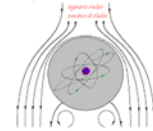
Para la playa se han propuesto distintos diseños antes de decidir cuál era más conveniente.

1. Diseño en forma de parábola

Siguiendo la ecuación propuesta por el Dr. S. Neelamani et al. (2012)

$$y^2 = 26,6 \cdot x$$

Se ajusta a la forma de una parábola con el programa Origin.



Model		Parabola	
Equation		$y = A + B \cdot x + C \cdot x^2$	
Reduced Chi-Sqr		47.15905	
Adj. R-Square		0.98213	
		Value	Standard Error
D	A	28.23307	3.47367
	B	0.19721	0.01072
	C	-5.84046E-5	6.90568E-6

Ilustración 63: Valores parámetros parábola S. Neelamani [20]

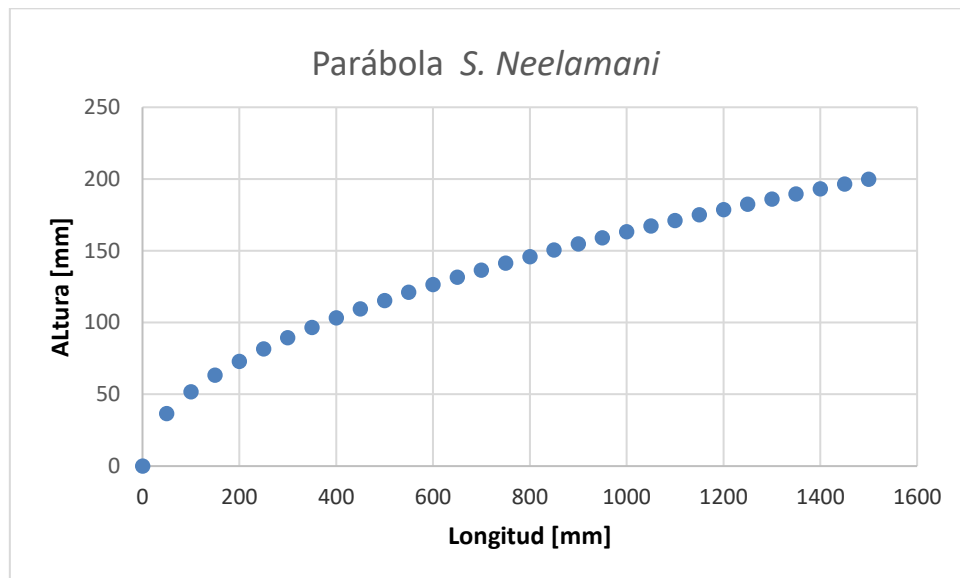


Gráfico 18: Diseño parábola S. Neelamani

2. Diseño circular

Se diseña una circunferencia con los siguientes parámetros.

Tabla 29: Parámetros diseño circunferencia de la playa

x	-11.000	centro	-5.411,1
y	177,8	radio	5.611,2212
τ xy	500	σ máx	200,121187
		σ mín	-11.022,3212

Se realizan los parámetros a una parábola.

Model		Parabola	
Equation		$y = A + B*x + C*x^2$	
Reduced Chi-Sqr		0.0278	6
Adj. R-Squ		0.9999	
		Value	Standard Er
B	A	199.8834	0.11138
	B	0.00205	3.55074E-4
	C	-9.18052E	2.35527E-7

Ilustración 64: Valores parámetros diseño circunferencia

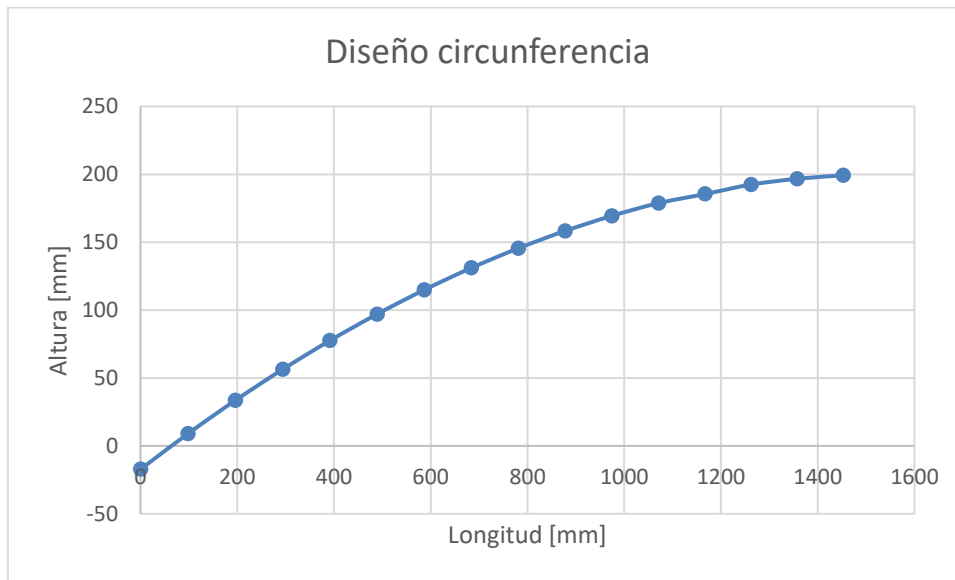
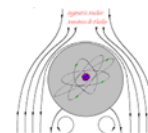


Gráfico 19: Diseño circunferencia para la playa

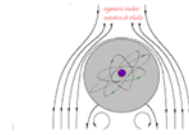


10 Presupuesto

El presupuesto de este proyecto incluye el análisis de datos de algunos ensayos en el canal de referencia llevados a cabo en el laboratorio. Se han incluido los viajes realizados a la universidad así como la amortización del software y el ordenador portátil que han sido utilizados. Como costes indirectos se ha considerado el 7% del coste total. El presupuesto queda resumido en la siguiente tabla.

Tabla 30: Presupuesto completo instalación del canal

PRESUPUESTO					
	Concepto	Cantidad	Ratio horario (€/h)	Horas	TOTAL
Mano de obra	Ingeniero Junior	1	10	500	5.000,00 €
	Ingeniero Senior	2	25	500	25.000,00 €
Desplazamientos	Getxo-Bilbao				244,00 €
Material	Portátil	1	0,08	470	37,60 €
	Fotocopias				40,00 €
TOTAL					30.321,60 €
Costes indirectos					2.122,512 €
COSTE TOTAL					32.354,112 €

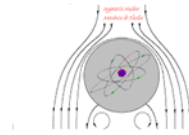


11 Conclusiones

En este apartado se han recopilado las conclusiones más importantes extraídas tras la realización de este proyecto. La primera conclusión obtenida después de recopilar información, leer diferente bibliografía y profundizar en el estudio de las energías marinas, específicamente en la energía undimotriz, es el alto potencia de este tipo de energía renovable. La energía undimotriz puede ser considerada como candidata para contribuir a la mitigación de la actual crisis energética existente. Por tanto, se requieren mayor inversión y esfuerzos para el desarrollo de este tipo de energía, así como una mayor convicción por parte de la ciudadanía y especialmente de las autoridades, para que esos propósitos de futuro puedan materializarse.

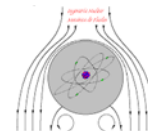
A continuación, se detallan las conclusiones a las que se han llegado tras realizar el proyecto:

- Se han analizado los datos oceánicos de Bimep trabajado con el software Ameva para obtener valores medios con los que realizar el análisis teórico. Los valores máximos y mínimos para cada parámetro son, respectivamente, i) altura de olas, 2,5 m y 0,5 m; ii) periodo de ola, 11,0 s y 5,0 s; iii) profundidad, -97,37 m y -50,54 m. Se considera Bimep, en función de la profundidad relativa, un área con olas intermedias y profundas. Por lo tanto, las teorías de olas que resultan más convenientes de utilizar para su estudio son la Teoría Lineal de olas y la teoría de Stokes de segundo orden.
- Después de analizar los generadores de olas que más se utilizan en los canales de olas, se ha tomado la decisión de instalar un generador de tipo pistón en el canal. La elección se basada en que este tipo de generador proporciona poder simular un mayor rango de tipos de olas, en comparación con el tipo flap.
- En cuanto al sistema de absorción, se ha decidido instalar un sistema pasivo, una playa, con perfil parabólico. El perfil parabólico ha sido obtenido de uno circular con radio igual a 5611,2 milímetros, ajustado a la ecuación de una parábola.
- Los diferentes ensayos que se han llevado a cabo en el canal de referencia han sido muy útiles para verificar cada paso seguido en los cálculos teóricos de la potencia. Se ha comprobado que los resultados experimentales y teóricos no coinciden, dado que para una profundidad de 0,1 metros el error es del 16,3%. Además, a mayor profundidad el error aumenta hasta significativamente, habiendo medido que a $h=0,15$ metros el error es superior al 40%.
- Tras realizar los cálculos teóricos, el valor máximo de carrera requerido por el pistón para alcanzar las condiciones de oleaje extremas establecidas, es de 0,32 m. Este valor se



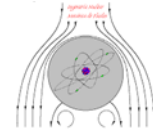
requiere para una longitud de onda de 4 m, una profundidad de 0,4 m y altura de ola de 0,2 m.

