

GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL  
**TRABAJO FIN DE GRADO**

***ESTUDIO DE LOS DISEÑOS Y PROCESOS  
FLUIDODINÁMICOS QUE SE ENCUENTRAN EN LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA  
PROVENIENTE DE LAS OLAS:  
ABSORBEDORES PUNTUALES***

**Alumno/Alumna:** Escalona Corral, Ana

**Director/Directora:** Olondo Castro, Concepción

**Curso:** 2017 - 2018

**Fecha:** Bilbao, 15, abril, 2018

# 1. RESUMEN

Este documento es un estudio de los diseños y de los procesos fluidodinámicos que se encuentran en la generación de energía eléctrica proveniente de las olas. Concretamente, se centra en los absorbedores puntuales. En primer lugar, se presenta una explicación teórica de los procesos fluidodinámicos que explican cómo se capta la energía de las olas y qué factores influyen en los procesos. En segundo lugar, se presentan los aspectos prácticos que un convertidor de energía debe satisfacer para ser viable en el mercado comercial. Para ilustrar estos aspectos, se hace una comparación de dos tecnologías diferentes, las boyas Seabased y Wavebob.

This document is a study of the designs and the fluid-dynamic processes that are found on electrical energy generation from wave energy. Specifically, it focuses on point absorbers. Firstly, a theoretical explanation about the fluid-dynamic processes that explain wave energy capture is presented along with the factors that have an impact on said processes. Secondly, the essential features in which a wave energy converter should excel in order to show long term economic potential are addressed. To exemplify these aspects, a comparison between two different technologies, the Seabased and Wavebob buoys, is made.

Dokumentu hau olatuetatik sortzen den energia elektrikoaren diseinu eta prozesu fluidodinamikoei buruzko ikerketa bat da. Zehazki, xurgagailu puntualak jorratzen ditu. Lehenik eta behin, prozesu fluidodinamikoei buruzko azalpen teorikoa azaltzen da, non olatuetatik energia nola lortzen diren eta prozesuan eragiten duten faktoreak azaltzen den. Bestalde, energia kontserbadore bat merkatuan bideragarri izateko bete beharreko atal praktikoak azaltzen ditu. Aspektu hauek azaltzeko, bi teknologia desberdinen alderaketa egiten da, Seabased buia eta Wavebob.

## **PALABRAS CLAVE**

Energía undimotriz  
Energía renovable  
Convertidor de energía  
Cuerpos activados por ondas  
Absorbedor puntual

## 2. ÍNDICE

<b>1. RESUMEN</b>	<b>2</b>
<b>2. ÍNDICE</b>	<b>3</b>
<b>3. LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y ACRÓNIMOS</b>	<b>5</b>
3.1. LISTA DE FIGURAS	5
3.2. LISTA DE TABLAS	6
3.3. LISTA DE ACRÓNIMOS	7
<b>4. INTRODUCCIÓN</b>	<b>8</b>
<b>5. CONTEXTO</b>	<b>9</b>
<b>6. OBJETIVOS Y ALCANCE</b>	<b>10</b>
<b>7. BENEFICIOS</b>	<b>11</b>
<b>8. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE</b>	<b>12</b>
<b>9. TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ</b>	<b>15</b>
9.1. CUERPOS ACTIVADOS POR ONDAS	16
9.1.1. PELAMIS	17
9.1.2. CRESTWING	18
9.1.3. OPT POWERBUOY, WAVEBOB, AEABASED Y BOLT LIFESAVER	19
9.1.4. CETO	21
9.1.5. WAVEROLLER	22
9.1.6. WAVESTAR Y FLOATING POWER PLANT	23
<b>10. TECNOLOGÍAS A EVALUAR</b>	<b>24</b>
10.1. SEABASED	24
10.2. WAVEBOB	26
<b>11. PRINCIPIOS FLUIDODINÁMICOS</b>	<b>28</b>
11.1. NATURALEZA DE LAS OLAS	28
11.2. FUERZAS HIDRODINÁMICAS	31
11.2.1. HIDROESTÁTICA	31

11.2.2.	FUERZAS DE EXCITACIÓN _____	33
11.2.3.	FUERZAS DE RADIACIÓN _____	33
11.2.4.	FUERZAS DE MAQUINARIA _____	33
11.2.5.	FUERZAS DE ARRASTRE _____	34
11.2.6.	FUERZAS DE FRECUENCIA BAJA _____	34
11.3.	DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA EXTRACCIÓN DE LA ENERGÍA DE LAS OLAS _____	34
11.4.	RESONANCIA Y CONTROL _____	38
11.5.	LÍMITES Y MÁXIMOS DE LA POTENCIA ABSORBIDA _____	39
11.5.1.	LÍMITE DEBIDO AL PATRÓN DE RADIACIÓN _____	39
11.5.2.	LÍMITE DE BUDAL _____	40
11.5.3.	LÍMITE DEBIDO A RESTRICCIONES EN LA AMPLITUD _____	42
<b>12.</b>	<b>ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS _____</b>	<b>44</b>
12.1.	ANÁLISIS DE LOS LÍMITES LOS LÍMITES SUPERIORES DE LA POTENCIA ABSORBIDA PARA LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB _____	44
12.2.	CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DE UN WEC _____	47
12.3.	ESPECIFICACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB _____	48
12.4.	EVALUACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB _____	51
12.4.1.	VALORACIÓN DE LA VIABILIDAD DE LOS DISPOSITIVOS EN LA COSTA VASCA _____	53
<b>13.</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE TAREAS _____</b>	<b>54</b>
<b>14.</b>	<b>DIAGRAMA DE GANTT _____</b>	<b>55</b>
<b>15.</b>	<b>DESCARGO DE GASTOS _____</b>	<b>57</b>
<b>16.</b>	<b>CONCLUSIONES _____</b>	<b>59</b>
<b>17.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA _____</b>	<b>60</b>
<b>ANEXO I – CÁLCULO DE LOS DIAGRAMAS DE BUDAL PARA LAS TENOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB _____</b>		<b>64</b>
<b>ANEXO II – DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE GANTT _____</b>		<b>67</b>
<b>ANEXO III – DESGLOSE DE OTROS GASTOS _____</b>		<b>70</b>

## 3. LISTA DE FIGURAS, TABLAS Y ACRÓNIMOS

### 3.1. LISTA DE FIGURAS

FIGURA 8-1: INVERSIÓN GLOBAL EN EL AÑO 2016 EN ENERGÍAS RENOVABLES POR TECNOLOGÍA (REN21, 2017).....	12
FIGURA 8-2: POTENCIA COSTERA NETA MUNDIAL ANUAL (EXCLUYENDO CONTRIBUCIONES DE ZONAS CON $P \leq 5$ KW/M Y ZONAS POTENCIALMENTE CUBIERTAS POR HIELO (MØRK, BARSTOW, KABUTH, & PONTES, 2010) .....	13
FIGURA 9-1: DESGLOSE DE LOS DISPOSITIVOS EN DESARROLLO. ADAPTADA DE (IRENA, 2014) .....	16
FIGURA 9-2: MOVIMIENTO DEL PELMAIS EN RELACIÓN CON LA DIRECCIÓN DE LA OLA INCIDENTE (PELAMIS, 2018).....	17
FIGURA 9-3: PROTOTIPO PELAMIS P2-001 INSTALADO EN BILLIA CROO (REINO UNIDO, 2010) (EMEC, PELAMIS WAVE POWER, 2014).....	18
FIGURA 9-4: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO CRESTWING (CRESTWING, 2018) .....	18
FIGURA 9-5: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO DEXA (INSTALADO POR DEXAWAVE A ESCALA 1:5 EN 2011 EN DANWEC HANSTHOLM) (DEXA, 2018).....	19
FIGURA 9-6: PB3 POWERBUOY INSTALDA EN LA COSTA DE NUEVA JERSEY (OPT, 2018) .....	19
FIGURA 9-7: BOYA WAVEBOB INSTALADA EN IRLANDA (OFFSHOREWIND, 2013) .....	20
FIGURA 9-8: SIMULACIÓN DEL PARQUE UNDIMOTRIZ DE SEABASED (SEABASED, 2018).....	20
FIGURA 9-9: BOLT LIFESAVER INSTALADO EN HAWAII DESDE MARZO DE 2016(BOLT, 2018) .....	21
FIGURA 9-10: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO CETO 6, INSTALDO EN LA COSTA OESTE AUSTRALIANA (CETO, 2018) .....	21
FIGURA 9-11: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO WAVEROLLER (WAVEROLLER, 2018).....	22
FIGURA 9-12: OYSTER DE AQUAMARINE PROJECTS EN TIERRA (APO, 2018).....	22
FIGURA 9-13: SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO E1 DE LANGLEE (SUBSEAWORLDNEWS, 2012).....	22
FIGURA 9-14: WAVESTAR A ESCALA 1:2 INSTALADO EN 2009 EN HANSTHOLM (WAVESTAR, 2018) .....	23
FIGURA 9-15: FLOATING POWER PLANT EN LOLLAND (SUR DE DINAMARCA, 2008) (FLOATINGPP, 2018) .....	23
FIGURA 10-1: ESQUEMA DE LAS PARTES DEL WEC SEABASED. ADAPTADO DE (OPENEISB, 2017).....	24
FIGURA 10-2: CONCEPTO DEL WEC WAVEBOB (IZQUIERDA) Y DIMENSIONES (DERECHA). ADAPTADO DE (MULIAWAN, GAO, & MOAN, 2013).....	26
FIGURA 11-1: CLASIFICACIÓN DE OLAS OCEÁNICAS POR PERIODO DE ONDA. SE REPRESENTA LA ENERGÍA RELATIVA QUE TRASPORTA LA OLA EN FUNCIÓN DE SU PERIODO (WMO, 1998).....	28
FIGURA 11-2: GENERACIÓN DE OLAS EN EL OCÉANO. ADAPTADA DE (GARRISON, 2010) .....	29
FIGURA 11-3: ONDA SINUSOIDAL SIMPLE. ADAPTADA DE (WMO, 1998).....	30

FIGURA 11-4: DOS ONDAS SINUSOIDALES SUPERPUESTAS (ABAJO) Y SU RESULTANTE (ARRIBA) (WMO, 1998).....	31
FIGURA 11-5: SUPERPOSICIÓN DE VARIAS ONDAS SINUSOIDALES QUE FORMAN ASÍ LA SUPERFICIE OCEÁNICA (WMO, 1998) .....	31
FIGURA 11-6: EQUILIBRIO ESTABLE EN CUERPOS FLOTANTES (ESTEBAN & PEÑA, 2015).....	32
FIGURA 11-7: MOVIMIENTOS DE TRASLACIÓN Y ROTACIÓN PARA UN CUERPO FLOTANTE. ADAPTADO DE (TODALSHAUG, 2017) .....	32
FIGURA 11-8: REPRESENTACIÓN DE INTERACCIÓN ONDAS GENERADAS POR UN CUERPO OSCILADOR CON LAS OLAS (FALNES, 1997) .....	36
FIGURA 11-9: PATRÓN DE RADIACIÓN DE LAS ONDAS GENERADAS POR UN ABSORSOR PUNTUAL CON MOVIMIENTO OSCILATORIO VERTICAL (FALNES, 1997) .....	40
FIGURA 11-10: DIAGRAMA DE BUDAL, REPRESENTADOS LOS LÍMITES SUPERIORES CON LÍNEA CONTINUA, UNA SITUACIÓN CON CONTROL DEL MOVIMIENTO (LATCHING) REPRESENTADA CON LA LÍNEA DISCONTINUA SUPERIOR, Y UNA SITUACIÓN SIN CONTROL DEL MOVIMIENTO (PASSIVE) CON LA LÍNEA DISCONTINUA INFERIOR (FALNES, 2007) .....	41
FIGURA 11-11: DIAGRAMA DE BUDAL PARA UNA SEMIESFERA OSCILANTE EN LA DIRECCIÓN VERTICAL DE 5M DE RADIO (TODALSHAUG, 2017) .....	42
FIGURA 11-12: LIMITACIONES FÍSICAS. ADAPTADO DE (TODALSHAUG, 2013).....	43
FIGURA 12-1:DIAGRAMA DE BUDAL DE LA BOYA SEABASED.....	45
FIGURA 12-2:DIAGRAMA DE BUDAL DE LA BOYA WAVEBOB.....	45
FIGURA 12-3:DIAGRAMAS DE BUDAL DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB SUPERPUESTOS ...	46
FIGURA 12-4: DIAGRAMA RADIAL QUE REPRESENTA LAS CARACTERÍSTICAS POSITIVAS QUE PREDOMINAN EN LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB.....	52
FIGURA 0-1:DIAGRAMA DE BUDAL DE LA BOYA SEABASED.....	65
FIGURA 0-2:DIAGRAMA DE BUDAL DE LA BOYA WAVEBOB.....	66
FIGURA 0-1: DIAGRAMA DE LAS TAREAS PRINCIPALES.....	67
FIGURA 0-2:DIAGRAMA DE LAS TAREAS DEL ESTUDIO DEL CONTEXTO Y EL ESTADO DEL ARTE .....	68
FIGURA 0-3:DIAGRAMA DE LAS TAREAS DE LAS BASES TEÓRICAS.....	68
FIGURA 0-4:DIAGRAMA DE LAS TAREAS DE LOS ASPECTOS PRÁCTICOS.....	68
FIGURA 0-5:DIAGRAMA DE LAS TAREAS DEL ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS .....	69

## 3.2. LISTA DE TABLAS

TABLA 10-1: DIMENSIONES DEL WEC SEABASED (OPENEISB, 2017).....	25
TABLA 10-2: DIMENSIONES DEL WEC WAVEBOB (MULIAWAN, GAO, & MOAN, 2013).....	27

TABLA 12-1: FRECUENCIAS RELATIVAS SEGÚN LA ALTURA Y EL PERIODO EN EL MAR CANTÁBRICO (ORTIZ, ARTECHE, & SANZ, 2004) .....	44
TABLA 12-2: CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB (PARTE 1) .....	49
TABLA 12-3: CARACTERÍSTICAS DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB (PARTE 2) .....	50
TABLA 12-4: BAREMO DE LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB, CON UN CRITERIO DE EVALUACIÓN QUE VA DE -- (MUY PERJUDICIAL) A ++ (MUY BENEFICIOSO). CADA SIGNO - RESTA UN PUNTO Y CADA SIGNO + SUMA UNO. EL 0 INDICA INDIFERENCIA O FALTA DE INFORMACIÓN .....	51
TABLA 14-1: DIAGRAMA DE GANTT .....	56
TABLA 15-1: DESGLOSE DE LOS GASTOS INTERNOS.....	57
TABLA 15-2: DESGLOSE DE LAS AMORTIZACIONES .....	57
TABLA 15-3: RESUMEN DE OTROS GASTOS.....	57
TABLA 15-4: DESCARGO DE GASTOS TOTALES .....	58
TABLA 0-1: CALCULO DEL VOLUMEN DESPLAZADO POR LOS DISPOSITIVOS .....	65
TABLA 0-1: DESGLOSE DE OTROS GASTOS .....	70

### 3.3. LISTA DE ACRÓNIMOS

IEA – International Energy Agency  
 IRENA – International Renewable Energy Agency  
 OES – Ocean Energy Systems  
 PTO – Power Takeoff System  
 WAB – Wave Activated Body  
 WEC – Wave Energy Converter

## 4. INTRODUCCIÓN

Este documento es un estudio sobre las condiciones bajo las que trabaja la tecnología para la explotación de la energía de las olas, sus características y los factores que influyen en su desarrollo y funcionamiento. Se van a presentar los fundamentos teóricos de la fluidodinámica que se encuentran detrás de la captación de energía de las olas. Y para completar el estudio, se van a comparar dos dispositivos conversores de energía undimotriz (WECs), Wavebob y Seabased, atendiendo a sus puntos fuertes y débiles en el contexto de la costa del País Vasco.

El desarrollo de las energías renovables se encuentra en un punto crítico, ya que desde el comienzo del siglo XXI se ha instalado una conciencia global dirigida a reducir el consumo de combustibles fósiles con el objetivo de proteger el planeta. En este contexto se han realizado avances tecnológicos en diversas fuentes de energía, como por ejemplo en la energía solar o la eólica, pero otras energías renovables aún no han alcanzado su fase de madurez, momento en el que la producción de energía pasa a ser rentable económicamente. En concreto, la energía undimotriz aún se encuentra en la primera fase de su desarrollo tecnológico, con una aportación a la red eléctrica todavía reducida. Aunque el potencial global contenido en los océanos es extraordinario, de momento no se está explotando de manera adecuada.

Este trabajo se centra en el estudio de estas tecnologías que están luchando por abrirse paso en el mundo de las renovables, tratando de captar la atención de posibles inversores y gobiernos. De los proyectos que se han llevado a cabo en las últimas dos décadas, muchos se han visto frenados por la gran pared económica al caer en la quiebra las empresas a su cargo, pero también se ha visto como otros han conseguido que el desarrollo de sus prototipos haya dado lugar a la instalación de dispositivos conectados a la red eléctrica.

A pesar de que en la Península Ibérica se han realizado varias pruebas acogiendo un amplio rango de diferentes tecnologías para la captación de energía de las olas, la mayor parte de la bibliografía disponible sobre este tema es en inglés, con lo que en algunos casos a lo largo del documento se aporta la traducción entre paréntesis de determinadas palabras con el objetivo de facilitar el contraste con otros materiales.



## 5. CONTEXTO

Las energías renovables se encuentran en el punto de mira del sector energético en este momento. Desde el ámbito internacional se lleva varios años intentando luchar contra el cambio climático, apostando tanto por la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, principalmente de dióxido de carbono, como por el aumento del consumo de energía procedente de fuentes renovables. En 1997, con la firma de la primera parte del Protocolo de Kioto se estableció una reducción de las emisiones globales en un 18% para 2020 (CUE, 2017), y en el más reciente Tratado de París en 2015 que entró en vigor en 2016 se pretende limitar el aumento de la temperatura mundial a 1,5°C sobre los niveles preindustriales para ese mismo año (EUCOM, 2015). En el ámbito europeo, la Directiva (2009/28/CE) de la Unión Europea sobre energías renovables, adoptada en 2009, impone que para 2020 al menos el 20% del consumo de energía de la Unión ha de provenir de fuentes renovables y una cuota del 10% de energía procedente de fuentes renovables en los combustibles utilizados para el transporte (Kerebel, Stoerring, & Horl, 2017). En la Comunicación de la Comisión Europea de 2014 (COM (2014) 8) “se considera que el potencial del sector de la energía oceánica puede contribuir a alcanzar los objetivos de la Estrategia Europa 2020, así como los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a largo plazo de la UE” (EUCOM, 2014).

En el año 2016 las energías renovables constituyeron un 24% de la energía total generada en el planeta. Según la Agencia Internacional de la Energía, en los próximos 5 años el aumento en la producción de energía procedente de fuentes renovables duplicará el aumento que sufrirán el carbón y el gas juntos, situándose en un 30% del total en 2020 (IEA, 2017). En 2016, en cinco países de la Unión Europea el porcentaje de energía proveniente de fuentes renovables supuso más del 30% de su consumo total, y 11 ya han alcanzado el objetivo fijado para el 2020, lo que también supone que aún hay 17 países que no lo han hecho (Eurostat, 2018).

## 6. OBJETIVOS Y ALCANCE

Mediante la realización de este trabajo se pretende realizar un estudio de las tecnologías y procesos fluidodinámicos para la extracción de energía undimotriz, e identificar los factores influyentes en el rendimiento y la viabilidad de la tecnología. Para ello se van a estudiar dos modelos, que se encuentran dentro de la categoría de absorbedores puntuales que pertenecen a los cuerpos activados por ondas, pero de características y diseño diferentes. Para ello se van a realizar las siguientes tareas:

- Estudiar las bases fluidodinámicas sobre las que se desarrolla la tecnología
- Analizar las especificaciones que deben destacar en un convertidor de energía undimotriz para su viabilidad económica a largo plazo
- Evaluar dos WECs respecto a las pautas definidas
- Relacionar las tecnologías en base a su éxito considerando los factores del entorno

El objetivo principal de este trabajo es meramente académico. Es importante señalar que con este trabajo no se pretende aportar algo nuevo al campo de la energía undimotriz, sino obtener una comprensión más profunda del sector.

## 7. BENEFICIOS

En este apartado se van a exponer los beneficios que el desarrollo de este trabajo ha aportado. Éste ha contribuido positivamente en los siguientes aspectos:

– Académicos:

Ha proporcionado una profundización de los distintos principios fluidodinámicos que están detrás de las diferentes tecnologías que existen para la extracción de la energía contenida en el mar.

– Económicos y sociales:

Existe la necesidad de desarrollar tecnologías que a la par que permitan cumplir los tratados internacionales relativos al calentamiento global sean una fuente fiable de energía. En este contexto, el desarrollo de la energía undimotriz es sumamente necesario.

Además, dado que no es un sector que haya alcanzado todavía su fase de madurez, al contrario de otras energías renovables como la eólica o la solar, toda contribución al avance de esta tecnología es positiva para la futura viabilidad económica de los proyectos.

Por último, ya que existen grandes variaciones en las necesidades energéticas locales y en la disponibilidad de recursos en todo el mundo “es necesario desarrollar un portfolio de tecnologías de energías renovables para disponer de suficientes herramientas” (Kofoed, 2017). Así pues, este estudio puede ser una ayuda para completar la caja de herramientas.

## 8. ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE

Más del 50% de la inversión mundial realizada para la investigación, desarrollo y demostración global para proyectos mareomotrices y undimotrices se encuentra en programas europeos. En este continente la mayor parte de las compañías dedicadas al sector se encuentran en el Reino Unido, en España y en Suecia, compitiendo en el plano internacional con Estados Unidos y Australia. La mayor parte de la tecnología se encuentra en fase de desarrollo, sin haber alcanzado la fase de empuje del mercado y por tanto su nivel óptimo de implantación (Magagna & Uihlein, 2015). En el 2017 la energía undimotriz está siendo desarrollada por 226 compañías diferentes (EMEC, 2017). Pero a pesar del interés mostrado por esta tecnología, la inversión total recibida para el desarrollo de la energía oceánica en 2016 fue de tan solo 211 millones de dólares americanos (USD) (ver Figura 8-1), pequeña en comparación con las inversiones del orden de 100.000 millones destinadas a otras energías, como por ejemplo la solar o la eólica (REN21, 2017). Greenpeace en un informe del 2015 indicó que las previsiones para 2050 eran que el coste de la inversión en energía oceánica caería más de un 70% (Teske, 2015), lo que conllevaría un menor coste de la electricidad.

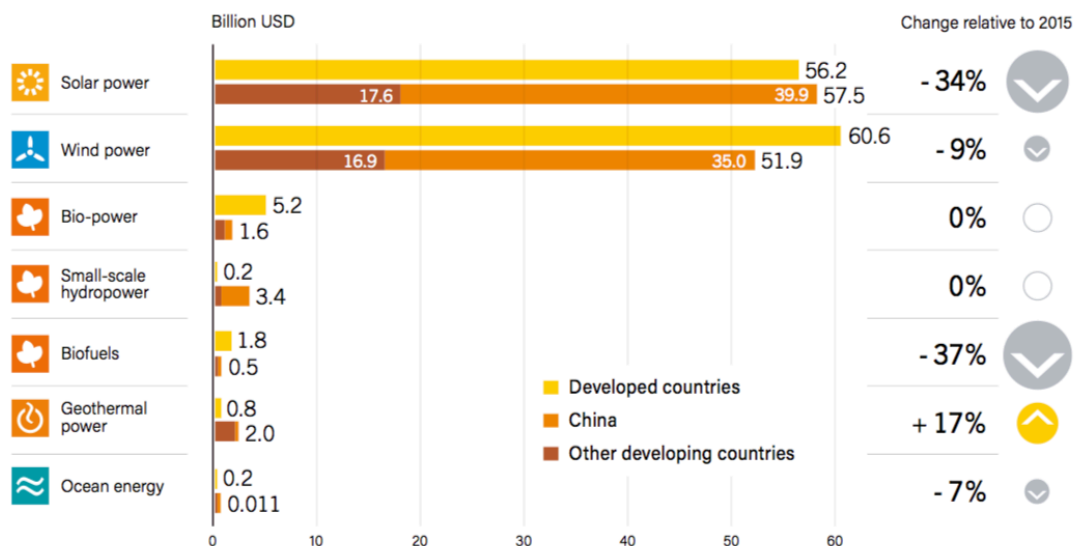


Figura 8-1: Inversión global en el año 2016 en energías renovables por tecnología (REN21, 2017)

La Agencia Internacional de la Energía Renovable (IRENA) en un informe publicado en agosto del 2014 sobre la energía oceánica indicó que de todas las tecnologías la energía undimotriz era la que, dados sus altos niveles de interés industrial, disponibilidad de recursos e interés financiero (IRENA, 2014), poseía un mayor atractivo relativo. Uno de los mayores problemas que afectan al desarrollo de la energía

undimotriz es la falta de consenso en el diseño de los diferentes prototipos, IRENA también afirma en su informe del 2014 que la principal barrera que se debería abordar para su desarrollo es la técnica.

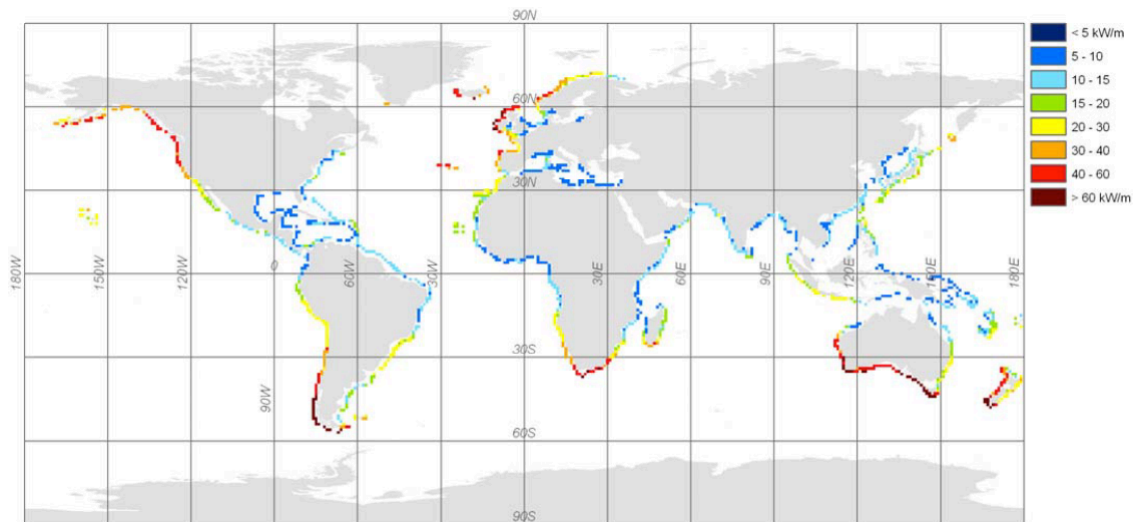


Figura 8-2: Potencia costera neta mundial anual (excluyendo contribuciones de zonas con  $P \leq 5 \text{ kW/m}$  y zonas potencialmente cubiertas por hielo (Mørk, Barstow, Kabuth, & Pontes, 2010)

Las condiciones meteorológicas óptimas para la extracción de la energía de las olas son vientos de largo alcance que soplen en una dirección predominante (Cabal, Labriet, & Lechón, 2011). Según un estudio realizado por el Consejo Nacional de Investigación de Canadá (Cornett, 2008) estas condiciones se dan en altas latitudes tanto del hemisferio Sur como del Norte. El mapa de la Figura 8-2 se basa en un estudio realizado sobre el potencial energético de las olas a nivel mundial, apoya las afirmaciones anteriores, localizando los puntos costeros con mayor potencial en la Costa Oeste de Norte América, en la mitad sur de la costa chilena, en la zona oeste de las costas europeas (sobre todo en Reino Unido e Islandia), en la costa sur de Sudáfrica, en la costa suroeste de Australia y en la costa oeste de Nueva Zelanda.

De acuerdo con este estudio, el potencial teórico bruto global es alrededor de 3,7 TW que equivaldrían a 29600 TWh/y, pero según datos del 2003 de Wavenet (Cabal, Labriet, & Lechón, 2011) la cantidad de electricidad que sin tener en cuenta factores económicos puede llegar a ser transformada a partir de la energía undimotriz se encontraría entre 140 y 770 TWh/y. En el 2007 el World Energy Council (Cabal, Labriet, & Lechón, 2011) publicó que si con la inversión necesaria se llevaban a cabo las mejoras pertinentes a las tecnologías existentes con la inversión necesaria se podrían alcanzar los 2000TWh/y. Los datos publicados por diferentes estudios y organizaciones varían

entre ellos, pero todos coinciden en que a nivel global esta fuente de energía no está siendo explotada de acuerdo a su potencial. Se estima que habrá en 2020 en Europa instalada una capacidad de 1 GW, pero si se sigue un plan de transición energética en 2050 se podrían alcanzar los 45 GW de potencia instalados (Teske, 2015).

## 9. TECNOLOGÍAS PARA LA EXTRACCIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

La energía de las olas se convierte en electricidad por medio de conversores de energía undimotriz, de ahora en adelante WECs (Wave Energy Converters). Éstas son máquinas capaces de explotar la potencia de las olas y convertirla en una forma de energía útil, como por ejemplo en electricidad (Kofoed, 2017). Los WECs están formados por cuatro subsistemas: el hidrodinámico, el PTO (power take-off system), el de control y el de reacción. El subsistema hidrodinámico está constituido por un elemento mecánico y transmitirá fuerza y movimiento al PTO y al subsistema de reacción; el PTO se encarga de convertir la potencia mecánica en electricidad, y está conectado con el subsistema de control; finalmente el subsistema de reacción mantiene el conjunto del WEC en posición relativa al fondo marino, y proporciona al PTO un punto de reacción y/o soporte para el subsistema hidrodinámico. En este documento se va a prestar especial atención al subsistema hidrodinámico.

Los WECs se distinguen de forma general según su orientación en tres categorías: los totalizadores o terminadores, los atenuadores y los absorbedores puntuales. Los totalizadores constan de una superficie larga horizontal y paralela a la dirección de la propagación de las olas, y se caracterizan porque eliminan la ola incidente existiendo tras estos solamente una onda radiada por la oscilación del cuerpo. Los atenuadores tienen las mismas características geométricas que los totalizadores, pero se colocan en dirección ortogonal a la propagación de la ola. Finalmente, los absorbedores puntuales, que son los dispositivos más comunes, tienen unas dimensiones más pequeñas en comparación con la longitud de onda de las olas, y no se colocan de forma estratégica con respecto a la dirección del movimiento de las olas.

Otras formas de categorizar los WECs son según su localización. Los dispositivos en costa (onshore) son totalizadores, y son los menos comunes. Los dispositivos cercanos a la costa (near shore) se ubican en aguas poco profundas donde el fondo marino juega un papel importante en el desarrollo de las olas. Y los dispositivos fuera de costa (offshore) se sitúan en aguas profundas donde las olas son consideradas mar de fondo, y son a priori los de mayor potencial ya que en alta mar la cantidad de energía transportada por las olas es mayor que en zonas más cercanas a la costa.

También se pueden diferenciar en función del tipo de PTO utilizado. El más común en los WECs es el hidráulico, seguido del de accionamiento mecánico directo, la turbina de aire y la de agua, y otros menos frecuentes. En el esquema la Figura 9-1 se puede observar el desglose de los dispositivos en desarrollo según las tres categorías mencionadas hasta ahora.