- En cuanto a la potencia requerida por el sistema de generación, para las condiciones extremas el valor calculado es de 31,2 W. De este modo, el generador será capaz de obtener todas los tipos de ola para los que el tanque ha sido diseñado.



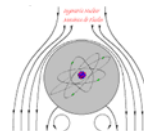
12 Referencias

- [1] S. Tiedeman, W. Allsop, V. Russo, A. Brown, A demountable wave absorber for wave flumes and basins, *Coast. Eng. Proc.* 1 (2012) 1–10.
- [2] Cluster energía, Cluster Energia Basque Energy, (2017). <http://www.clusterenergia.com/wave-energy-basque-country> (accessed April 23, 2018).
- [3] Bimep, (2013). <http://bimep.com/>.
- [4] Oceantec Energy, (2017). <http://www.oceantecenergy.com/>.
- [5] U. et al. Izquierdo, Experimental validation of a CFD model to study induced swell in a narrow wave flume, *Appl. Ocean Res.* (2018) (Accepted for publication).
- [6] M. Isaacson, Measurement of regular wave reflection, *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 117 (1991) 553–569.
- [7] C. Valente, Descubra las ventajas de invertir en I+D+i, *Expansión.* (2015). <http://www.expansion.com/pymes/2015/11/17/564b5fdb22601d71328b45c1.html>.
- [8] D. Robert George, R.A. Dalrymple, *Advanced Series on Ocean Engineering*, World Scientific, 1999. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- [9] D. J. Korteweg and F. de Vries, On the Change of Form of Long Waves Advancing in a Rectangular Canal, and on a New Type of Long Stationary Waves, *Philos. Mag.* 39 (1895) 422–443.
- [10] B. Le Méhauté, *An introduction to hydrodynamics and water waves*, Springer-Verlag, New York, 1976.
- [11] G.B. Airy, *Tides and waves*, Vol. 5, *Encyclopaedia Metropolitana*, London, 1845.
- [12] S. R.M., *Basic Coastal Engineering*, 2006.
- [13] Universitat Politècnica de Catalunya, *Anexo I- Teoria de olas*, (2008).
- [14] G. Stokes, *On the theory of oscillatory waves*, *Philosophical Transactions of the Cambridge VIII, Society*, 1847.
- [15] Edinburgh Designs, *Edinburgh Designs*, (2016). <http://www4.edesign.co.uk/> (accessed May 3, 2018).
- [16] IH Cantabria, (n.d.). <http://www.ihcantabria.com/es/ihlab-menu/ihlab-hidro/item/697>.
- [17] M. Tutar, I. Veci, Performance analysis of a horizontal axis 3-bladed Savonius type wave turbine in an experimental wave flume (EWF), *Renew. Energy.* 86 (2016) 8–25. doi:10.1016/j.renene.2015.07.079.
- [18] Universidad de Caminos de Ciudad Real, (n.d.).

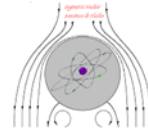


http://www.caminosciudadreal.uclm.es/?page_id=55.

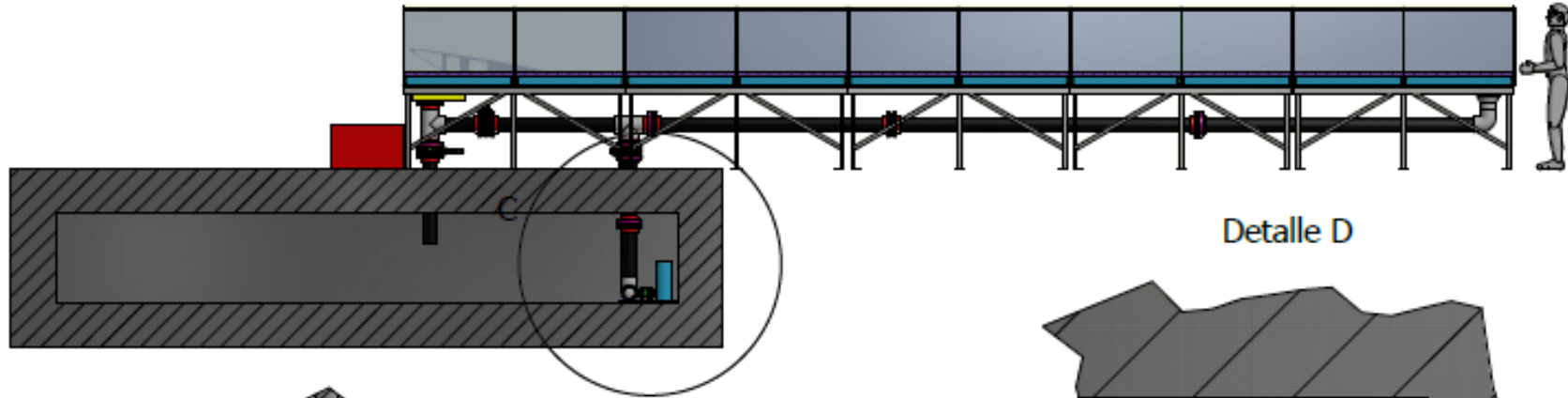
- [19] Gunt, (n.d.). <https://www.gunt.de/es/productos/juego-de-playas/070.16380/hm163-80/glct-1:pa-150:pr-761>.
- [20] Y. Ouellet, I. Datta, A survey of wave absorbers, J. Hydraul. Res. 24 (1986) 265–280. doi:10.1080/00221688609499305.
- [21] A. Marón, Optimización de Generadores de Olas para Ensayos de Comportamiento en la Mar, Esc. Técnica Super. Ing. Nav. (2009) 386.
- [22] Universitat de Barcelona, Materials, (n.d.). <http://www.ub.edu/cmematerials/es/content/polimetil-metacrilato>.
- [23] Propiedades mecánicas del vidrio, (n.d.).
- [24] Y. Ouellet, I. Datta, A survey of wave absorbers, Rev. Des Amortisseurs a Houle. 1686 (2017). doi:10.1080/00221688609499305.
- [25] J.M. González, Nuevos métodos de predicción de calidad de olas generadas en laboratorios, 1988.
- [26] N. Of, Metocean Analysis of BiMEP for Offshore Design, (2017).
- [27] Pedrollo, (n.d.). <https://www.pedrollo.com/es>.