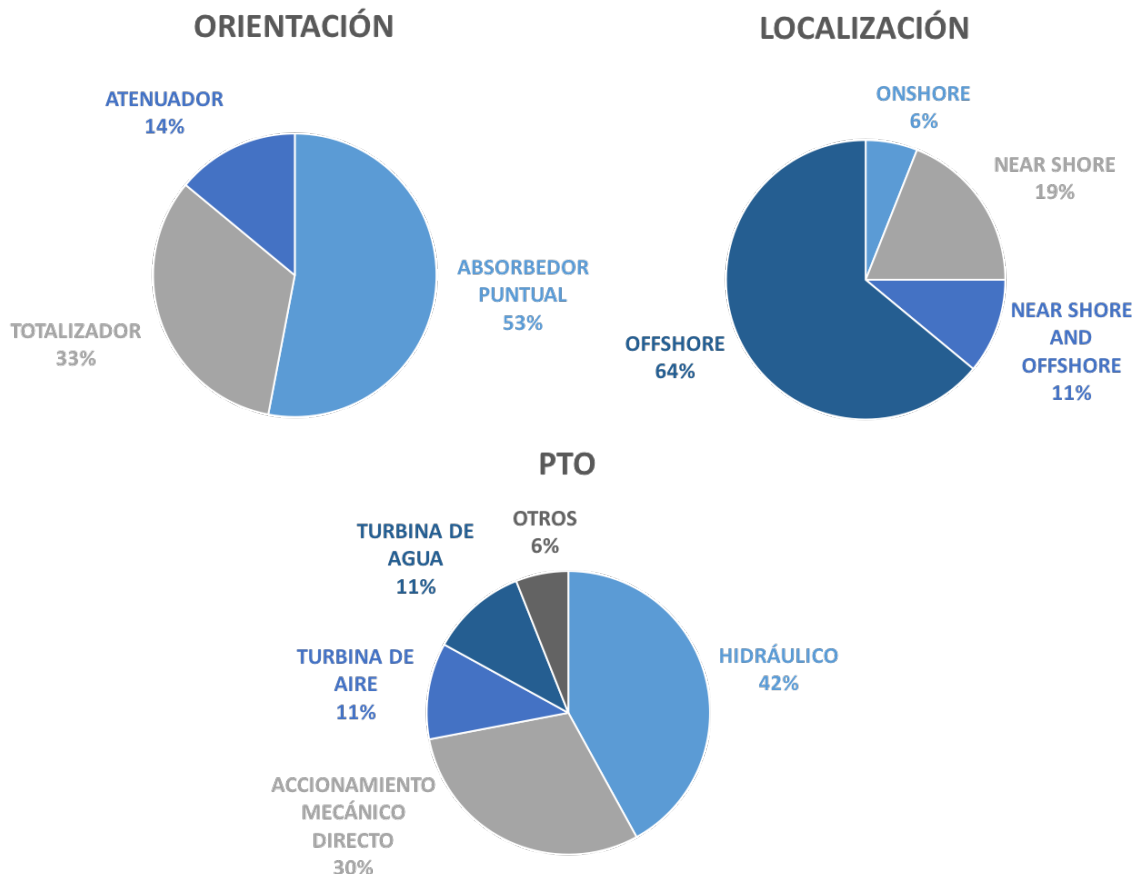


Figura 9-1: Desglose de los dispositivos en desarrollo. Adaptada de (IRENA, 2014)

Finalmente, una de las categorizaciones que mejor diferencian unos WECs de otros es la definida por la IEA en conjunto con la OES, que los distingue por el principio de captación de la energía: cuerpos activados por ondas, sistemas de rebosamiento y dispositivos con columna de agua oscilante.

### 9.1. Cuerpos activados por ondas

Los cuerpos activados por ondas (WABs) pueden ser flotantes o sumergidos, y a su vez los flotantes pueden tener un movimiento principal de traslación o de rotación, y los sumergidos pueden a su vez tener un movimiento principal de traslación o un



movimiento único de rotación estando anclados al fondo marino de modo abatible. De este tipo de WECs podemos encontrar ejemplos muy diferentes, con geometría y aspecto muy variados.

### 9.1.1. Pelamis

El Pelamis es un dispositivo offshore flotante semisumergido, que generalmente consta de 4 o 5 secciones tubulares, unidas por articulaciones universales que le permiten doblarse en dos direcciones (perpendicular y tangencialmente a las olas) (Pelamis, 2018). Está anclado de manera floja al fondo marino y se sitúa longitudinalmente de forma natural en la dirección de propagación de las olas. A medida que atraviesa las olas sus secciones se doblan activando un PTO hidráulico basado en el interior de las articulaciones, que se resiste al movimiento generando así energía eléctrica.

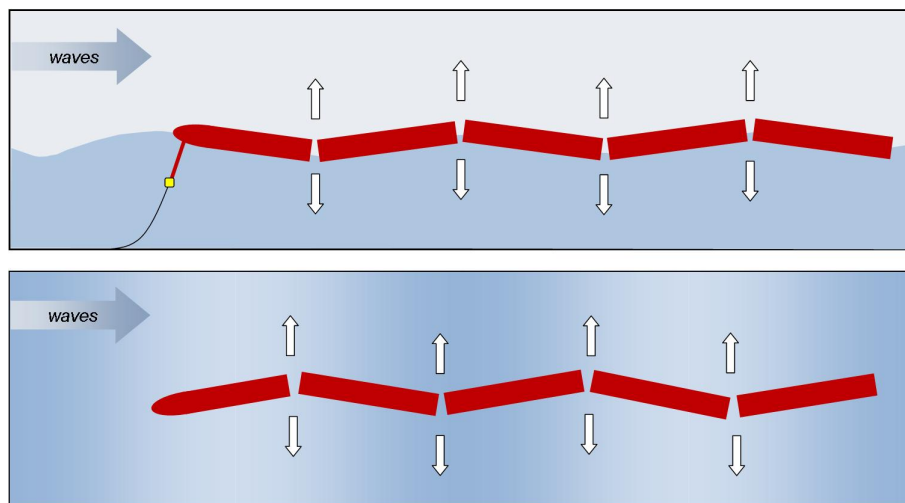


Figura 9-2: Movimiento del Pelamis en relación con la dirección de la ola incidente (Pelamis, 2018)

En 2004 Pelamis Wave Power presentó el primer prototipo a escala real en Billia Croo (Reino Unido), siendo éste el primer WEC offshore capaz de alimentar la red eléctrica nacional (EMEC, Pelamis Wave Power, 2014). Pelamis Wave Power entró en quiebra en noviembre del 2014 y sus bienes y propiedad intelectual pasaron a manos de Wave Energy Scotland. El dispositivo más moderno (P2-002) que fue desarrollado antes de la quiebra de la compañía es ahora propiedad del Centro Europeo de Energía Marina, quien busca nuevas maneras de utilizar este prototipo para el desarrollo de nuevos conocimientos (EMECP, 2016).



Figura 9-3: Prototipo Pelamis P2-001 instalado en Billia Croo (Reino Unido, 2010) (EMEC, Pelamis Wave Power, 2014)

### 9.1.2. Crestwing

El Crestwing (Crestwing, 2018) es un dispositivo que funciona bajo un concepto similar al Pelamis. Está semisumergido y es offshore. Lo forman dos únicas partes que tendrán un movimiento relativo que se utilizará para la generación de la energía. La articulación que une las dos estructuras con forma de caja solamente tiene un grado de libertad, y la energía se transmite mediante un mecanismo de piñón cremallera, teniendo por lo tanto un PTO mecánico que puede alcanzar una eficiencia del 90%. El sistema de anclaje es flexible y está formado por tres puntos de amarre, que permiten al dispositivo girar 360° para adaptarse a la dirección de las olas incidentes.

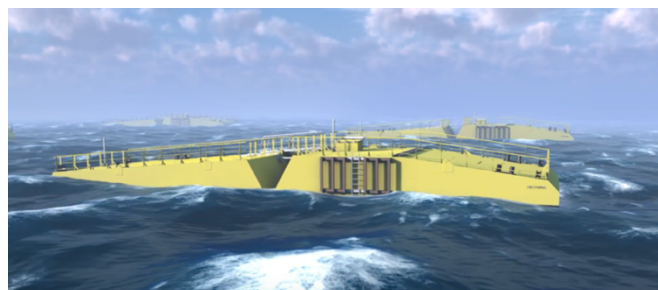
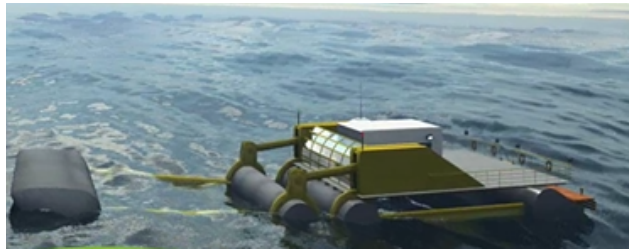


Figura 9-4: Simulación del prototipo Crestwing (Crestwing, 2018)

Este prototipo fue diseñado a principio de los años 2000 y ha sido desarrollado desde entonces por la compañía Crestwing ApS. Tras la presentación de varios prototipos a pequeña escala, se planea en 2018 el lanzamiento de un prototipo a escala 1:2, con el objetivo de estudiar el comportamiento del dispositivo para continuar con el desarrollo del diseño del prototipo a escala 1:1 (Lundsgaard, 2017).

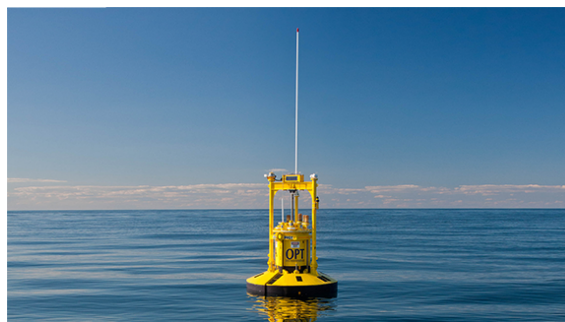
También se han desarrollado otros dispositivos similares a estos dos anteriores, pero a menor nivel. Entre ellos se encuentran Dexa (Figura 9-5), Martifer, MacCabe Wave Pump y Cockerell' s Raft (Kofoed, 2017).



*Figura 9-5: Simulación del prototipo DEXA (instalado por DexaWave a escala 1:5 en 2011 en DanWEC Hanstholm) (DEXA, 2018)*

### 9.1.3. OPT PowerBuoy, Wavebob, Aeabased y BOLT Lifesaver

El segundo grupo de cuerpos activados por ondas está constituido por las boyas semisumergidas offshore, que son WECs con movimiento de traslación vertical que acompaña a los cambios de alturas del nivel del mar con el paso de las olas. Uno de los diseños más exitosos es de la PowerBuoy de Ocean Power Technologies (OPT, 2018). Esta boya está formada por tres elementos: un flotador que se mueve verticalmente al compás de las olas, un mástil conectado al flotador y una placa de oscilación que hará de referencia. El movimiento relativo entre el mástil y el flotador acciona un mecanismo (PTO mecánico) que transformará el movimiento lineal en rotatorio, accionando así el generador. Este dispositivo puede tener de uno a tres amarres, dependiendo de los requisitos impuestos por el entorno y el cliente. La PowerBuoy se encuentra actualmente en funcionamiento y es un producto comercializable.



*Figura 9-6: PB3 PowerBuoy instalada en la costa de Nueva Jersey (OPT, 2018)*

La Wavebob tiene un concepto similar a la PowerBuoy, pero ésta sin embargo no utiliza una placa de oscilación como referencia sino un cuerpo sumergido (Mouwen, 2008). Un prototipo de la Wavebob fue instalado en alta mar, pero en el año 2013 la compañía que llevaba a cabo este proyecto quebró (OffshoreWind, 2013).



Figura 9-7: Boya Wavebob instalada en Irlanda (OffshoreWind, 2013)

También la boya Seabased es similar a las dos anteriores, pero en éstas el flotador de forma toroidal es la única parte del WEC que no está sumergida, y está conectada al generador lineal mediante una barra de acero (Seabased, 2018). La empresa Seabased ha sido la primera en el mundo en instalar un parque undimotriz con varios generadores conectados a la red eléctrica.

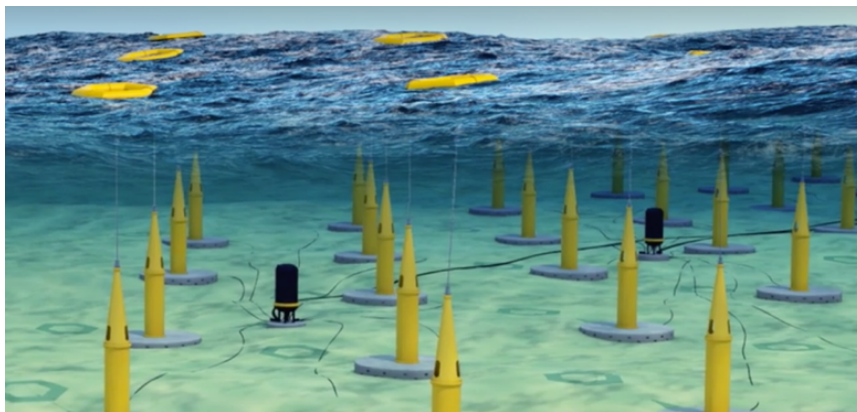


Figura 9-8: Simulación del parque undimotriz de Seabased (Seabased, 2018)

Finalmente, otro sistema similar formado principalmente por una boya, es el BOLT Lifesaver (BOLT, 2018). El principio básico de esta boya difiere de los anteriores, ya que el flotador que se encuentra en la superficie está unido al fondo marino mediante un cable a través de un cabrestante, y con el movimiento oscilante de las olas éste hace girar el generador mediante una caja de cambios. En el BOLT Lifesaver hay tres PTOs instalados, aunque puede albergar hasta cinco. Dos prototipos de esta tecnología fueron probados entre los años 2009 y 2014, y desde el año 2016 un prototipo a escala real

lleva funcionando en la costa hawaiana de Estados Unidos. Fred.Olsen, la compañía que lleva a cabo estos proyectos, planea instalar otra boya de prueba en el mismo lugar a lo largo del año 2018.



Figura 9-9: BOLT Lifesaver instalado en Hawaii desde Marzo de 2016 (BOLT, 2018)

#### 9.1.4. CETO

Este dispositivo está totalmente sumergido, y opera a diferentes profundidades, pudiendo ser instalado near shore y offshore (CETO, 2018). La boya oscila con el movimiento de las olas, y transmite la potencia a bombas y generadores, que se encargan de transformar la energía en electricidad. Estos están contenidos dentro de la misma boya, siendo lo único que está en contacto con el fondo marino el sistema de anclaje y el cableado que conecta el dispositivo a la red eléctrica.

Carnegie ha instalado su último modelo (CETO 6) en 2014 en la costa de Garden Island (Australia), el cual trabaja a mayores profundidades más lejos de la costa, y proporcionando potencias mayores en comparación con los modelos anteriores (CETO, 2018).

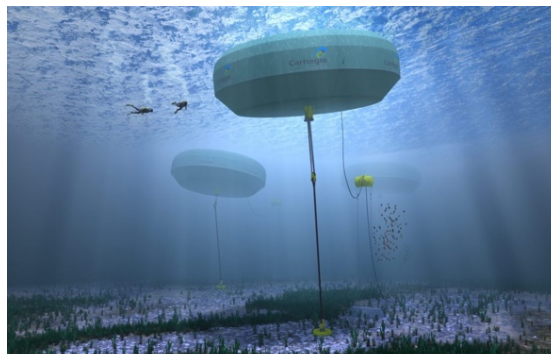


Figura 9-10: Simulación del prototipo CETO 6, instalado en la costa oeste australiana (CETO, 2018)

### 9.1.5. WaveRoller

El WaveRoller es un dispositivo mayormente o totalmente sumergido que opera near shore a profundidades entre 8 y 20 metros (WaveRoller, 2018). Las olas de mar de fondo mueven el único componente móvil del WaveRoller, que es un gran panel fijado al fondo del mar en uno de sus lados. El movimiento acompasado de adelante a atrás del panel activa un PTO hidráulico que transferirá energía a la red. El PTO se encuentra en una estructura hermética con el objetivo de separarlo del agua. El WaveRoller puede ser instalado individualmente o en granjas. La compañía que los desarrolla tiene 5 proyectos bajo desarrollo, dos en Peniche (Portugal), uno en la costa del noroeste Méjico y otro en el sudeste asiático.

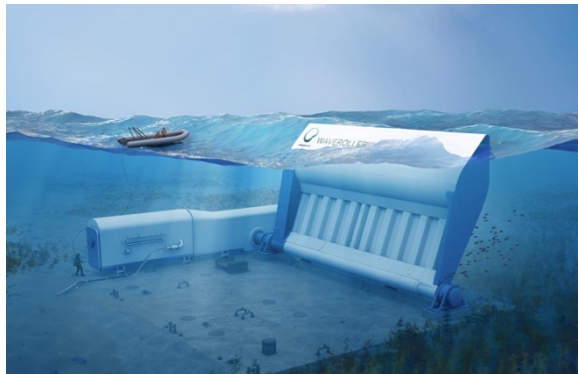


Figura 9-11: Simulación del prototipo WaveRoller (WaveRoller, 2018)

Otros dispositivos con un funcionamiento similar al WaveRoller son el Oyster (Figura 9-12) de Aquamarine Power cuyo proyecto cesó en 2015 (EMEC, Aquamarine Power, 2015) y el E1 WEC de Langlee (Figura 9-13).



Figura 9-12: Oyster de Aquamarine Projects en tierra (APO, 2018)

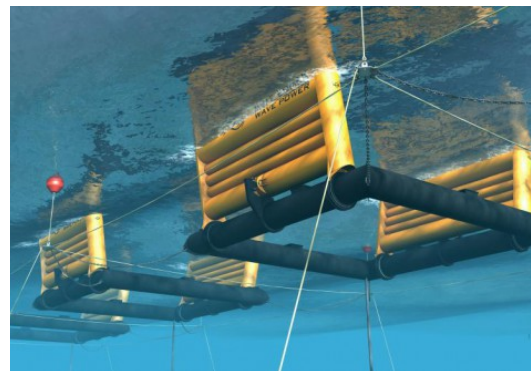


Figura 9-13: Simulación del prototipo E1 de Langlee (SubseaWorldNews, 2012)

### 9.1.6. Wavestar y Floating Power Plant

A parte de los WABs ya mencionados, también existen dispositivos en los que los convertidores de energía forman parte de estructuras mayores. El Wavestar WEC es un ejemplo de este tipo. A una gran estructura fijada al fondo marino se le añaden dos filas de boyas semisumergidas móviles, que con su movimiento vertical acompañando a las olas generarán energía de forma continua mediante un PTO hidráulico (Wavestar, 2018). Uno de los puntos fuertes de este proyecto es que en la estructura principal se pueden combinar diferentes tecnologías, añadiendo por ejemplo sistemas de generación de energía eólica.

La Floating Power Plant ha sido la primera planta offshore que combina la energía undimotriz con la eólica. El prototipo P37 (a escala 1:2,3 del P80) fue el primero en alimentar a la red eléctrica obteniendo la energía de ambas fuentes. La plataforma flotante P80 (FloatingPP, 2018) es el modelo más actual y está formada por una turbina eólica de entre 5 y 8 MW y un WEC de entre 2 y 3,6 MW, dependiendo de las condiciones meteorológicas. Esta estructura está anclada en un solo punto de la plataforma permitiéndola rotar libremente adaptándose a la dirección de las olas incidentes.



Figura 9-14: Wavestar a escala 1:2 instalado en 2009 en Hanstholm (Wavestar, 2018)



Figura 9-15: Floating Power Plant en Lolland (sur de Dinamarca, 2008) (FloatingPP, 2018)

## 10. TECNOLOGÍAS A EVALUAR

En esta sección se van a presentar con mayor detalle las dos tecnologías que van a ser estudiadas. Se han seleccionado estos dos dispositivos porque, siendo ambos absorbedores puntuales, presentan distintos sistemas de anclaje diferentes: uno está formado por un solo elemento oscilante con lo que la referencia se sitúa en el suelo marino mientras que el otro está compuesto por dos cuerpos flotantes siendo la referencia el cuerpo flotante inferior.

### 10.1. Seabased

La tecnología Seabased está siendo desarrollada por la compañía del mismo nombre, Seabased AB. Es una compañía sueca que hasta finales marzo del 2018 solamente operaba en los países nórdicos de Suecia y Noruega, habiendo desarrollado parte de su tecnología en la universidad de Uppsala. Es en marzo de 2018 cuando expande su tecnología hasta el continente africano, firmando un contrato de 100 MW con Ghana.

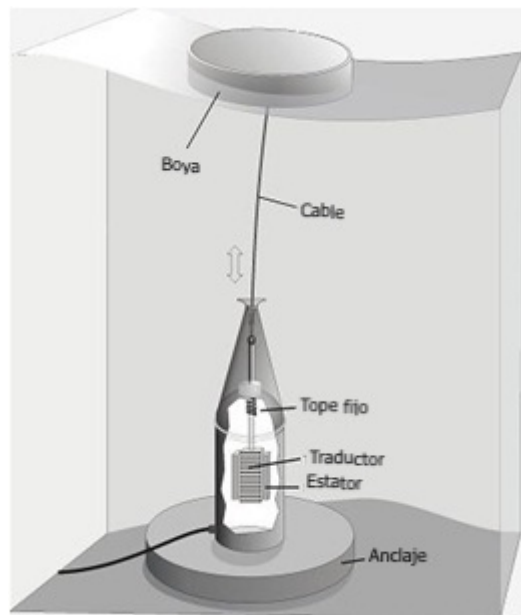


Figura 10-1: Esquema de las partes del WEC Seabased. Adaptado de (OpenEISB, 2017)

La tecnología Seabased está formada por un absorbedor puntual que tiene un movimiento vertical oscilatorio mediante el cual genera energía. Está constituido por una boya de acero de gran diámetro que está unida a un generador magnético lineal por un cable también de acero. El generador está situado en el suelo marino, sobre una placa



de cemento que lo une con éste mediante la acción de la gravedad. Este anclaje está diseñando en función de las características del suelo marino y de las condiciones de carga bajo las que trabajará el WEC de modo que se instala sin necesidad que excavaciones o daños estructurales del suelo. La energía eléctrica transformada en este generador no es adecuada para ser inyectada en la red eléctrica, por lo que se le hace pasar por una caja de cambios submarina que la transforma de nuevo de forma que puede ser inyectada a la red. Como se puede ver en la Figura 9-8 , varios WECs pueden ser conectados a una misma caja de cambios. Las dimensiones se recogen en la Tabla 10-1. La altura de la boya es de 1 m y su diámetro de 4,6 m, y la distancia entre el centro de la boya y el suelo marino es generalmente de 7 metros. Esta distancia puede variar dependiendo de las características del lugar donde se instale el WEC.

*Tabla 10-1: Dimensiones del WEC Seabased (OpenEISB, 2017)*

<b>SEABASED</b>	
<b>DIÁMETRO</b>	4,6 m
<b>ALTURA <sup>1</sup></b>	7 m
<b>FRANCOBORDO <sup>2</sup></b>	0,5 m
<b>CALADO</b>	0,5 m

Este WEC está diseñado para extraer energía de manera óptima en zonas del trópico donde las condiciones climáticas no son muy severas, con unos valores medios para la altura y periodo de las olas de 2 m y 6 s respectivamente. Sin embargo, conviene no olvidar que, dado que su desarrollo se ha realizado en el norte de Europa, se ha probado su supervivencia con olas de 9 metros y bajo una capa de hielo de 15 centímetros.

La información técnica de este dispositivo (recogida en esta sección y en la siguiente sección 12) se ha obtenido de la página web oficial de Seabased (Seabased, 2018), de la base de datos OpenEI del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (OpenEISB, 2017), y de la página oficial de inversiones de la empresa (Inversor, 2018).

---

<sup>1</sup> Medida desde el suelo marino

<sup>2</sup> Distancia entre la línea de flotación y la superficie superior de la boya

## 10.2. Wavebob

Wavebob es un WEC que fue desarrollado entre los años 1999 y el 2013, año en el que la compañía a cargo del proyecto entró en quiebra. Entre sus inversores principales se encontraban el gobierno irlandés y la compañía noruega Fred Olsen. Antes de que abandonase toda actividad la compañía había conseguido probar varios modelos a diferentes escalas, sin embargo, al incrementar los costes en 10 millones de forma inesperada, el proyecto fue abandonado (OffshoreWind, 2013).

La boya Wavebob es un absorbedor puntual axisimétrico, formado por dos cuerpos flotantes: una boya con forma toroidal que flota en la superficie marina, y otro cuerpo inferior de mayores dimensiones, conocido en inglés como float. La estructura está construida en acero. Ambos, boya y float, oscilan verticalmente pero a distintas frecuencias. En la Figura 10-2 se puede observar cómo el PTO se encuentra en la superficie por encima de la línea de flotación (la boya es la única parte que se encuentra sobre el agua), aunque el generador se encuentra dentro del float, por lo tanto sumergido. El sistema de anclaje une el fondo marino con el dispositivo por la zona azulada de la Figura 10-2 y, aunque normalmente es de 3 amarres flojos, puede variar en función de la localización de la boya y de las características oceanográficas.

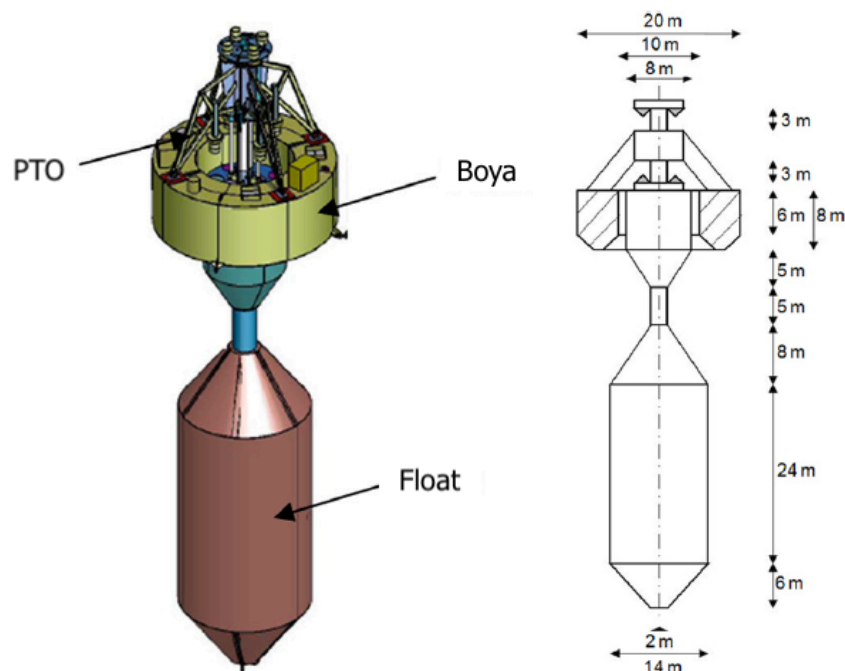


Figura 10-2: Concepto del WEC Wavebob (izquierda) y dimensiones (derecha). Adaptado de (Muliawan, Gao, & Moan, 2013)

Las dimensiones de este dispositivo son bastante grandes, con una longitud total de 66 metros, y una longitud de oscilación máxima de 6 metros (Tabla 10-2) La Wavebob está concebida para operar en aguas muy profundas ya que obviamente la parte más inferior del float no debe tocar el suelo marino. No se han encontrado especificaciones sobre el periodo óptimo de las olas para el que la extracción de energía es máxima, pero gracias a su complejo sistema de control puede adaptarse a diversas frecuencias; además, es capaz de funcionar bajo cargas extremas ya que el float alberga 4 sets de motores-alternadores.

Tabla 10-2: Dimensiones del WEC Wabebob (Muliawan, Gao, & Moan, 2013)

<b>WAVEBOB</b>	
<b>BOYA</b>	
<b>DIÁMETRO INTERIOR</b>	10 m
<b>DIÁMETRO EXTERIOR</b>	20 m
<b>ALTURA</b>	8 m
<b>CALADO</b>	2 m
<b>FLOAT</b>	
<b>DIÁMETRO A LA ALTURA DEL AGUA</b>	8 m
<b>ALTURA</b>	66 m
<b>CALADO</b>	50 m

La información técnica de este dispositivo (recogida en esta sección y en la sección 12) se ha obtenido del trabajo de Muliawan, Gao y Moan (2013), de la base de datos OpenEI del Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos (OpenEIWB, 2010), del trabajo de Herman K. Trabish (2010), y de un informe de E2I (Previsic, 2004).

## 11. PRINCIPIOS FLUIDODINÁMICOS

En este apartado se van a explicar los fundamentos y principios de la extracción de la energía contenida en las olas en relación con las fuerzas que actúan sobre los cuerpos flotantes de los WECs.

### 11.1. Naturaleza de las olas

El conocimiento teórico para el desarrollo de este apartado se ha obtenido de la *Guide to Wave Analysis and Forecasting* (WMO, 1998).

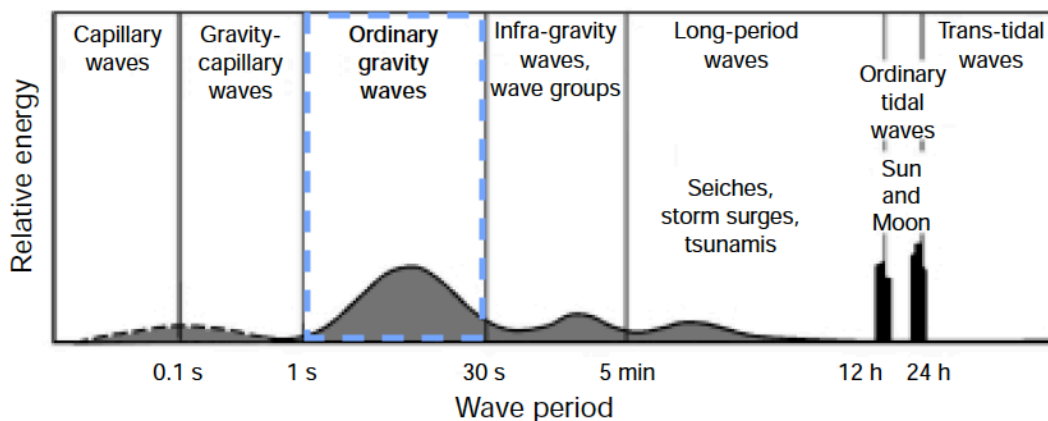


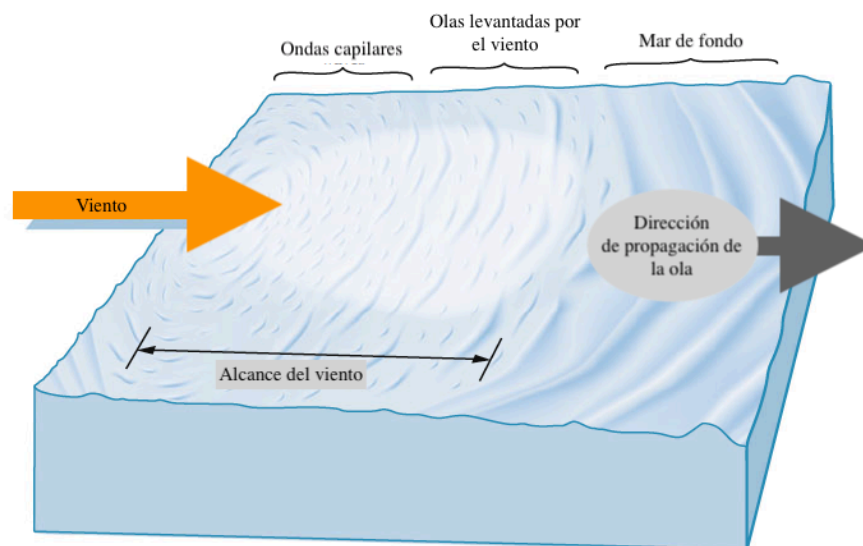
Figura 11-1: Clasificación de olas oceánicas por periodo de onda. Se representa la energía relativa que transporta la ola en función de su periodo (WMO, 1998)

La energía oceánica se concentra principalmente en las olas, en las corrientes, en el gradiente térmico oceánico y en las mareas. La energía undimotriz es la energía que se obtiene de las olas, que a su vez puede ser considerada como energía solar. En general, el viento es el elemento que da lugar a las olas en grandes superficies acuáticas, y es formado debido al calentamiento irregular de la Tierra que conlleva el movimiento de grandes masas de aire. Este calentamiento se produce gracias a la radiación incidente proveniente del Sol. Siendo estrictos, las mareas son consideradas como olas de periodos largos resultado de la fuerza gravitatoria existente entre la Tierra y la Luna, incluso los tsunamis son consideradas olas producidas por movimientos sísmicos. En el ámbito de la energía undimotriz, y en concreto en el de las olas explotadas por los conversores de energía, éstas son las generadas por el viento que sopla sobre la superficie de los océanos; a éstas se las considera olas gravitatorias ya que tanto la fuerza de la gravedad como el empuje del agua explican su existencia y se caracterizan

por su periodo y en función del tipo de ola de que se traten, transportan diferentes cantidades de energía.