ANEXO I: Planos

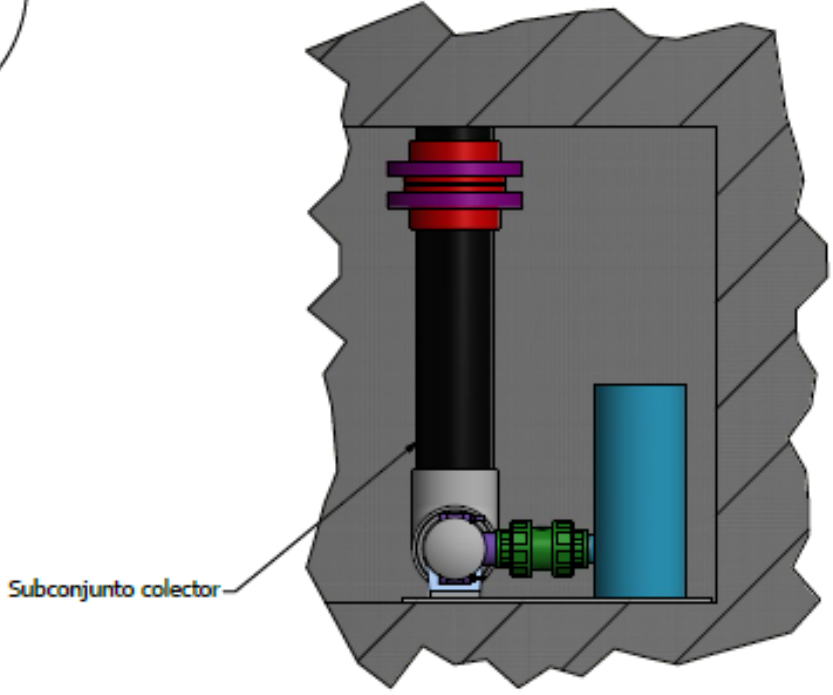
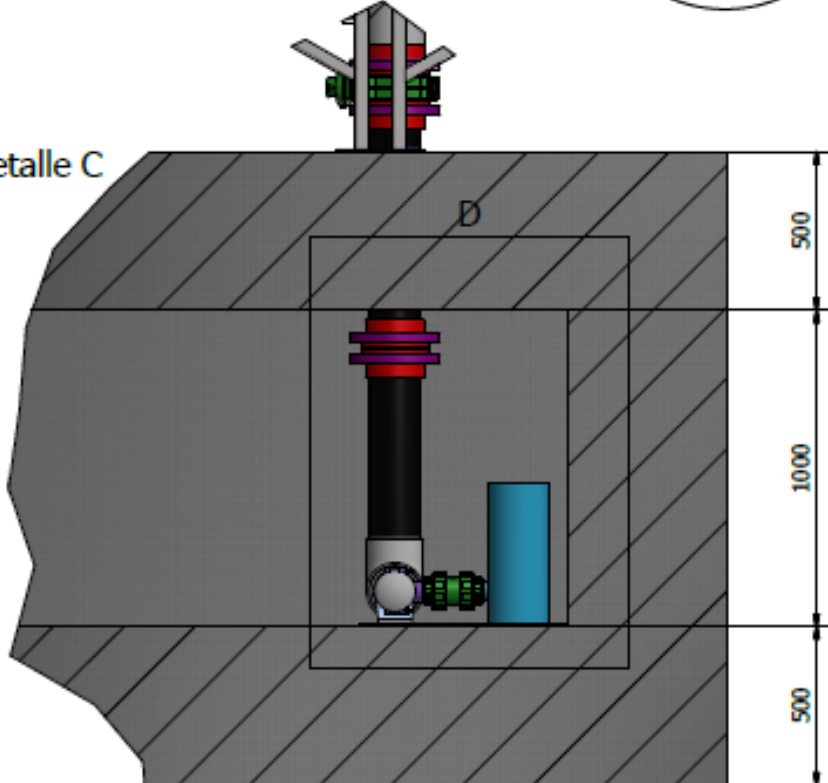


Rev	Modificación	Fecha:	Nombre

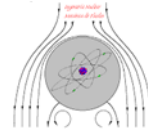


Detalle D

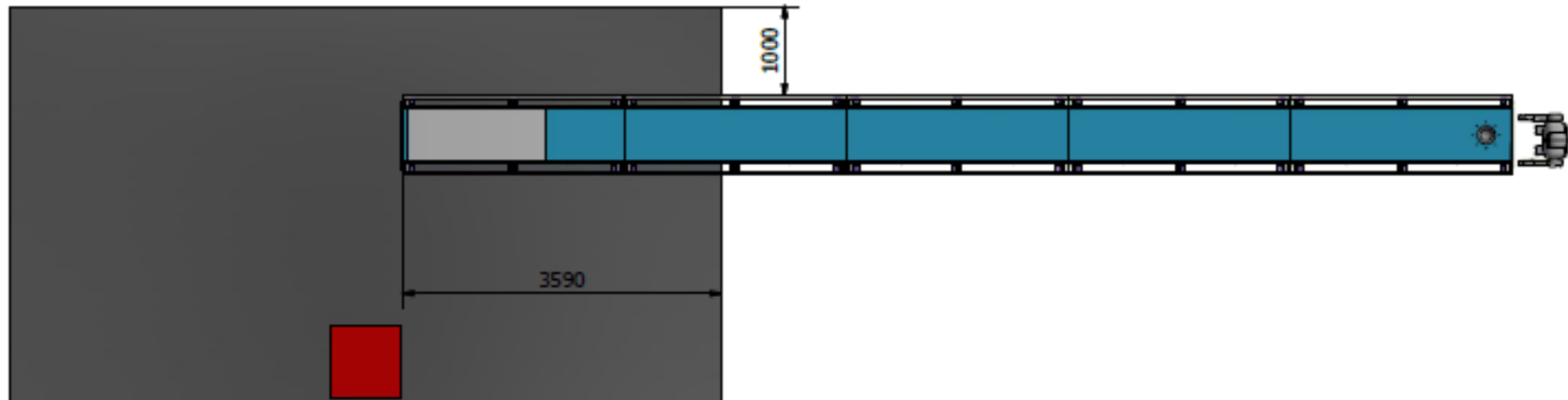
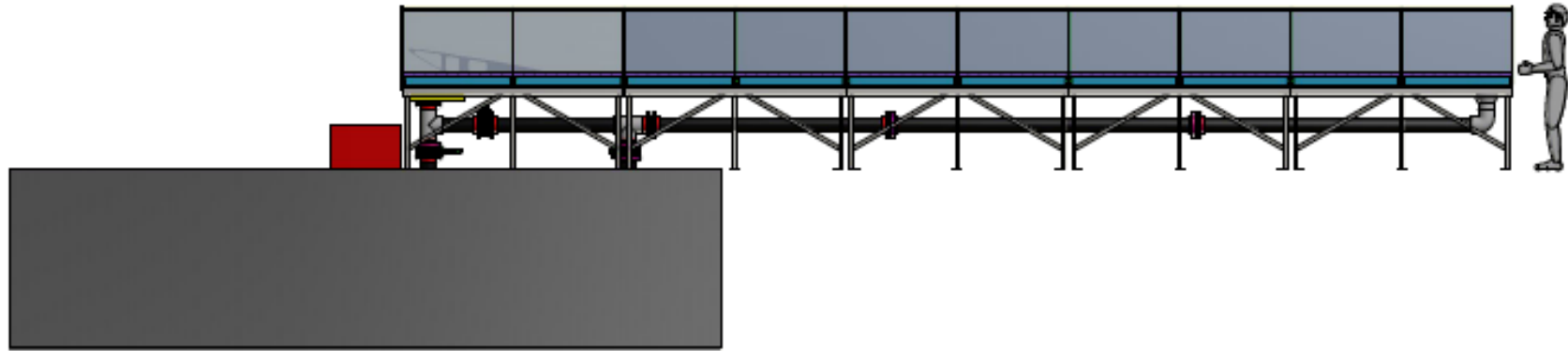
Detalle C



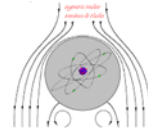
Nombre		Fecha	Revision	
Dibujado	Endika Arteaga	06/02/2018		
Comprobado				
Referencia:	Proyecto:			1 / 6
TE-18069	Canal 12m			