En la Figura 11-1 se puede observar cómo el grupo de olas gravitacionales ordinarias (ordinary gravity waves, resaltado en azul), tienen un rango de periodos bastante amplio que deberá de ser considerado a la hora de diseñar un WEC y además transportan una gran cantidad de energía en comparación con los demás tipos de olas. Como ya se ha mencionado los conversores de energía undimotriz solamente extraen energía de las olas gravitacionales ordinarias, por ello este trabajo se centrará en éstas.

Figura 11-2: Generación de olas en el océano. Adaptada de (Garrison, 2010)



Existen dos tipos de olas gravitacionales ordinarias: las levantadas por el viento y el mar de fondo. Cuando el viento sopla sobre el océano, en la dirección de éste se comienzan a formar pequeñas ondas (ondas capilares) que se transforman hasta alcanzar la máxima altura posible para la velocidad del viento dada, el alcance de éste y su duración en el tiempo. Este espectro de olas corresponde al grupo de olas levantadas por el viento. Pero cuando el viento deja de soplar, dado que el mar es un excelente medio de transporte de energía con pérdidas de carga muy pequeñas a altas profundidades, las olas se continúan propagando en la misma dirección en la que lo habían hecho hasta este momento, pero bajo la denominación de mar de fondo (ver Figura 11-2). Las olas que dan lugar al mar de fondo se generan normalmente en alta mar, y pueden viajar grandes distancias a lo largo de los océanos hasta llegar a las zonas costeras. En la hidrodinámica de los conversores de energía undimotriz, aunque estos dos tipos de olas no suponen una diferencia, es importante comprender su naturaleza.

Una ola básica puede ser considerada como una onda sinusoidal, de cresta larga y progresiva que avanza en dirección perpendicular a la cresta a velocidad constante. Esta onda se puede representar como en la Figura 11-3, donde se definen los siguientes parámetros: la *cresta* que es la parte más alta de la ola, el *valle* que es el punto más bajo entre dos crestas, la *amplitud de onda* que es la distancia  $\lambda$  entre dos crestas o puntos en fase, el *periodo* de la ola que es el tiempo  $T$  que tardan dos crestas sucesivas en pasar por un mismo punto fijo, la *amplitud* de la ola  $a$  que es lo que ésta se eleva sobre el nivel medio del mar, y la *altura de la ola*  $H$  que es la diferencia de altura entre la cresta y el valle ( $H = 2a$ ).

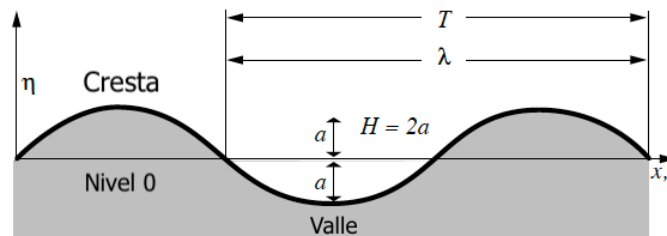


Figura 11-3: Onda sinusoidal simple. Adaptada de (WMO, 1998)

El perfil de esta onda sinusoidal tiene la forma siguiente:

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t) \quad (1)$$

dónde  $k = 2\pi/\lambda$  es el número de onda y  $\omega = 2\pi/T$  es la frecuencia angular. La *frecuencia* de la ola es el inverso del periodo ( $f = 1/T$ ), y la *pendiente* es el ratio entre la altura de la ola y la longitud de onda ( $S = H/\lambda$ ).

Cuando se observa el mar, es evidente que las olas no son tan simples como la de la Figura 11-3, sino que tienen formas irregulares que cambian constantemente de forma aparentemente caótica. Pero cualquier patrón observado en la superficie del océano se puede considerar como la suma de patrones simples de ondas superpuestas (WMO, 1998). Por ejemplo, en la Figura 11-4 se puede ver cómo la curva superior tiene un aspecto irregular con crestas a diferentes alturas, pero este perfil se puede representar como la suma de dos ondas sinusoidales de distinta longitud de onda. Dado que la superficie oceánica es irregular, se podrá representar superponiendo un número infinito de ondas sinusoidales de distintos periodos y direcciones de propagación (Figura 11-5).

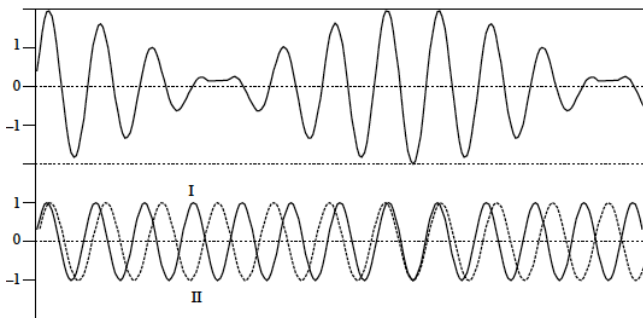


Figura 11-4: Dos ondas sinusoidales superpuestas (abajo) y su resultante (arriba) (WMO, 1998)

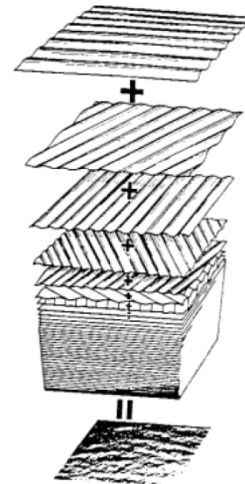


Figura 11-5: Superposición de varias ondas sinusoidales que forman así la superficie oceánica (WMO, 1998)

## 11.2. Fuerzas hidrodinámicas

El conocimiento teórico para el desarrollo de este apartado se ha obtenido del Capítulo 6 *Hydrodynamics of WECs* del libro *Handbook of Ocean Wave Energy* (Todalshaug, 2017).

Las fuerzas hidrodinámicas son el conjunto de fuerzas que se ejercen sobre un cuerpo fijo o flotante que se encuentra en el seno de un fluido en movimiento. Las principales fuerzas externas que actúan sobre un WEC cualquiera (aplicable a los WABs) son: la gravedad, el empuje, las fuerzas de excitación y radiación (debidas a las olas incidentes, y a las olas generadas), las fuerzas de maquinaria (correspondiente al PTO), la fuerza de arrastre, las derivadas de las olas, las fuerzas de las corrientes oceánicas y las fuerzas debidas al anclaje.

### 11.2.1. Hidroestática

Sobre un cuerpo flotante en reposo actúan la fuerza de gravedad (el peso) y el empuje (fuerza de flotación). El empuje es la fuerza que aparece al desplazar un volumen de agua, según el primer principio de Arquímedes “un cuerpo sumergido sufre una fuerza o empuje de flotación vertical igual al peso del fluido desalojado por el cuerpo” (Esteban & Peña, 2015). Un cuerpo flota cuando su densidad es menor a la densidad del

fluido que lo rodea, y desaloja un volumen de fluido equivalente a su propio peso, de modo que la fuerza de la gravedad y la de flotación se igualan.

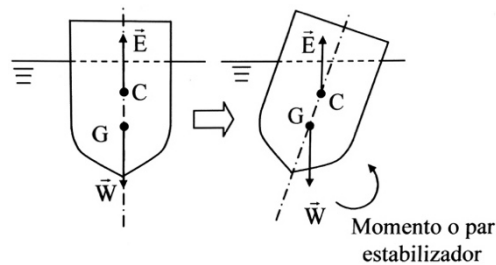


Figura 11-6: Equilibrio estable en cuerpos flotantes (Esteban & Peña, 2015)

Cuando a un cuerpo que flota en equilibrio se le induce una perturbación su equilibrio vertical se ve afectado. Cuando el centro de carena (C) se sitúa por encima del centro de gravedad (G) del cuerpo éste tendrá un equilibrio estable, es decir, al desequilibrarse aparecerá un par estabilizador que “redirigirá” el cuerpo de nuevo a su posición de equilibrio (Figura 11-6). En el caso de que C esté por debajo de G, el equilibrio será inestable y frente a una perturbación el cuerpo volcará. Cuando un cuerpo que flota en la superficie del océano se ve perturbado por una ola, este movimiento se puede descomponer en seis modos de vibración (ver Figura 11-7), y para que sea estable hidrostáticamente tiene que ser necesariamente estable en cabeceo y balanceo (Todalshaug, 2017).

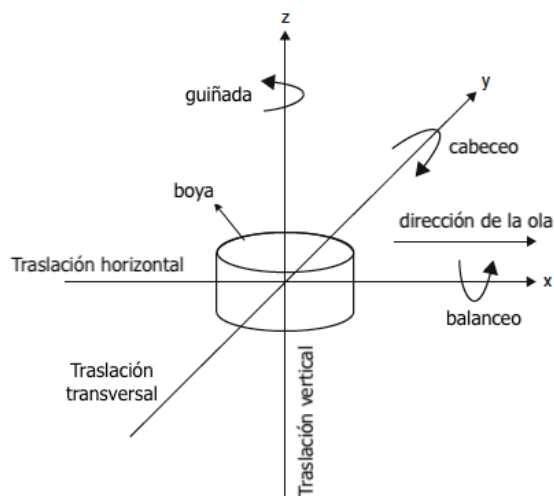


Figura 11-7: Movimientos de traslación y rotación para un cuerpo flotante. Adaptado de (Todalshaug, 2017)



Para el movimiento de traslación vertical la fuerza restauradora se expresa como  $F = Cs_z$ , donde  $s_z$ , es el desplazamiento vertical.  $C$  es el coeficiente de rigidez, que para este movimiento solo depende del área del plano de flotación ( $A_w$ ) del cuerpo:

$$C = \rho g A_w \quad (2)$$

### 11.2.2. Fuerzas de excitación

Las fuerzas de excitación son las fuerzas que corresponden a las olas que inciden sobre un cuerpo flotante, pero también tienen en cuenta la dispersión de las mismas tras la interacción con éste. Se pueden entender como las fuerzas que actúan sobre un cuerpo fijo en el seno de un mar activo, y es reducida a la presión hidrodinámica.

### 11.2.3. Fuerzas de radiación

Las fuerzas de radiación son las que aparecen por el movimiento del cuerpo, y se pueden entender como las fuerzas que actúan sobre un cuerpo en movimiento en el seno de un mar en calma. Estas fuerzas dependen de la frecuencia de oscilación. Se pueden dividir en:

- Masa añadida: corresponde a la fuerza de inercia de la masa de agua que es arrastrada debido al movimiento del cuerpo flotante y es proporcional a la aceleración del cuerpo. Representa cuánto aumentará la inercia del fluido circundante cuando el cuerpo se acelera.
- Amortiguación de la ola: corresponde a la potencia intercambiada entre el cuerpo flotante y el mar, y es proporcional a la velocidad del cuerpo. Esta fuerza está relacionada con las olas generadas por el cuerpo flotante en movimiento, e indica el tamaño de estas olas. Representa cuánta energía se extrae de las olas incidentes.

### 11.2.4. Fuerzas de maquinaria

Las fuerzas de maquinaria se deben a la acción del PTO sobre el sistema. Desde un punto de vista hidrodinámico no importa el modo en el que se producen con lo que el tipo de PTO utilizado en el WEC no es relevante. Esta fuerza se ejerce o bien entre el elemento mecánico que absorbe la energía (el cuerpo flotante) y el suelo marino o entre dos cuerpos flotantes. Esta fuerza indica cuanta fuerza y en qué momento del ciclo oscilatorio la fuerza es extraída por la maquinaria.

### 11.2.5. Fuerzas de arrastre

La fuerza de arrastre (drag en inglés) aparece al tener un cuerpo totalmente o parcialmente sumergido en agua en movimiento, la cual fluye sobre la superficie de éste, el sistema de anclaje o cualquier elemento en contacto con ella. Está asociada a la pérdida de energía cinética con lo que es directamente proporcional al cuadrado de la velocidad relativa entre el agua y la superficie del cuerpo. Normalmente se diseñan los dispositivos con idea de reducir al máximo las pérdidas por fuerzas de arrastre en mares normales, pero si nos encontramos con marejadas fuertes, dada la relación cuadrática de la fuerza con la velocidad, las pérdidas pueden ser importantes.

### 11.2.6. Fuerzas de frecuencia baja

En la clasificación de las fuerzas hidrodinámicas se pueden encontrar unas fuerzas que generan una excitación y respuesta lentas y de frecuencia baja. Éstas son las derivadas de las olas y de los anclajes. Las fuerzas derivadas de las olas se deben a la carga no simétrica ejercida por las olas sobre el cuerpo, a la interacción entre olas de diferente periodo y a la interacción entre la oscilación de las olas y la propia oscilación del cuerpo flotante. Normalmente esta excitación no es significativa, pero en situaciones de olas grandes cuando el periodo de oscilación de la excitación coincide con la frecuencia de resonancia del anclaje pueden surgir problemas. Salvo que el sistema de anclaje esté diseñado como referencia para la conversión de energía, éste está diseñado para que influya lo menos posible en la absorción de energía, pero ante un mal diseño o en situaciones de tormenta la resonancia a bajas frecuencias puede dañar el sistema.

Unas fuerzas que no deben pasarse por alto en algunas ocasiones son las de las corrientes o mareas, que en algunas zonas críticas también producen excitaciones lentas a frecuencias bajas.

## 11.3. Descripción matemática de la extracción de la energía de las olas

El conocimiento teórico para el desarrollo de este apartado se ha obtenido del artículo *A review of wave-energy extraction* (Falnes, 2007).

Con el objetivo de simplificar el desarrollo matemático se va a considerar el caso más simple: un cuerpo flotante que oscila con un único grado de libertad (en la dirección vertical). Además, se considerará que la amplitud de oscilación al igual que la de excitación son lo suficientemente pequeñas como para poder aplicar la teoría lineal. El desarrollo se realizará en el dominio del tiempo.

La ecuación dinámica que representa el movimiento del cuerpo oscilatorio es la siguiente, dónde  $s(t)$  es la posición del cuerpo y  $\dot{s}(t)$  es su velocidad<sup>3</sup>:

$$(m + A_{r\infty})\ddot{s}(t) + B_f\dot{s}(t) + k_r(t) * \dot{s}(t) + Cs(t) = F_e(t) + F_u(t) \quad (3)$$

dónde  $m$  representa la masa del cuerpo,  $B_f$  representa las pérdidas mecánicas por fricción y viscosidad,  $C$  es la rigidez,  $F_e(t)$  es la fuerza de excitación resultante de la ola incidente y  $F_u(t)$  es la fuerza aplicada por la maquinaria (para realizar el control y poner en funcionamiento el PTO). El término  $A_{r\infty}$  está relacionado con la masa añadida  $A_r(\omega)$ :  $A_{r\infty} = A_r(\infty)$ . El término  $k_r(t)$  corresponde a la amortiguación de la ola, y es una función causal (nula para  $t < 0$ ) ya que es una función de respuesta a un impulso (la naturaleza de este término se explica teniendo en cuenta que las fuerzas de radiación aparecen una vez el cuerpo oscilatorio ha sido excitado por la ola incidente).  $k_r(t)$  es la derivada inversa de Fourier de la expresión siguiente:

$$K_r(\omega) = Z_r(\omega) - i\omega A_{r\infty} = B_r(\omega) + i\omega(A_r(\omega) - A_{r\infty}) \equiv B_r(\omega) + iD_r(\omega) \quad (4)$$

dónde  $Z_r(\omega)$  es la impedancia radiactiva, y  $B_r(\omega)$  es la resistencia radiactiva, también llamado coeficiente de amortiguamiento. Transformado la expresión (4) se puede definir la amortiguación de la ola como:

$$k_r(t) = b_r(t) + d_r(t) \quad (5)$$

Multiplicando cada término de la ecuación dinámica (3) por la velocidad del oscilador  $u(t) = \dot{s}(t)$ , se puede obtener la potencia instantánea transmitida a la maquinaria  $P_u(t)$ :

$$P_u(t) = -F_u(t)u(t) \quad (6)$$

$$P_u(t) = F_e(t)u(t) - (m + A_{r\infty})\dot{u}(t)u(t) - B_f u(t) - [b_r(t) * u(t)]u(t) - [d_r(t) * u(t)]u(t) - Cs(t)\dot{s}(t) \quad (7)$$

Los términos se pueden agrupar diferenciando los que contribuyen a la potencia activa instantánea  $P_b(t)$  y a la potencia reactiva instantánea  $P_d(t)$ .

$$P_u(t) = P_b(t) + P_d(t) \quad (8)$$

$$P_b(t) = F_e(t)u(t) - B_f[u(t)]^2 - [b_r(t) * u(t)]u(t) \quad (9)$$

$$P_d(t) = -(m + A_{r\infty})\dot{u}(t)u(t) - [d_r(t) * u(t)]u(t) - Cs(t)\dot{s}(t) \quad (10)$$

<sup>3</sup> El símbolo (\*) denota la operación de convolución

Ya que la potencia reactiva solamente representa un intercambio alterno de la energía entre la maquinaria y el sistema oscilatorio, considerando un periodo de tiempo lo suficientemente largo, ésta no contribuye a la potencia media transmitida a la maquinaria. Con lo que esta potencia media se puede expresar como:

$$P_u = \overline{P_u(t)} = \overline{F_e(t)u(t)} - \overline{B_f[u(t)]^2} - \overline{[b_r(t) * u(t)]u(t)} \quad (11)$$

El primer término de la parte derecha ecuación (11) es la potencia de la excitación  $P_e$ , el segundo es la potencia que corresponde a la disipación de energía  $P_f$ , y el tercero es la potencia radiada  $P_r$ . De modo que  $P_u = P_e - P_f - P_r$ . Agrupando la potencia de excitación y la radiada obtenemos la potencia de las olas que es absorbida:  $P_a = P_e - P_r$ . La potencia radiada a pesar de ser precedida por un signo negativo no es considerada como pérdida, ya que su existencia es necesaria para la captación de energía.

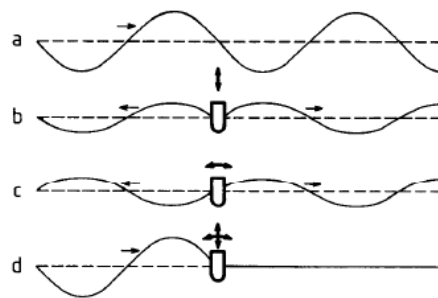


Figura 11-8: Representación de interacción ondas generadas por un cuerpo oscilador con las olas (Falnes, 1997)

Se puede demostrar teóricamente que cuando un cuerpo oscila en un solo modo, la absorción máxima de la energía incidente de la ola es del 50% (Falnes, 1997). Para absorber una ola se ha de generar otra ola que la anule, y como se puede observar en la Figura 11-8 dónde la Figura 11-8(a) representa una ola sin alterar, la Figura 11-8(b) ilustra la generación de una ola simétrica en aguas calmas por un cuerpo flotante pequeño que oscila verticalmente, la Figura 11-8(c) ilustra la generación de una ola asimétrica en aguas calmas por un cuerpo flotante pequeño. La Figura 11-8(d) representa la superposición de todas las anteriores y se puede observar como aguas abajo del cuerpo oscilador la onda resultante es nula mientras que aguas arriba la resultante es igual a la onda inalterada. Esto es porque la superposición de las dos olas generadas aguas abajo cancelan la ola natural y aguas arriba se cancelan entre ellas. Queda probado por tanto en el caso de tener un dispositivo oscilador que sólo tiene un modo vibratorio (vertical en nuestro caso), solo es posible la absorción de un 50% de la potencia de excitación.

Así pues, la velocidad óptima del cuerpo oscilatorio es la que asegura que

$$P_u = \frac{1}{2}P_e \quad (12)$$

de modo que  $\frac{P_e}{2} = P_e - P_f - P_r$ , con lo que  $P_f + P_r = P_e/2$ . Se puede escribir la siguiente expresión para potencias instantáneas:

$$B_f[u(t)_{OPT}]^2 + [b_r(t) * u(t)_{OPT}]u(t)_{OPT} = \frac{1}{2}F_e(t)u(t)_{OPT} \quad (13)$$

$$\therefore B_f[u(t)_{OPT}] + [b_r(t) * u(t)_{OPT}] = \frac{1}{2}F_e(t) \quad (14)$$

La velocidad óptima queda definida como dependiente de la fuerza de excitación, y considerando la transformada de Fourier de la última ecuación se puede afirmar que la velocidad óptima no solo depende de los valores presentes de la fuerza de excitación. Si ahora se considera una sinusoidal, con una fuerza de excitación  $F_e(t) = F_{e,0}\cos(\omega t)$  y una respuesta  $u(t) = u_0\cos(\omega t + \varphi)$ , donde  $\varphi$  es el desfase existente entre la excitación y la respuesta. La ecuación (11) se transforma en <sup>4</sup>:

$$P_u = \frac{\frac{1}{2}F_{e,0}u_0 [\cos(\varphi) + \cos(2\omega t + \varphi)] - B_f u_0^2 [\cos(\omega t + \varphi)]^2}{B_r(\omega) u_0^2 [\cos(\omega t + \varphi)]^2} \quad (15)$$

que calculando los valores medios de las expresiones <sup>5</sup> se obtiene la siguiente expresión en función del desfase entre la excitación y la respuesta:

$$P_u = \frac{1}{2}F_{e,0}u_0 [\cos(\varphi)] - \frac{1}{2}B_f u_0^2 - \frac{1}{2}B_r(\omega) u_0^2 \equiv P_e - P_f - P_r \quad (16)$$

Para obtener una potencia  $P_u$  máxima se ha de intentar maximizar el primer término de la expresión (16), que se consigue al igualar  $\cos(\varphi)$  a 1, es decir, cuando el desfase  $\varphi$  es nulo:  $\varphi_{OPT} = 0$ . La velocidad óptima en estas condiciones tendrá una amplitud de

$$u_{0\ OPT} = \frac{F_e(\omega)}{2[B_f + B_r(\omega)]} \quad (17)$$

<sup>4</sup>  $\cos x \times \cos y = \frac{1}{2}[\cos(x - y) + \cos(x + y)]$ ;  $\cos(-x) = \cos(x)$

<sup>5</sup>  $\overline{\cos(x)} = 0$ ;  $\overline{[a \cos(x)]^2} = \frac{1}{2}a^2$

Es importante señalar que esta amplitud sólo se puede alcanzar cuando dicha velocidad no supere el valor crítico límite fijado por el diseño del dispositivo oscilante  $s_{max} < u_{0\ OPT}/\omega = F_e(\omega)/2\omega[B_f + B_r(\omega)]$ .

#### 11.4. Resonancia y control

El conocimiento teórico para el desarrollo de este apartado se ha obtenido del Capítulo 6 *Hydrodynamics of WECs* del libro *Handbook of Ocean Wave Energy* (Todalshaug, 2017).

La resonancia es un fenómeno que ocurre cuando la fuerza de excitación que actúa sobre un sistema tiene una frecuencia que es igual a la frecuencia natural de oscilación del sistema. Para cualquier cuerpo flotante que oscila verticalmente se puede definir una frecuencia de resonancia. Un sistema oscilará en resonancia para la frecuencia que anule la reactancia del sistema. De acuerdo con la ecuación que describe el movimiento del sistema esto ocurrirá cuando la energía potencial y la cinética sean iguales:

$$\omega_0(m + A_{r\infty}) - \frac{C}{\omega_0} = 0 \quad (18)$$

El periodo de resonancia es entonces:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{C}{m+A_{r\infty}}}} \quad (19)$$

El ancho de banda relativo mide cómo se comporta el sistema para frecuencias de excitación distintas a la de resonancia, y dado que las olas que se encuentran en el océano no tienen una frecuencia fija, ésta es una propiedad importante de los WECs, que se define como:

$$\frac{\Delta\omega_{res}}{\omega_0} = \frac{K_r}{\sqrt{C(m+A_{r\infty})}} \quad (20)$$

La mayoría de los WECs necesitan operar a frecuencias cercanas a la de resonancia para poder obtener una cantidad de energía suficiente. Sistemas con un ancho de banda grande podrán operar en condiciones cercanas a las óptimas a frecuencias diferentes a la de resonancia. Las condiciones óptimas vienen definidas por el movimiento relativo entre el sistema captador de energía y la ola en el momento de extracción de la máxima potencia. La trayectoria óptima viene definida por la posición y la velocidad del cuerpo cuando se cumplen las condiciones óptimas. Cuando se diseña

un WEC se ha de hacer de tal modo que la trayectoria del absorbedor en respuesta a las olas incidentes se parezca lo máximo posible a la trayectoria óptima. Esto se consigue con una correcta elección de la inercia, la rigidez, el amortiguamiento y las fuerzas de maquinaria (PTO). Normalmente un buen diseño no es suficiente, con lo que hay que añadir un sistema de control para que la maquinaria mejore la respuesta. Para boyas con un solo modo de oscilación (por ejemplo vertical) la velocidad de éstas debe estar en fase con la fuerza de excitación, y la amplitud debe ser ajustada para una interferencia adecuada entre las olas incidentes y las generadas; esto se puede conseguir con un control en el amortiguamiento aplicado por la maquinaria. Las estrategias de control ayudan a que el ancho de banda relativo aumente.

## 11.5. Límites y máximos de la potencia absorbida

### 11.5.1. Límite debido al patrón de radiación

Cuando un cuerpo axisimétrico pequeño oscila verticalmente sobre la superficie acuática irradiará ondas circulares (frente de onda circular) como se observa en la Figura 11-9, y esta propiedad resultará en una limitación de la potencia que podrá ser absorbida de las olas incidentes. Para este tipo de dispositivos este límite tomará el valor  $P_A$ , definido por Todalshaug (2013) como:

$$P_A \leq \alpha \frac{k}{J} \quad (21)$$

donde  $\alpha$  es igual a 1 por estar ante un movimiento oscilatorio vertical (si se estuviera considerando un movimiento de traslación horizontal o cabeceo, donde la onda irradiada tiene un patrón dipolar,  $\alpha = 2$ ). Como se ha mencionado en la sección 11.1,  $k$  es el número de onda y es igual a  $k = 2\pi/\lambda$ .  $J$  es el transporte de energía de las olas y viene dado en [W/m].

Se sabe que, en aguas profundas,  $\lambda = gT^2/2\pi$  y  $J = \rho g^2 TH^2 / 32\pi$  (Falnes, 2007), con lo que en la ecuación (22) se puede expresar el límite de la potencia  $P_A$  viene dado en función del periodo de la ola y de la altura de la misma. Teniendo en cuenta

esta expresión, se puede afirmar que la potencia máxima limitada por el patrón de radiación es independiente del tamaño y la geometría del elemento oscilador.

$$P_A = \frac{\rho g^3 T^3 H^2}{128\pi^3} = c_\infty T^3 H^2 \quad (22)$$

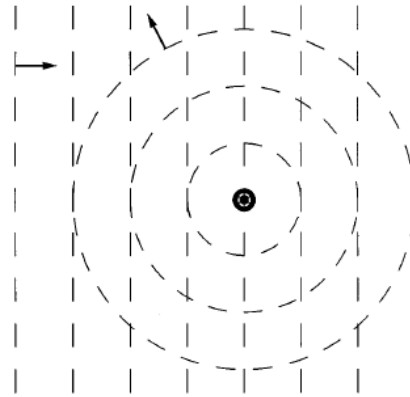


Figura 11-9: Patrón de radiación de las ondas generadas por un absorbente puntual con movimiento oscilatorio vertical (Falnes, 1997)

### 11.5.2. Límite de budal

En 1980 Kjell Budal presentó un límite superior para la potencia que podía ser absorbida de las olas en función del tipo de dispositivo utilizado y de su modo de oscilación (Falnes, 2007). Basándose en la ecuación (16) se puede establecer la desigualdad

$$P_u \leq \frac{1}{2} F_{e,0} u_0 \quad (23)$$

Para un modo de vibración con oscilación vertical se puede afirmar que (Falnes & Hals, 2011)

$$F_{e,0} < \rho g S_w A \quad (24)$$

$$u_0 < \frac{\omega V}{2S_w} \quad (25)$$

donde  $S_w$  es el área del cuerpo oscilante en el plano de flotación,  $A$  es la amplitud de la onda (llamada  $a$  en la sección 11.1) y  $V$  es el volumen desplazado por el cuerpo flotante. Introduciendo esta información en la ecuación (23) se puede definir el segundo límite para la potencia absorbida  $P_B$ :

$$P_B \leq \frac{\rho g A \omega V}{4} = \frac{\rho g H \pi V}{4T} = c_0 \frac{HV}{T} \quad (26)$$



Este límite, al contrario que el anterior  $P_A$ , sí que depende de la geometría del cuerpo flotante, ya que se introduce el término  $V$ . Este límite también se puede aplicar a un conjunto o red de cuerpos flotantes, siendo  $V$  la suma de los volúmenes desplazados de todos los cuerpos (Falnes & Hals, 2011).

Para otros modos de oscilación también está definido este límite (Todalshaug, 2017):

- Traslación horizontal:  $P_B < 2\pi^3 \rho V \frac{H}{T^3} l$
- Cabeceo:  $P_B < \frac{2}{3}\pi^3 \rho V \frac{H}{T^3} l$

donde  $l$  es la longitud del cuerpo oscilante en la dirección de propagación de la ola.

### 11.5.2.1. Diagrama de Budal

Los diagramas de Budal son una representación gráfica de los límites superiores de la potencia absorbida en función del periodo de la excitación,  $P_A$  y  $P_B$ . En la Figura 11-10 las líneas continuas representan el límite debido al patrón de resonancia (línea continua ascendente) y el límite de Budal (línea continua descendente) para una

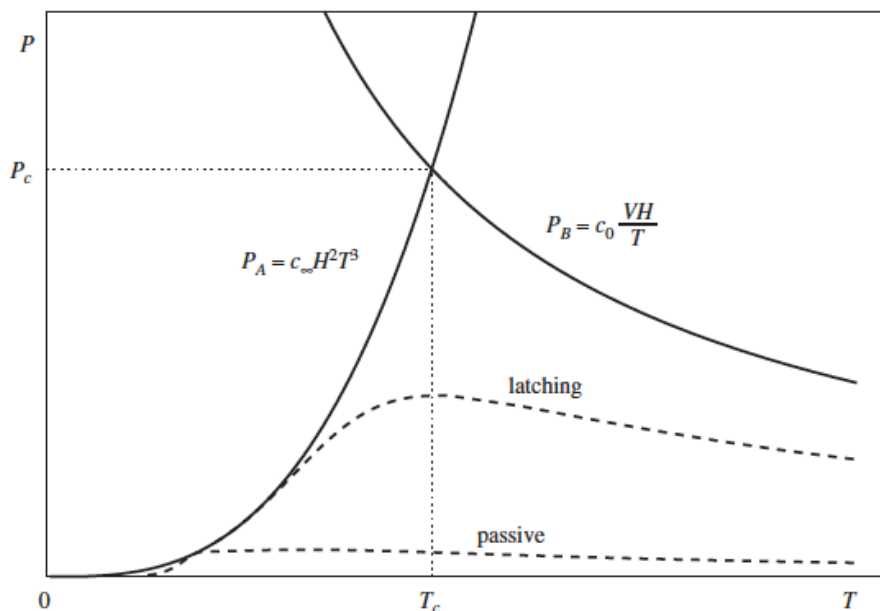


Figura 11-10: Diagrama de Budal, representados los límites superiores con línea continua, una situación con control del movimiento (latching) representada con la línea discontinua superior, y una situación sin control del movimiento (passive) con la línea discontinua inferior (Falnes, 2007)

potencia  $P$  que puede ser absorbida para una altura de la ola  $H$  y un periodo  $T$ . La curva discontinua inferior representa la potencia que realmente absorbería un dispositivo sin ningún tipo de control del movimiento, y la curva discontinua superior representa la potencia absorbida por un dispositivo con un movimiento controlado por un enclavamiento bajo una carga óptima. El área por encima de las dos curvas limite no está permitido para ningún dispositivo, pero esto no significa que toda el área por debajo de éstas sea posible (Falnes, 2007), ya que existen límites físicos para la amplitud de oscilación del dispositivo. En la Figura 11-11 se expone el diagrama de Budal en función del periodo de la ola y de la altura de ésta.