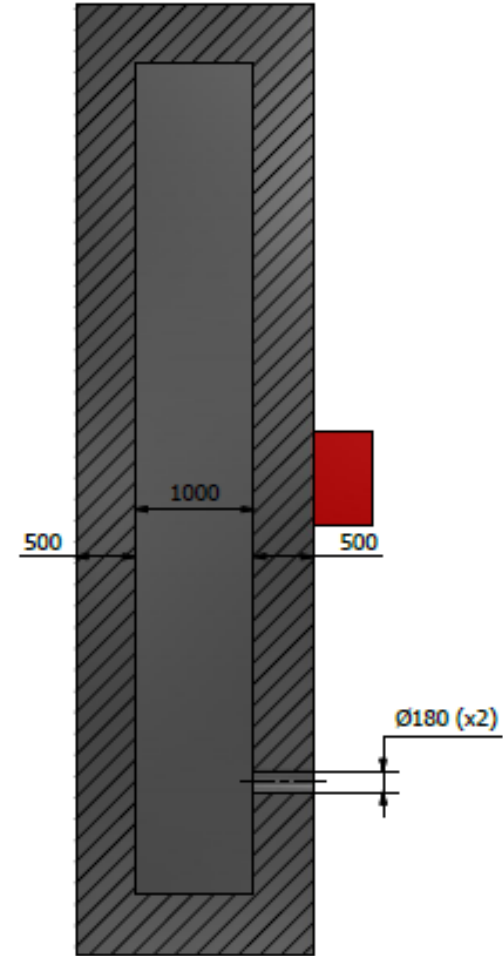
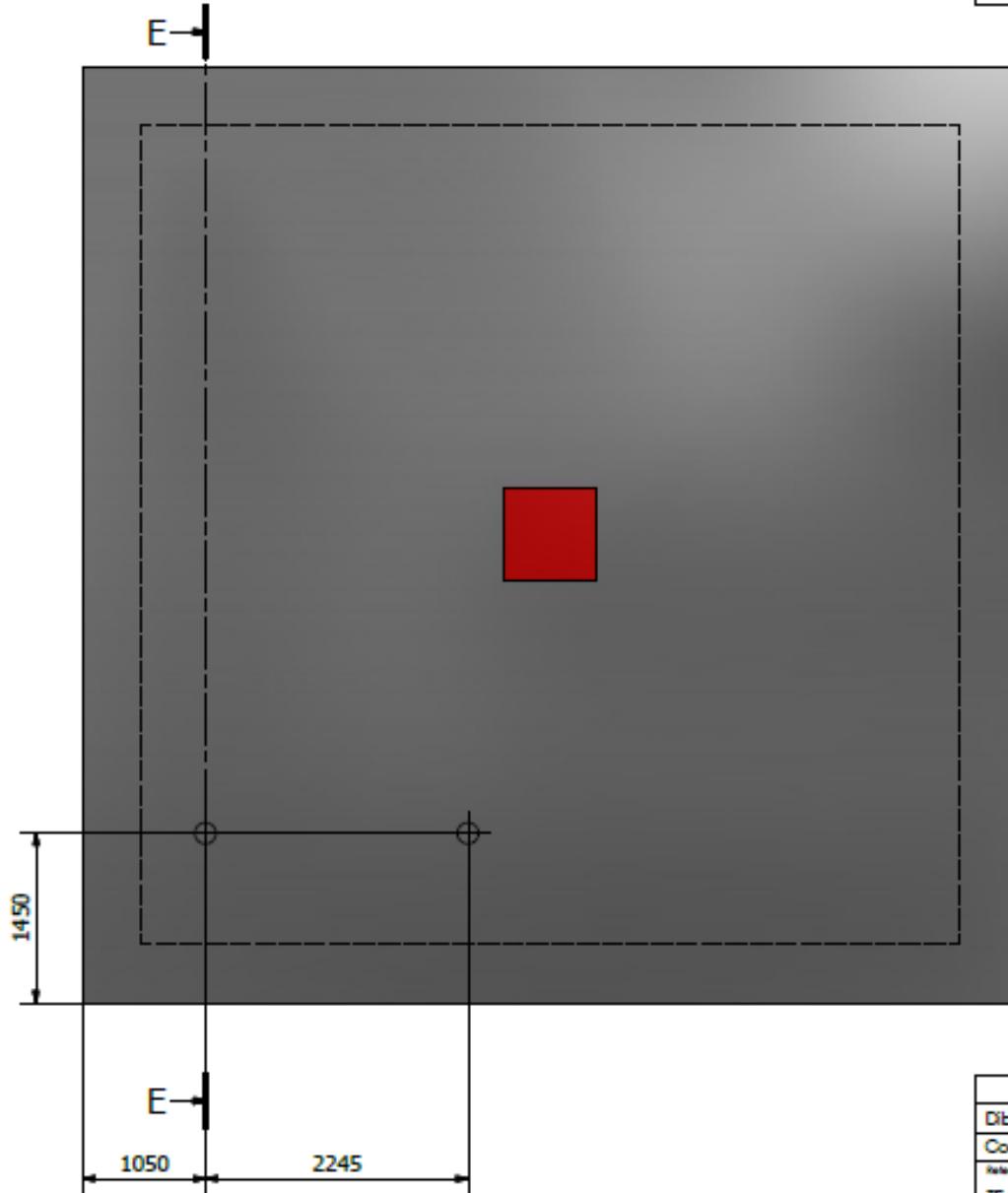
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



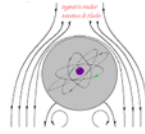
Dibujado	Nombre	Fecha	Revision	
Comprobado	Endika Arteaga	06/02/2018		
Referencia: TE-18069	Proyecto: Canal 12m			2 / 6



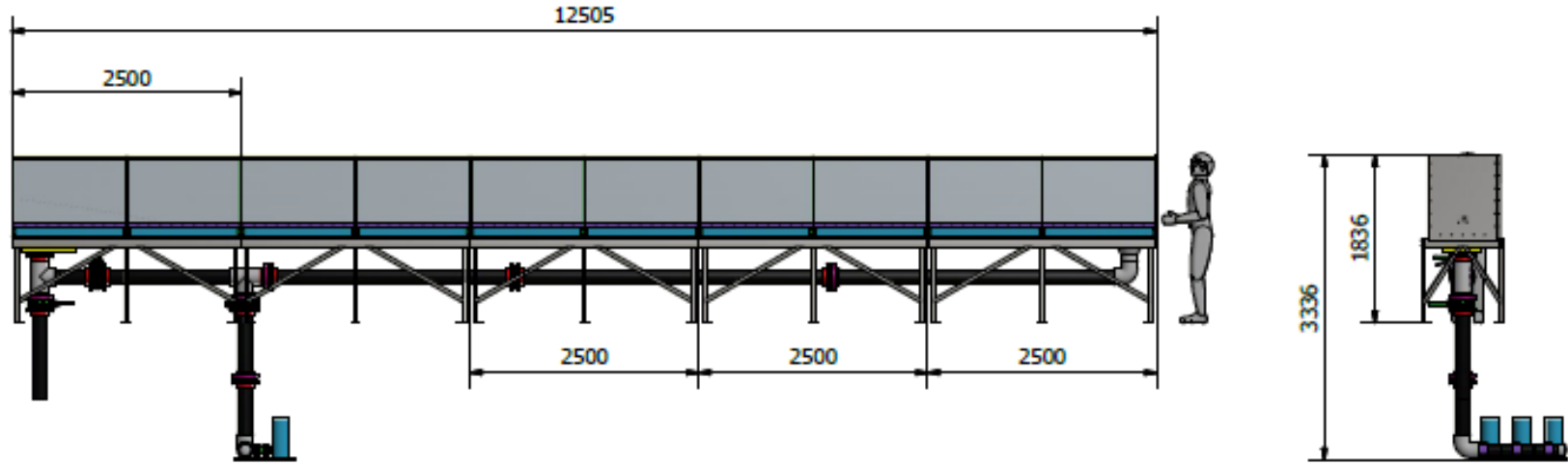
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



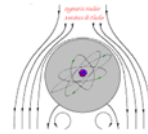
Nombre		Fecha	Revision	
Dibujado	Endika Arteaga	13/04/2018		
Comprobado				
Referencia:	Proyecto:			
TE-18069	Canal 12m			3 / 6



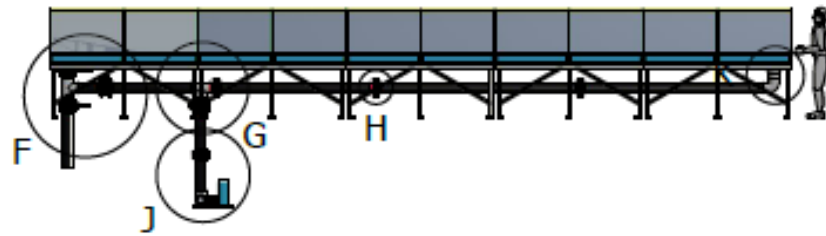
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado Endika Arteaga	06/02/2018		
Comprobado			4 / 6
Referencia: TE-18069	Proyecto: Canal 12m		



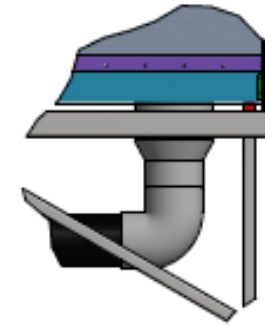
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



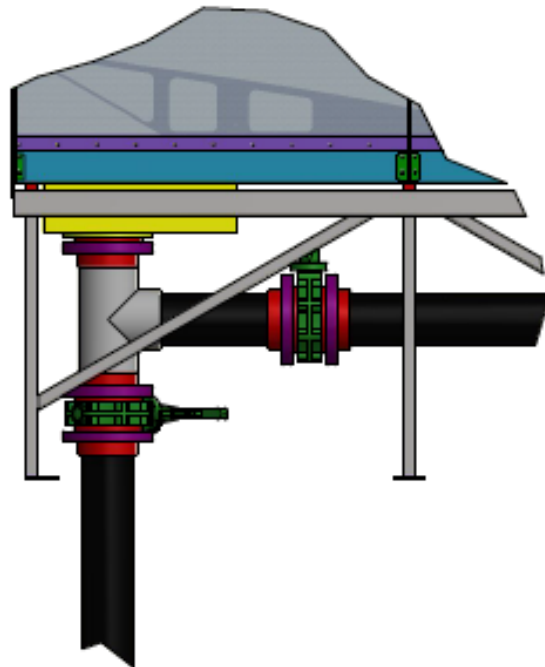
H (1 : 15)