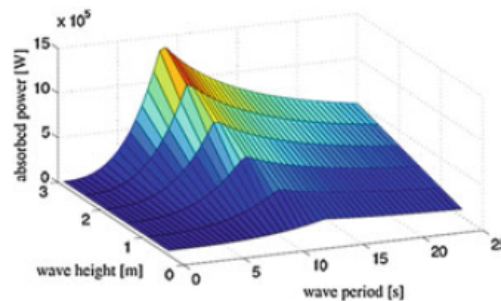


Figura 11-11: Diagrama de Budal para una semiesfera oscilante en la dirección vertical de 5m de radio (Todalshaug, 2017)

### 11.5.3. Límite debido a restricciones en la amplitud

Además de las restricciones teóricas en la potencia absorbida presentadas hasta ahora en los apartados anteriores, también se encuentran limitaciones debidas a restricciones en el volumen desplazado por el cuerpo oscilante (Todalshaug, 2013). Estas restricciones cobran importancia en distintas fases del proceso de generación de energía (Figura 11-12).

En primer lugar, se encuentran las limitaciones físicas que residen en el volumen del cuerpo oscilante. Es obvio que este volumen condicionará el volumen de agua que se va a desplazar. Se puede definir entonces el volumen desplazado máximo, que se puede definir en función del área del cuerpo flotante en el plano de la superficie libre del agua. Se puede afirmar que el desplazamiento máximo en la dirección vertical para un movimiento oscilatorio armónico (Todalshaug, 2013)

$$S_{max} = \frac{V}{2A_w} \quad (27)$$

donde  $s_{max}$  es el desplazamiento máximo,  $V$  es el volumen desplazado y  $A_w$  es la sección del cuerpo en la dirección de la superficie libre del agua. Dado que  $A_w$  viene definido por la geometría del cuerpo flotante se puede reescribir la expresión (27) como:

$$V_{max} = 2s_{max}A_w \quad (28)$$

En segundo lugar, encontramos limitaciones en la amplitud del movimiento del dispositivo oscilante, como por ejemplo topes fijos en la maquinaria o longitudes de elementos involucrados en el movimiento del cuerpo flotante. También se pueden encontrar limitaciones en la maquinaria relacionadas como potenciales instantáneos o fuerzas máximas. Además, es evidente que la potencia final obtenida se verá reducida por pérdidas de fricción y viscosas causadas por el movimiento del conjunto en el agua.

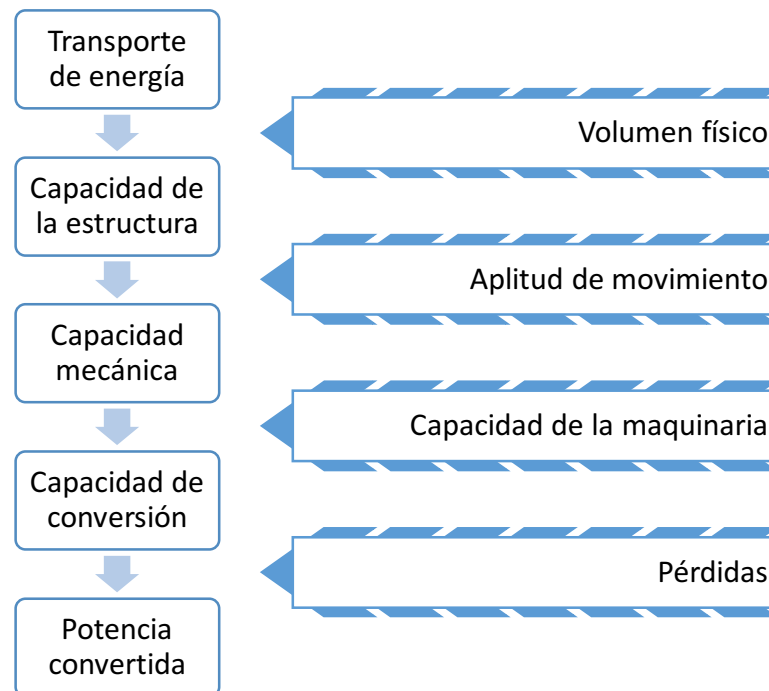


Figura 11-12: Limitaciones físicas. Adaptado de (Todalshaug, 2013)

## 12. ESTUDIO DE LAS TECNOLOGÍAS

### 12.1. Análisis de los límites los límites superiores de la potencia absorbida para las tecnologías Seabased y Wavebob

En este apartado se va a realizar un análisis de los límites los límites superiores de la potencia absorbida para las tecnologías Seabased y Wavebob. Para ello se van a obtener los diagramas de Budal de los dos dispositivos.

Dado que tanto  $P_A$  como  $P_B$  dependen de la altura y el periodo de las olas, se ha seleccionado la costa vasca y el Mar Cantábrico como lugar de estudio. En la siguiente tabla se recogen las frecuencias relativas según la altura y el periodo en el Mar Cantábrico, obtenidas del Centro Meteorológico de Santander. Se ve que domina el oleaje inferior a los 2 metros y entre 8 y 12 segundos.

Tabla 12-1: Frecuencias relativas según la altura y el periodo en el Mar Cantábrico (Ortiz, Arteche, & Sanz, 2004)

H	T				
		Corta ( $\leq 8$ seg)	Regular (8 seg < T < 12 seg)	Larga ( $\geq 12$ seg)	Total
$\leq 2$ m.		19,8%	39,9%	7,7%	67,4%
2-4 m.		2,3%	14,1%	11,1%	27,5%
$\geq 4$ m.		-	1,2%	3,9%	5,1%
Total		22,1%	55,2%	22,7%	100%

La altura de las olas es un parámetro que sufre menores fluctuaciones a lo largo del tiempo que el periodo, que es más irregular. Por ello, para este estudio se va a considerar una altura constante de 2 m, y se estudiará la variación de los límites de la potencia absorbida en función del periodo medio de las olas.

El límite debido al patrón de resonancia solamente depende de las características de la ola incidente, pero el límite de Budal es además directamente proporcional al volumen desplazado por el cuerpo flotante, por lo que habrá que tener en cuenta las características físicas del dispositivo.

Los cálculos pertinentes para el cálculo de las expresiones de los límites  $P_A$  y  $P_B$  se recogen en el ANEXO I – CÁLCULO DE LOS DIAGRAMAS DE BUDAL PARA LAS TECNOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB.

Para una boya Seabased situada en el Mar Cantábrico se obtiene el diagrama de Budal de la Figura 12-1, y para una boya Wavebob, situada en el mismo mar, se obtiene el diagrama de Budal de la Figura 12-2.

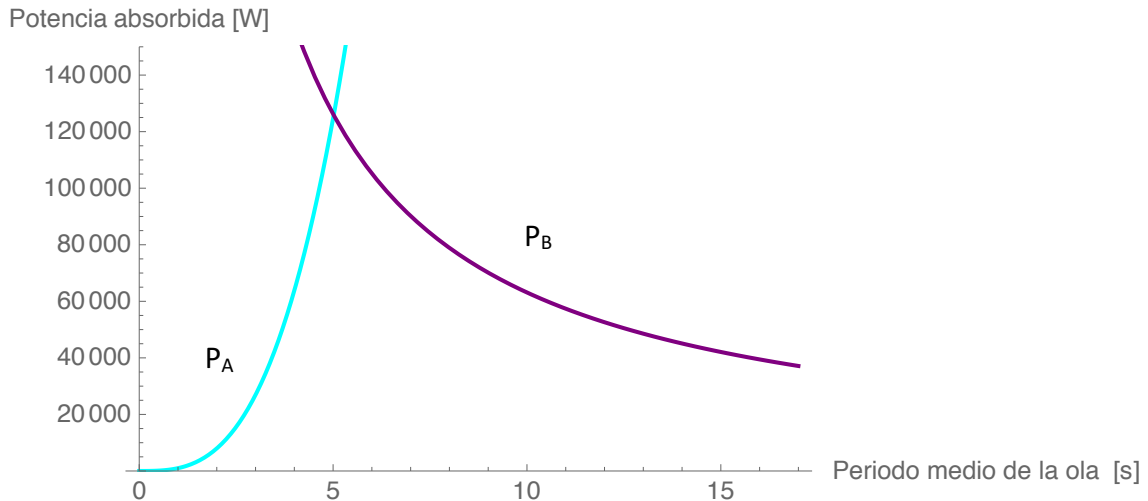


Figura 12-1: Diagrama de Budal de la boya Seabased

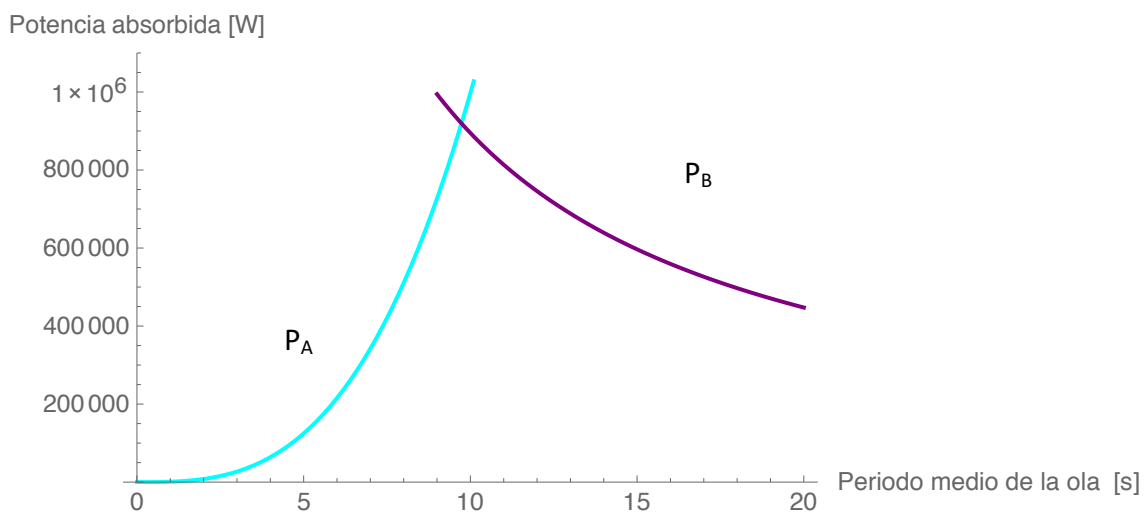


Figura 12-2: Diagrama de Budal de la boya Wavebob

Como en el Mar Cantábrico el periodo medio de las olas en condiciones normales varía entre 8 y 12 segundos, es en esta franja del diagrama de Budal donde tenemos que centrar el estudio. En la Figura 12-3 se han superpuesto los dos diagramas de Budal obtenidos para cada tecnología, resaltando el intervalo del periodo entre 8 y 12 segundos. En primer lugar, se observa que el límite de Budal para el dispositivo Wavebob es mucho mayor que para Seabased. Esto se debe a que el volumen desplazado por la boya de Wavebob es mucho mayor que el desplazado por el flotador de Seabased. En

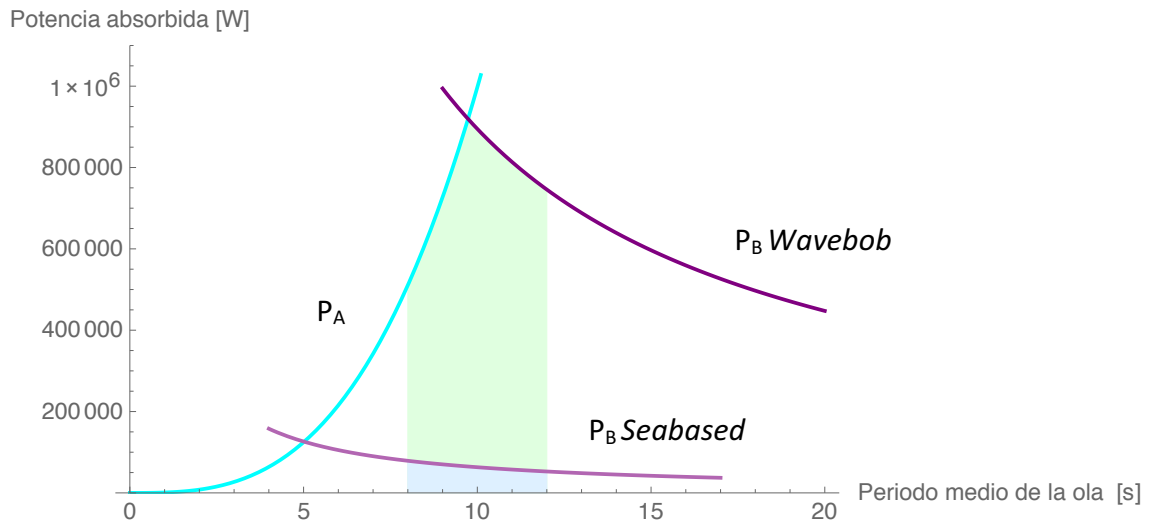


Figura 12-3: Diagramas de Budal de las tecnologías Seabased y Wavebob superpuestos

segundo lugar, el máximo de potencia absorbida para la boya Seabased se sitúa en torno a periodos de 5 segundos, mientras que para Wavebob ronda los 10 s. Esto es muy interesante ya que, de acuerdo con el diagrama, la boya Wavebob se adaptaría a la perfección a los periodos de las olas del Mar Cantábrico.

## 12.2. Características esenciales de un WEC

Para que un conversor de energía undimotriz tenga una buena viabilidad económica a largo plazo ha de tener unas características esenciales (Pecher & Kofoed, 2017):

- Capacidad de supervivencia

Un WEC ha de tener la capacidad de sobrevivir bajo condiciones meteorológicas extremas, como por ejemplo tormentas con fuerte marejada y grandes olas. Un buen sistema de anclaje es crítico, ha de ser fiable. Además, es conveniente que exista un sistema de seguridad pasiva que se active ante cargas superiores a las máximas que aguanta el sistema. Este sistema ha de poder activarse automáticamente sin necesidad de actuar externamente.

- Fiabilidad

Cuando se dice que un WEC ha de ser fiable significa que el dispositivo ha de tener un buen funcionamiento durante un largo periodo de tiempo bajo unas condiciones operativas determinadas.

- Mantenimiento

Uno de los aspectos más importantes de un WEC es el fácil acceso e inspección del sistema. Cuando la mayor parte de componentes esenciales se encuentran en la superficie el acceso a ellos es más sencillo y se facilita la inspección. Además, se valora positivamente que el mantenimiento se pueda hacer in situ. Si hay que trasladar el sistema a tierra firme para realizar algún tipo de operación ante un fallo, esto supone grandes costes económicos al tener que ser desanclado y remolcado.

- Rendimiento general

Un WEC ha de tener una buena tecnología adaptada para la absorción de la energía de las olas al mismo tiempo que un PTO adecuado para realizar un control óptimo del movimiento del sistema para maximizar el potencial absorbido. Además, ha de producir energía eléctrica de forma fluida y regular, teniendo un alto factor de carga para que se pierda la mínima cantidad de energía entre la captación y la inyección a la red.

- Escalabilidad

A escala real un WEC ha de ser multi-MW (>5 MW). Para reducir el coste normalizado de la energía el dispositivo ha de tener la capacidad de ampliar sus dimensiones, pero muchos WECs alcanzan sus dimensiones óptimas antes de llegar a ser multi-MW. Según (Pecher & Kofoed, 2017), este factor no incluye el aumento de número de WECs en un parque energético, ya que eso aumentaría los costes de fabricación instalación y mantenimiento, pero en este estudio también se va a considerar la escalabilidad en número. Esto se debe porque por una parte con una estrategia adecuada el aumento de costes puede mitigarse con una producción mayor, y por otra parte el hecho de contar con varios dispositivos en un parque energético garantiza la generación continua de energía en el caso de que falle algún dispositivo.

– Impacto medioambiental

Los WECs son fuentes de energía renovables, y se considera que por lo tanto han de ser sostenibles. Su huella ecológica ha de ser mínima y la interferencia con el hábitat en el que se instalen ha de ser lo menos perjudicial posible para el ecosistema.