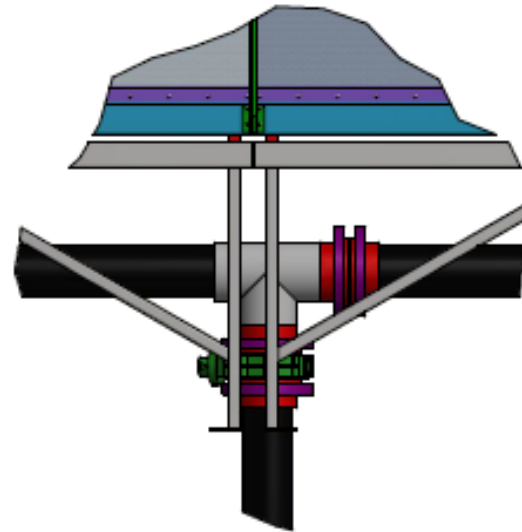
K (1 : 15)



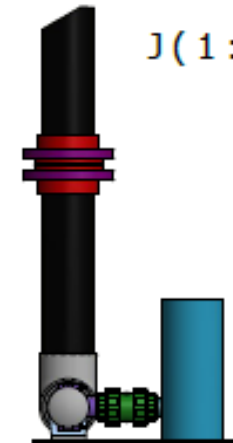
F (1 : 15)



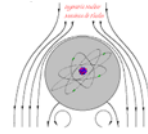
G (1 : 15)



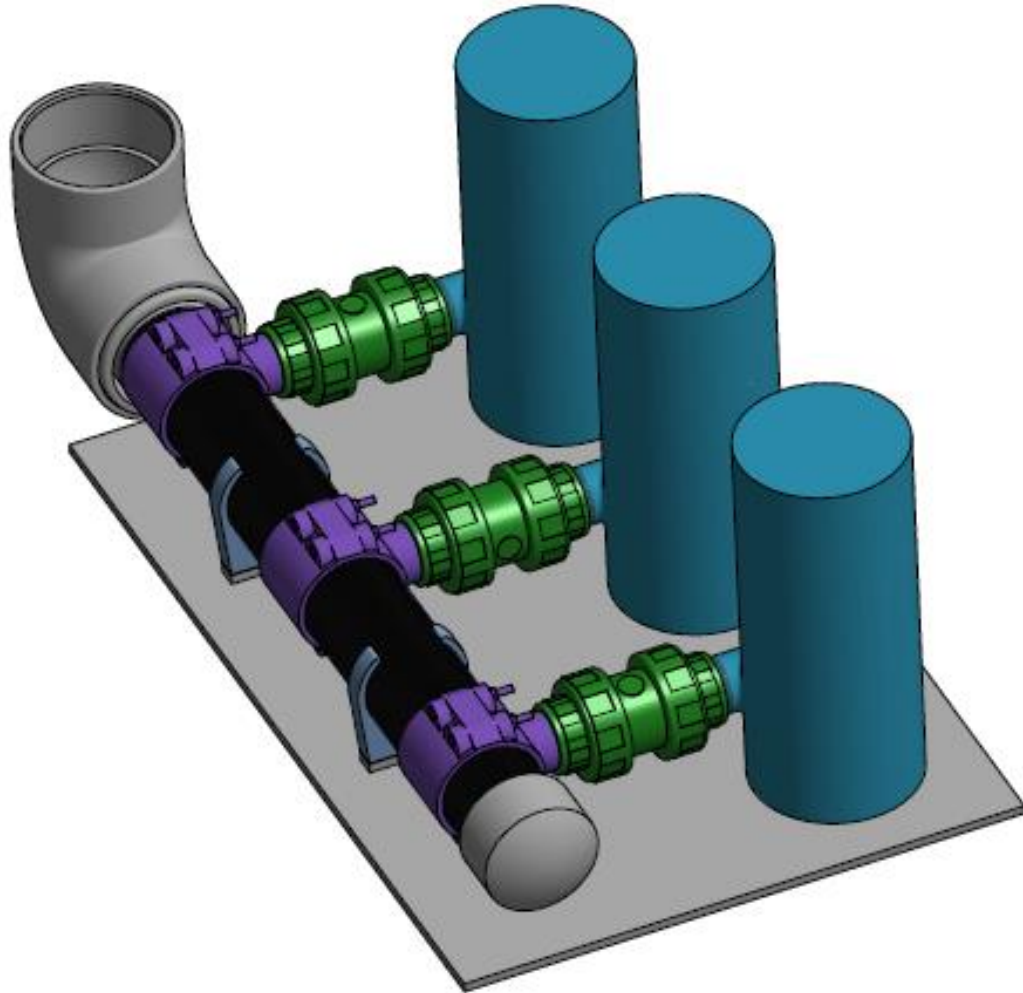
J (1 : 15)




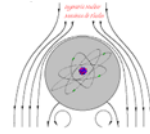
Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado Endika Arteaga	06/02/2018		
Comprobado			5 / 6
Referencia: TE-18069	Proyecto: Canal 12m		



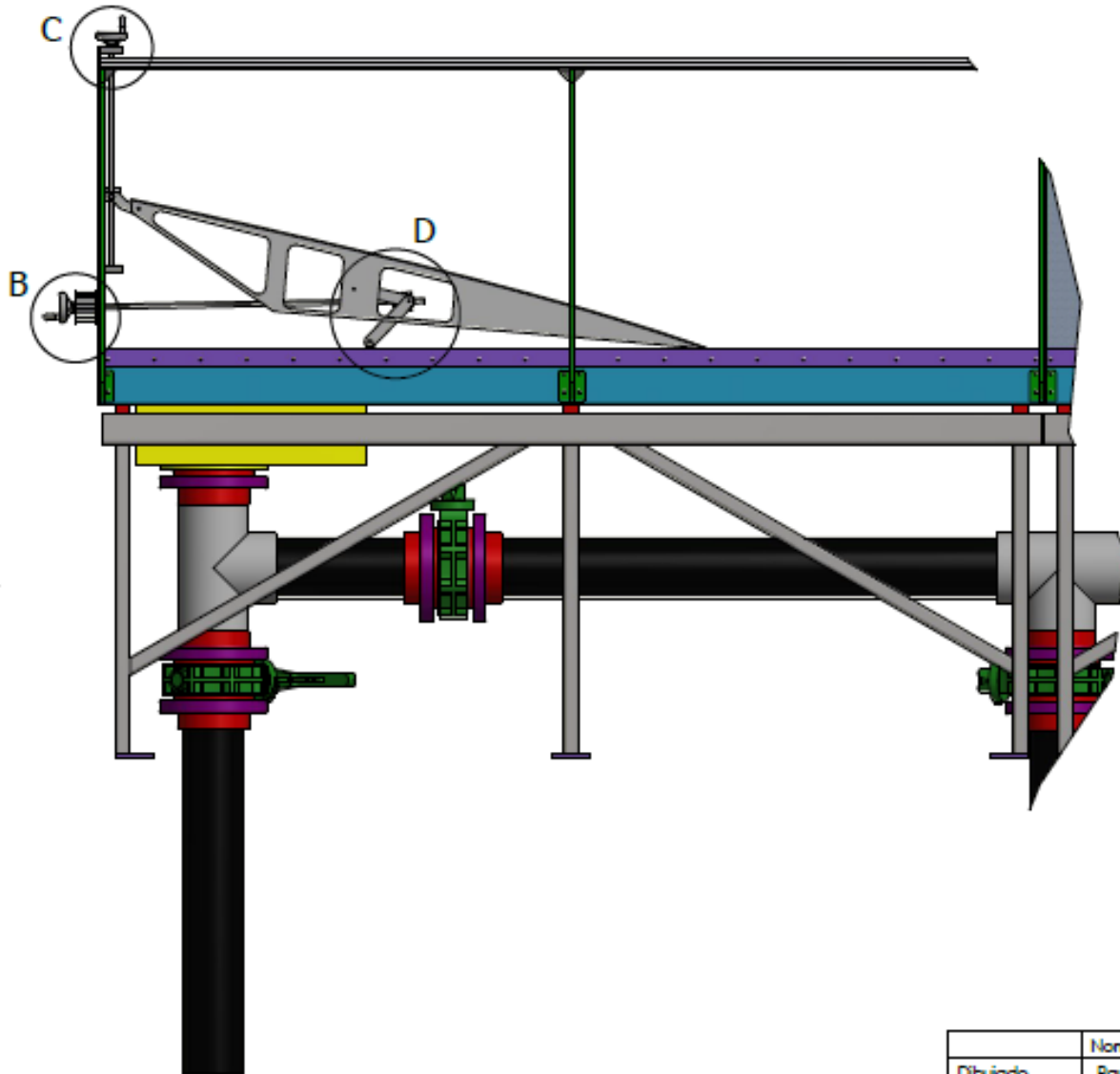
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



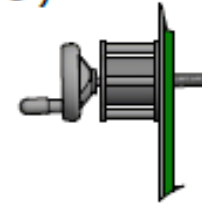
Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado: Endika Arteaga	06/02/2018		
Comprobado:			6 / 6
Referencia: TE-18069	Proyecto: Canal 12m		



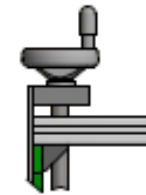
Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



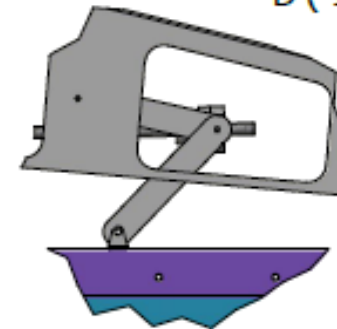
B (1:5)



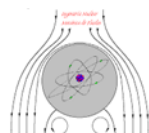
C (1:5)



D (1:5)

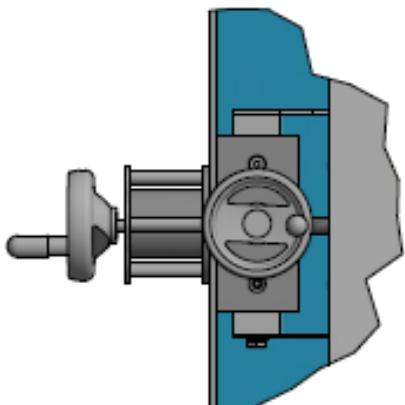
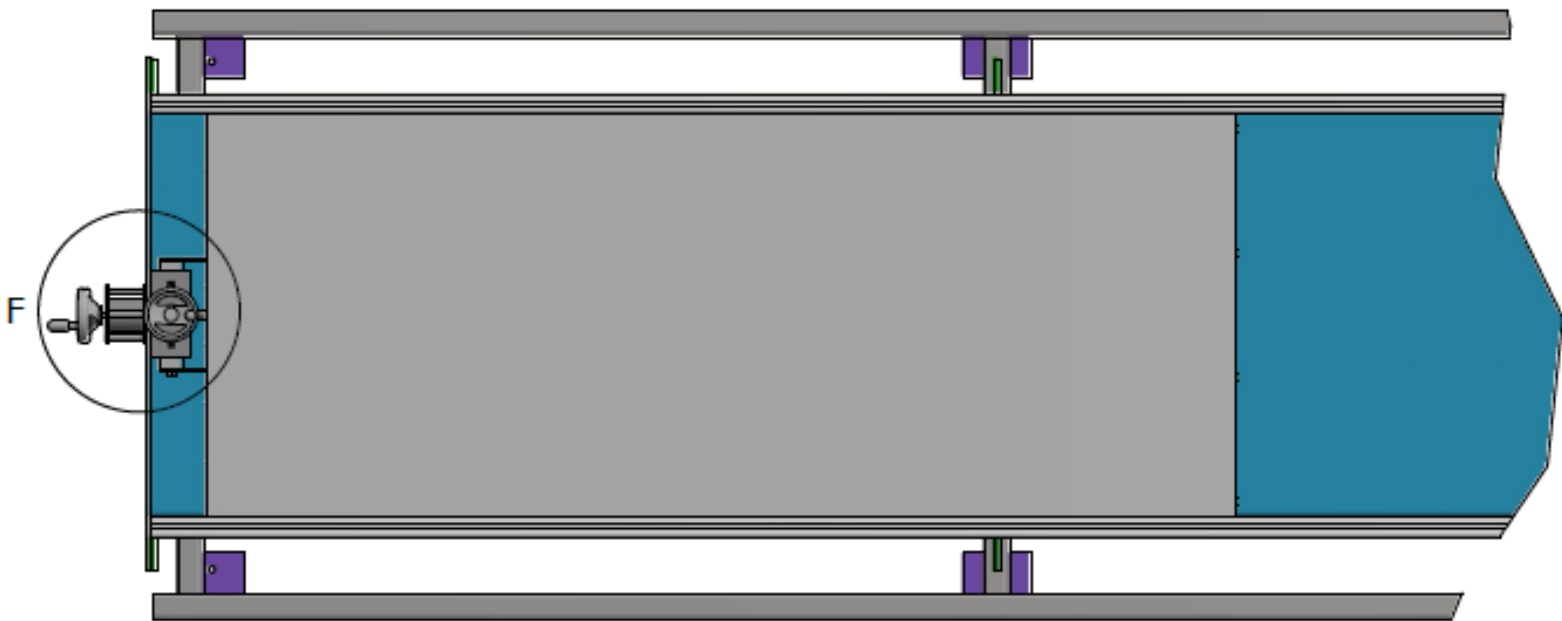



Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado Comprobado	Raul 04/05/2018		
Referencia: Te-18069	Proyecto: Canal 12m		

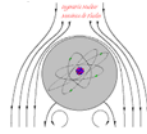


Rev	Modificación	Fecha:	Nombre

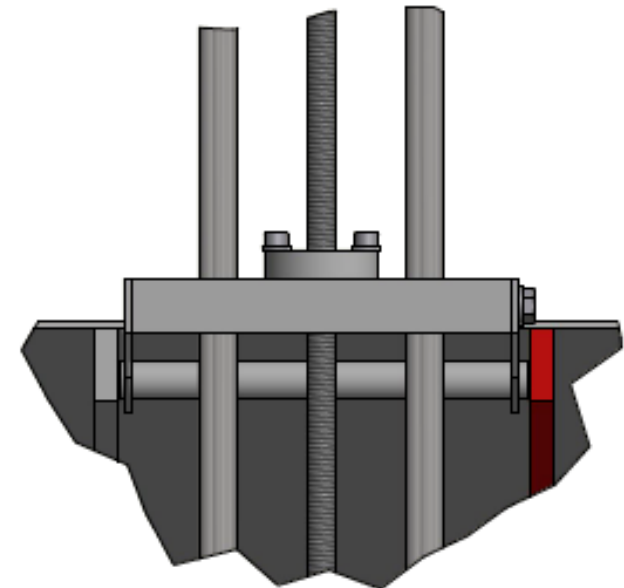
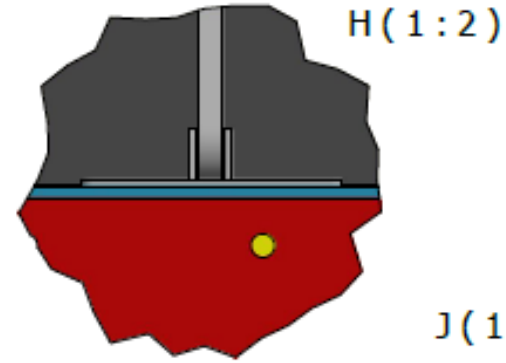
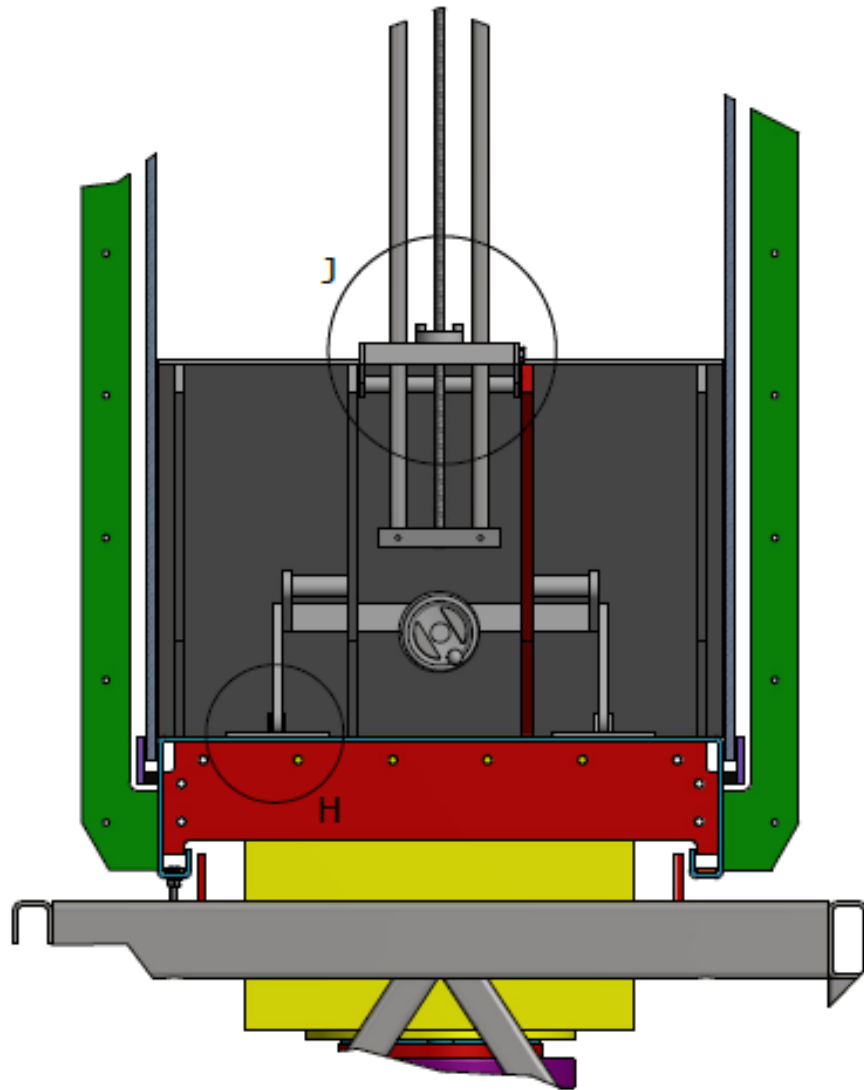
E (1:7)



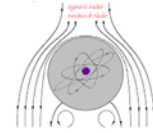
Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado: Raul	04/05/2018		
Comprobado:			
Referencia: Te-18069	Proyecto: Canal 12m		



Rev	Modificación	Fecha:	Nombre



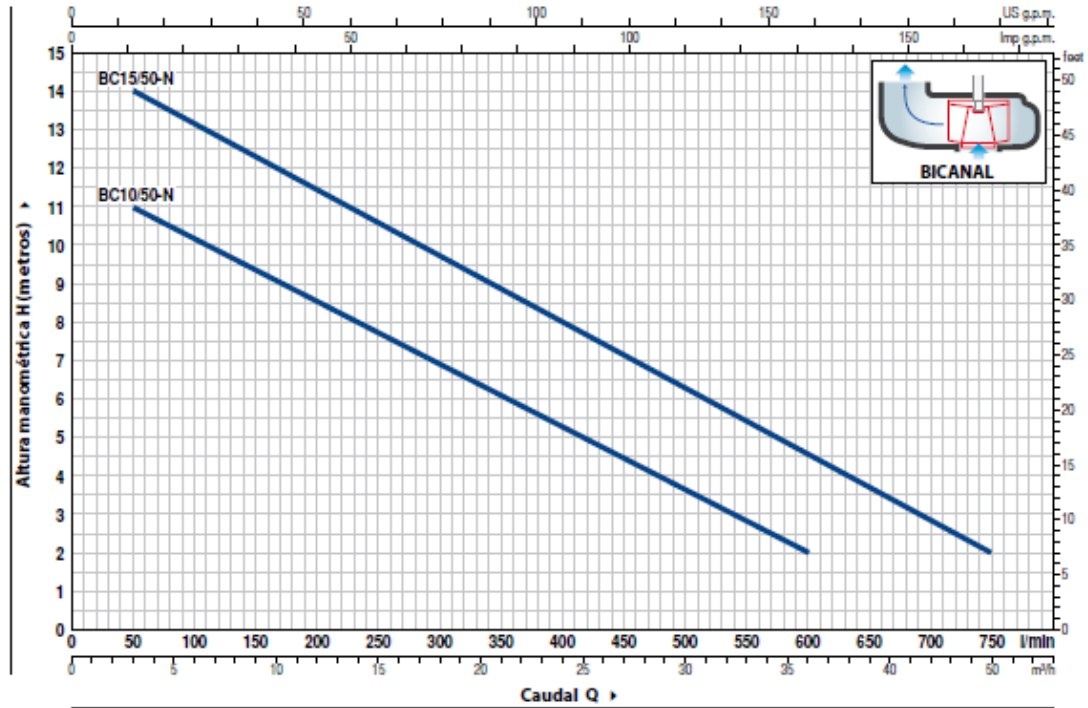
Nombre	Fecha	Revision	
Dibujado: Raul	04/05/2018		
Comprobado:			
Referencia: Te-18069	Proyecto: Canal 12m		



ANEXO II: Catálogo de las bombas

CURVAS Y DATOS DE PRESTACIONES

50 Hz n= 2900 rpm



MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	H metros												
Monofásica	Trifásica	kW	HP		m ³ /h	0	3	6	12	18	24	30	36	42	45		
				l/min	0	50	100	200	300	400	500	600	700	750			
BCm 10/50-N	BC 10/50-N	0.75	1		12	11	10	8.5	7	5	3.5	2					
BCm 15/50-N	BC 15/50-N	1.1	1.5		15	14	13	11.5	9.7	8	6.3	4.5	3	2			

Q = Caudal H = Altura manométrica total

Tolerancia de las curvas de prestación según EN ISO9906 Grado 3B.

POS. COMPONENTE CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS

1 CUERPO BOMBA	Hierro fundido con tratamiento de cataforesis con boca roscada ISO 228/1					
2 BASE	Acero inoxidable AISI 304					
3 RODETE	Tipo BICANAL en acero inoxidable AISI 304					
4 CAJA PORTAMOTOR	Acero inoxidable AISI 304					
5 TAPA MOTOR	Acero inoxidable AISI 304					
6 EJE MOTOR	Acero inoxidable EN 10088-3 - 1.4104					
7 DOBLE SELLO MECANICO EN EL EJE CON CAMARA DE ACEITE INTERCALADA						
<i>Sello</i>	<i>Eje</i>	<i>Posición</i>	<i>Materiales</i>	<i>Anillo fijo</i>	<i>Anillo móvil</i>	<i>Elastómero</i>
<i>Modelo</i>	<i>Dímetro</i>					
MG1-14D SIC	Ø 14 mm	Lado motor Lado bomba	Carburo de silicio Carburo de silicio	Grafito Carburo de silicio		NBR NBR
8 RODAMIENTOS	6203 ZZ / 6203 ZZ					

9 CONDENSADOR

<i>Electrobomba</i>	<i>Capacidad</i>	
<i>Monofásica</i>	<i>(230 V o 240 V)</i>	<i>(110 V)</i>
BCm 10/50-N	20 µF 450 VL	30 µF - 250 VL
BCm 15/50-N	25 µF 450 VL	-

10 MOTOR ELECTRICO

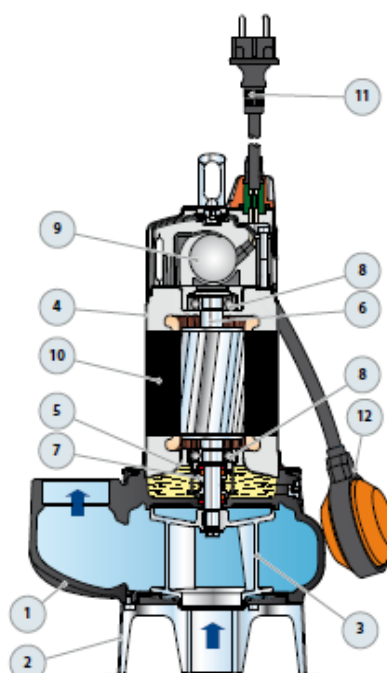
BCm: monofásica 230 V - 50 Hz
 con protección térmica incorporada en el bobinado
BC: trifásica 400 V - 50 Hz
 - Aislamiento: clase F
 - Protección: IP X8

11 CABLE DE ALIMENTACIÓN

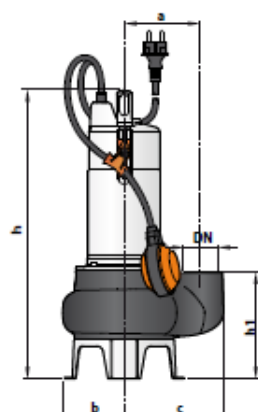
De tipo "H07 RN-F"
 (con conector Schuko sólo en las versiones monofásicas)
Longitud estándar 5 metros (10 metros para BC15/50)

12 INTERRUPTOR CON FLOTADOR EXTERNO

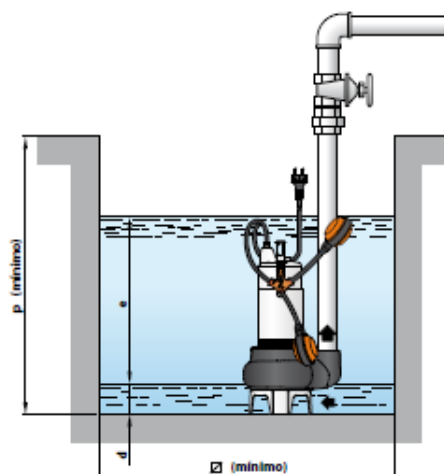
(sólo para versiones monofásicas)



DIMENSIONES Y PESOS



Instalación típica



MODELO		BOCA DN	Paso de cuerpos sólidos	DIMENSIONES mm								kg		
Monofásica	Trifásica			a	b	c	h	h1	d	e	p	Ø	1-	3-
BCm 10/50-N	BC 10/50-N	2"	Ø 50 mm	115	95	155	431	164	60	ajustable	500	500	14.9	13.8
BCm 15/50-N	BC 15/50-N						446						16.5	15.5

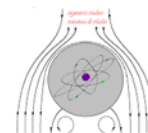
CONSUMO EN AMPERIOS

MODELO	TENSION		
	230 V	240 V	110 V
Monofásica			
BCm 10/50-N	5.0 A	4.8 A	10.0 A
BCm 15/50-N	8.2 A	7.9 A	-

MODELO	TENSION			
	230 V	400 V	240 V	415 V
Trifásica				
BC 10/50-N	3.7 A	2.1 A	3.5 A	2.0 A
BC 15/50-N	5.6 A	3.2 A	5.4 A	3.1 A

PALETIZADO

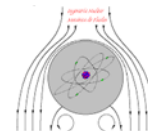
MODELO		PARA GRUPAJE	PARA CONTAINER
Monofásica	Trifásica	nº bombas	nº bombas
BCm 10/50-N	BC 10/50-N	54	72
BCm 15/50-N	BC 15/50-N	54	72



ANEXO III: Resultados de la potencia requerida por el generador de olas

Tabla 31: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=2,0$ m

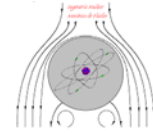
				h=0,6m	h=0,5m	h=0,4m	h=0,3m	h=0,2m	h=0,1m
H	0,100 m	Pistón	S [m]	0,061	0,069	0,083	0,108	0,160	0,318
			V[m/s]	0,106	0,117	0,135	0,163	0,211	0,310
			P [W]	1,854	1,812	1,909	2,188	2,757	4,039
		Flap	S [m]	0,101	0,119	0,149	0,202	0,310	0,632
			V[m/s]	0,174	0,201	0,243	0,306	0,408	0,616
			P [W]	2,048	2,292	2,763	3,593	5,022	7,884
	0,075 m	Pistón	S [m]	0,046	0,052	0,062	0,081	0,120	0,239
			V[m/s]	0,080	0,088	0,101	0,122	0,158	0,233
			P [W]	0,782	0,764	0,805	0,923	1,163	1,704
		Flap	S [m]	0,076	0,089	0,112	0,151	0,232	0,474
			V[m/s]	0,131	0,151	0,182	0,229	0,306	0,462
			P [W]	0,864	0,967	1,166	1,516	2,119	3,326
	0,050 m	Pistón	S [m]	0,031	0,035	0,041	0,054	0,080	0,159
			V[m/s]	0,053	0,059	0,068	0,082	0,105	0,155
			P [W]	0,232	0,226	0,239	0,274	0,345	0,505
		Flap	S [m]	0,050	0,060	0,074	0,101	0,155	0,316
			V[m/s]	0,087	0,101	0,121	0,153	0,204	0,308
			P [W]	0,256	0,286	0,345	0,449	0,628	0,986
0,025 m	Pistón	S [m]	0,015	0,017	0,021	0,027	0,040	0,080	
		V[m/s]	0,027	0,029	0,034	0,041	0,053	0,078	
		P [W]	0,029	0,028	0,030	0,034	0,043	0,063	
	Flap	S [m]	0,025	0,030	0,037	0,050	0,077	0,158	



		V[m/s]	0,044	0,050	0,061	0,076	0,102	0,154
		P [W]	0,032	0,036	0,043	0,056	0,078	0,123

Tabla 32: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=3,0$ m

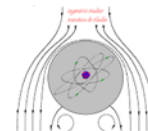
				h=0,6m	h=0,5m	h=0,4m	h=0,3m	h=0,2m	h=0,1m
H	0,100 m	Pistón	S [m]	0,083	0,098	0,121	0,160	0,239	0,477
			V[m/s]	0,110	0,124	0,144	0,172	0,217	0,313
			P [W]	2,337	2,536	2,862	3,377	4,239	6,109
		Flap	S [m]	0,149	0,180	0,229	0,310	0,471	0,952
			V[m/s]	0,198	0,230	0,273	0,333	0,428	0,624
			P [W]	3,385	4,000	4,880	6,151	8,122	12,086
	0,075 m	Pistón	S [m]	0,062	0,073	0,090	0,120	0,179	0,358
			V[m/s]	0,083	0,093	0,108	0,129	0,163	0,235
			P [W]	0,986	1,070	1,207	1,425	1,788	2,577
		Flap	S [m]	0,112	0,135	0,171	0,232	0,353	0,714
			V[m/s]	0,149	0,172	0,205	0,250	0,321	0,468
			P [W]	1,428	1,687	2,059	2,595	3,427	5,099
0,050 m	Pistón	S [m]	0,041	0,049	0,060	0,080	0,119	0,239	
		V[m/s]	0,055	0,062	0,072	0,086	0,108	0,157	
		P [W]	0,292	0,317	0,358	0,422	0,530	0,764	
	Flap	S [m]	0,074	0,090	0,114	0,155	0,236	0,476	
		V[m/s]	0,099	0,115	0,136	0,167	0,214	0,312	
		P [W]	0,423	0,500	0,610	0,769	1,015	1,511	
0,025 m	Pistón	S [m]	0,021	0,024	0,030	0,040	0,060	0,119	
		V[m/s]	0,028	0,031	0,036	0,043	0,054	0,078	



		P [W]	0,037	0,040	0,045	0,053	0,066	0,095
		S [m]	0,037	0,045	0,057	0,077	0,118	0,238
	Flap	V[m/s]	0,050	0,057	0,068	0,083	0,107	0,156
		P [W]	0,053	0,062	0,076	0,096	0,127	0,189

Tabla 33: Cálculo de la potencia para diferentes profundidades y alturas de ola para pistón y flap, $\lambda=4,0$ m

				h=0,6m	h=0,5m	h=0,4m	h=0,3m	h=0,2m	h=0,1m
H	0,100 m	Pistón	S [m]	0,108	0,128	0,160	0,212	0,318	0,637
			V[m/s]	0,115	0,130	0,149	0,176	0,219	0,314
			P [W]	3,095	3,429	3,899	4,587	5,712	8,171
		Flap	S [m]	0,202	0,245	0,310	0,417	0,632	1,271
			V[m/s]	0,216	0,248	0,289	0,346	0,435	0,627
			P [W]	5,081	5,951	7,102	8,694	11,150	16,241
	0,075 m	Pistón	S [m]	0,081	0,096	0,120	0,159	0,239	0,477
			V[m/s]	0,087	0,097	0,112	0,132	0,165	0,235
			P [W]	1,306	1,447	1,645	1,935	2,410	3,447
		Flap	S [m]	0,151	0,184	0,232	0,313	0,474	0,953
			V[m/s]	0,162	0,186	0,216	0,259	0,326	0,470
			P [W]	2,144	2,511	2,996	3,668	4,704	6,852
	0,050 m	Pistón	S [m]	0,054	0,064	0,080	0,106	0,159	0,318
			V[m/s]	0,058	0,065	0,074	0,088	0,110	0,157
			P [W]	0,387	0,429	0,487	0,573	0,714	1,021
		Flap	S [m]	0,101	0,122	0,155	0,209	0,316	0,635
			V[m/s]	0,108	0,124	0,144	0,173	0,218	0,313
			P [W]	0,635	0,744	0,888	1,087	1,394	2,030
0,025 m	Pistón	S [m]	0,027	0,032	0,040	0,053	0,080	0,159	



			V[m/s]	0,029	0,032	0,037	0,044	0,055	0,078
			P [W]	0,048	0,054	0,061	0,072	0,089	0,128
		Flap	S [m]	0,050	0,061	0,077	0,104	0,158	0,318
			V[m/s]	0,054	0,062	0,072	0,086	0,109	0,157
			P [W]	0,079	0,093	0,111	0,136	0,174	0,254