– Coste

El coste de un WEC se puede ver reflejado en tres etapas: la de fabricación, la de instalación y la de mantenimiento. El coste de la primera viene determinado por los componentes, el mecanizado, el coste operativo de la planta, etc. Y éste se ve reducido al producir con la producción en cadena. El coste de la instalación viene determinado por el coste de los cables, su colocación, la conexión a la red, además de la propia instalación del sistema in situ. El coste de mantenimiento aparece una vez el dispositivo se ha puesto en funcionamiento, y viene determinado por las revisiones periódicas que se han de realizar para asegurar que el sistema funciona correctamente, el intercambio de piezas o subsistemas, la desconexión del sistema y su transporte si hay que llevarlo a tierra firme, etc.

### 12.3. Especificaciones de las tecnologías Seabased y Wavebob

En este apartado se van a comentar las características y especificaciones de las dos tecnologías seleccionadas para el estudio en relación con las características esenciales que un WEC ha de tener enumeradas en la sección 12.2. En las Tablas Tabla 12-2 y Tabla 12-3 se recogen las características de las dos tecnologías encontradas en las páginas web oficiales de los desarrolladores y en otros informes independientes (ver referencias de la sección 10).



Tabla 12-2: Características de las tecnologías Seabased y Wavebob (parte 1)

		<b>SEABASED</b>	<b>WAVEBOB</b>
<b>CAPACIDAD DE SUPERVIVENCIA</b>	Anclaje	Fijo al suelo marino	Flojo, 3 amarres con catenarias
	Seguridad pasiva	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Protección contra sobrecargas incorporada</li> <li>▸ Puede incorporar anclajes extra de seguridad</li> </ul>
	Condiciones extremas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Probado en olas de 9 metros y 15 cm de hielo</li> <li>▸ PTO sumergido, protegido de las condiciones extremas de la superficie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Buen funcionamiento en grandes marejadas por diseño</li> <li>▸ Puede “desconectarse” en situaciones de emergencia y actuar solo como boya</li> </ul>
<b>FIABILIDAD</b>		Probada en parques	Prototipos a escala
<b>MANTENIMIENTO</b>	On/off site	Off site, por tener el PTO sumergido	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ In situ</li> <li>▸ Cambios modulares de partes fallidas</li> <li>▸ Solo se trae a tierra en caso que sea estrictamente necesario</li> </ul>
	Frecuencia	Baja, tiene pocas partes móviles que se puedan romper	Redundancias instaladas que evitan tener que intervenir en caso de fallo
	Acceso	Aguas poco profundas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Anclaje al fondo muy profundo (&gt;50m) de difícil acceso si hay que desconectar</li> <li>▸ Mayor parte de componentes en PTO, accesible desde la superficie</li> </ul>
<b>RENDIMIENTO GENERAL</b>	Factor de carga	-	-
	Smooth electrical power	Caja de cambios	Por un ancho de banda grande, las variaciones a corto plazo se minimizan
	PTO	Direct drive	Hidráulico (ancho de banda muy grande)
	Absorción	Eficiente en clima moderado	Para un amplio rango de frecuencias

Tabla 12-3: Características de las tecnologías Seabased y Wavebob (parte 2)

		SEABASED	WAVEBOB
<b>ESCALABILIDAD</b>	En tamaño	Difícil al estar limitado por la profundidad	Fácil, se ha comprobado con el diseño de los prototipos
	En número	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Fácil por ser modular</li> <li>▸ Plug&amp;Play, se conecta a la caja de cambios</li> </ul>	Difícil, dispositivos independientes
<b>IMPACTO MEDIOAMBIENTAL</b>	Riesgos	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Sin sustancias contaminantes</li> <li>▸ Sin partes móviles peligrosas</li> </ul>	Fluidos hidráulicos biodegradables
	Beneficios	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Puede formar arrecifes artificiales</li> </ul> Se puede diseñar la instalación para acoger hábitats de especies concretas	-
<b>COSTE</b>	Fabricación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Diseño con pocos componentes</li> <li>▸ En lotes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Grandes dimensiones y diseño complicado</li> <li>▸ Lotes pequeños</li> </ul>
	Instalación	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Modular</li> <li>▸ Mucho cableado</li> <li>▸ Caja de cambios</li> <li>▸ Anclaje por gravedad, no hace falta escavar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ No instalado en el suelo marino</li> <li>▸ El anclaje profundo</li> <li>▸ Solamente hay que transportarlo a mar abierto arrastrándolo por el agua</li> </ul>
	Mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ Bajo por ser modular</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▸ No instalado en el suelo marino</li> <li>▸ El PTO está en la superficie y es de fácil acceso</li> <li>▸ Al ser in situ es más barato</li> </ul>

## 12.4. Evaluación de las tecnologías Seabased y Wavebob

Tras haber definido las especificaciones esenciales que ha de tener un WEC para ser viable económicamente a largo plazo y las características que tienen las dos tecnologías seleccionadas se puede crear una rúbrica de evaluación para poder determinar qué dispositivo tiene unas mejores características generales. En la Tabla 12-4 se evalúan las características de cada dispositivo según se consideran muy perjudiciales (--), perjudiciales (-), indiferentes (0), beneficiosas (+) o muy beneficiosas (++) . En la última fila de la tabla se hace una suma de los puntos obtenidos para Seabased y Wavebob respectivamente (cada signo (-) resta un punto y cada signo (+) suma un punto).

*Tabla 12-4: Baremo de las tecnologías Seabased y Wavebob, con un criterio de evaluación que va de -- (muy perjudicial) a ++ (muy beneficioso). Cada signo - resta un punto y cada signo + suma uno. El 0 indica indiferencia o falta de información*

		SEABASED	WAVEBOB
<b>CAPACIDAD DE SUPERVIVENCIA</b>	Anclaje	0	0
	Seguridad pasiva	--	++
	Condiciones extremas	++	++
<b>FIABILIDAD</b>		++	--
<b>MANTENIMIENTO</b>	On/off site	-	+
	Frecuencia	++	++
	Acceso	0	-
<b>RENDIMIENTO GENERAL</b>	Factor de carga	0	0
	Smooth electrical power	++	++
	PTO	0	+
	Absorción	-	++
<b>ESCALABILIDAD</b>	En tamaño	0	++
	En número	++	--
<b>IMPACTO MEDIOAMBIENTAL</b>	Riesgos	++	+
	Beneficios	++	0
<b>COSTE</b>	Fabricación	++	-
	Instalación	++	0
	Mantenimiento	++	++
<b>TOTAL</b>		15	11

La tecnología Seabased obtiene 15 puntos frente a Wavebob que obtiene 11. Esto lleva a asumir que en general las características de Seabased superan a las de Wavebob. Pero para poder realizar una afirmación más contundente se desarrolla la Figura 12-4, en la que se representan en un diagrama radial la puntuación obtenida para cada una de los siete aspectos generales. Mediante este gráfico se puede estudiar qué dispositivo tiene unas características más equilibradas. Se puede ver cómo Seabased a pesar de tener algunas características con menor puntuación que Wavebob en general está más compensado, es decir, no tiene grandes carencias en ninguna de ellas. Por su parte Wavebob no tiene malos resultados, pero ya que no es un modelo lo suficientemente probado su fiabilidad se ve fuertemente mermada.

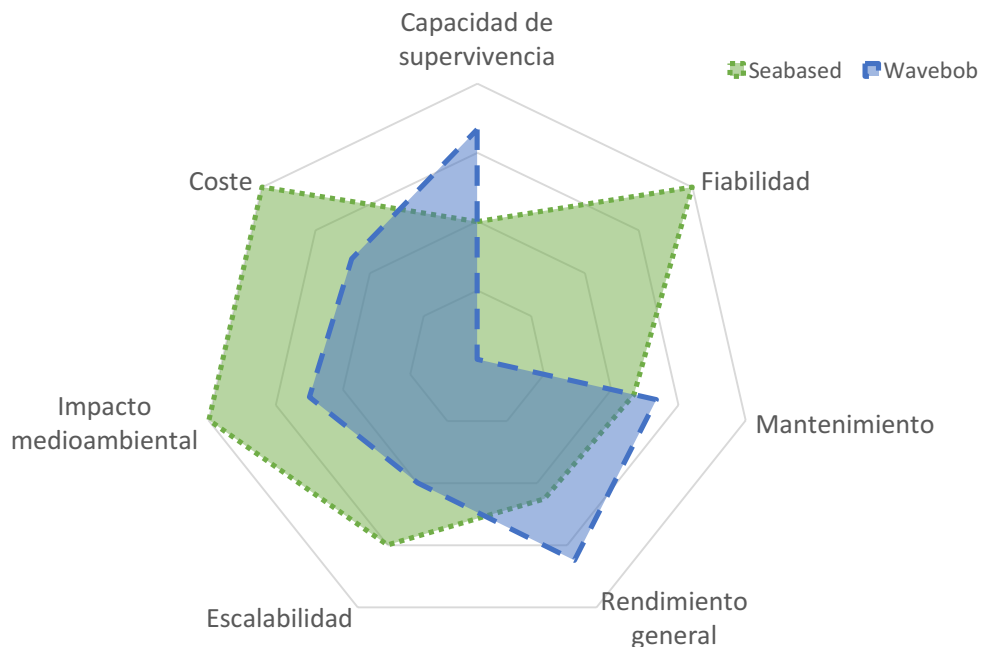


Figura 12-4: Diagrama radial que representa las características positivas que predominan en las tecnologías Seabased y Wavebob

Estos resultados se pueden relacionar con el éxito que estas tecnologías han tenido en el circuito comercial. Seabased es una empresa que ha sido capaz de ampliar sus horizontes comerciales hasta Ghana firmando un importante contrato para un parque undimotriz, mientras que Wavebob quebró tras años desarrollando prototipos. Aunque también es importante mencionar que factores económicos como el estado del mercado en el momento de lanzamiento de la tecnología, ayudas gubernamentales o el interés de los grupos inversores son cruciales para el posible desarrollo de este tipo de tecnología.

#### *12.4.1. Valoración de la viabilidad de los dispositivos en la costa vasca*

Teniendo en cuenta los resultados de la evaluación de los aspectos técnicos presentados en este apartado, los resultados del cálculo de los límites de la potencia y el diagrama de Budal para cada dispositivo, y las condiciones más comunes de oleaje en el Mar Cantábrico, se puede seleccionar la boya Wavebob como la más adecuada para se instalada en la costa vasca.

En primer lugar, Wavebob presenta una clara ventaja en términos de potencia, al coincidir su máximo posible de potencia absorbida con el periodo medio de las olas del Mar Cantábrico. Seabased por su parte tiene su máximo para periodos menores, y además este máximo es del orden de 10 veces menor que el correspondiente a Wavebob. Por otra parte, se ha mencionado que Wavebob tiene un ancho de banda mayor, por lo que, ante variaciones en el periodo o la altura de las olas, se adaptará mejor que Seabased y la disminución de la potencia absorbida respecto a la máxima será menor.

Atendiendo a las características esenciales de los dispositivos, se ha concluido en el apartado anterior que la boya Seabased tiene unas características más equilibradas, sin grandes carencias. Pero a pesar de que Wavebob ha obtenido una puntuación menor en el análisis, se considera como la más adecuada ya que tiene un rendimiento general y una capacidad de supervivencia mayores. Casi un tercio de las olas que llegan a la costa son de entre 2 y 4 metros (fuera del rango de la altura de diseño), y durante el invierno hay varios días de temporal con olas mayores, con lo que podría existir el riesgo de que un dispositivo con las características de la boya Seabased no aguante bajo estas condiciones al no contar con una seguridad pasiva.

## 13. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

En este apartado se van a describir las tareas que se han llevado a cabo para la realización del trabajo, en un determinado periodo de tiempo para poder cumplir con los plazos preestablecidos. Las tareas son las siguientes:

### **Familiarización con el campo de estudio**

En primer lugar, dado que el conocimiento tanto teórico como práctico respectivo al tema estudiado era muy reducido, esta etapa es fundamental. Esta fase se compone principalmente de la lectura de materiales que arrojen luz sobre el funcionamiento de los convertidores de energía undimotriz y su diseño. El principal objetivo es adquirir conocimientos generales sobre el campo de estudio.

### **Estudio del contexto y el estado del arte**

Una vez se tiene una idea general sobre el tema, se pasa a recabar información sobre el contexto en el que se encuentran las tecnologías para la extracción de la energía de las olas. Se ha de prestar especial atención a su impulsión en el plano internacional y su situación económica. Simultáneamente también se elabora una lista de los dispositivos de características de interés desarrollados hasta el momento.

### **Bases teóricas**

Cuando ya se han llevado a cabo las dos tareas anteriores, en este apartado se realiza un desarrollo teórico que explica la captación de la energía de las olas, prestando atención a las fuerzas que actúan sobre el dispositivo y la potencia extraída. Con este apartado se pretende complementar los dos pasos anteriores para poder gozar de un conocimiento completo.

### **Aspectos prácticos y análisis de las tecnologías**

En esta tarea se realiza un análisis de las características más importantes que un WEC ha de tener par que sea viable económicamente a largo plazo. Habiendo previamente seleccionado dos dispositivos para ser objeto de estudio y recabado la suficiente información sobre ellos, se comparan atendiendo a unas prioridades. Se evaluará el nivel de cumplimiento de unos requisitos definidos mediante un criterio escogido. Además, se realizará una comparativa de la viabilidad de la instalación de los dispositivos en la costa vasca en función de lo considerado en apartados anteriores.

## 14. DIAGRAMA DE GANTT

En la Tabla 14-1 de la siguiente página se presenta el diagrama de Gantt del trabajo. En éste se muestra una lista de las tareas principales, su fecha de inicio, de finalización (vencimiento) y duración <sup>6</sup>. También se señalan los días en los que tuvieron lugar las reuniones con la directora del trabajo. Éste se comenzó el 12 de febrero de 2018 y finalizó dos meses más tarde, el 12 de abril del mismo año.

En el diagrama de Gantt se puede observar cómo se dedica más días a las actividades durante la primera mitad del trabajo, lo que se debe a una menor intensidad en el trabajo. En esta primera mitad se dedicó como máximo dos horas diarias a la realización del trabajo. En total se calcula que se dedicaron entorno a 48h a la familiarización con el campo de estudio y estudio del contexto y estado del arte. En la segunda parte en la que se elabora el cuerpo del trabajo, en cambio, se produce un incremento en la intensidad y se dedican una media de 8 horas diarias al trabajo. La duración de esta parte es de 14 días, con lo que se estima que se dedicaron entorno a 112h.

En el ANEXO II – DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE GANTT se muestra un desarrollo más detallado de las tareas principales.

---

<sup>6</sup> Las fechas de presentan en formato mes/día/año

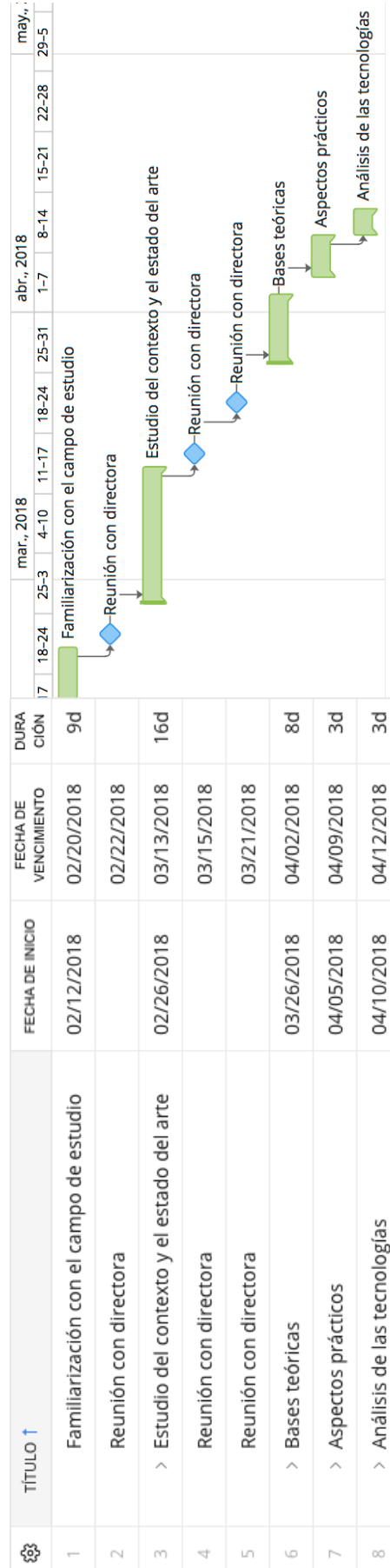


Tabla 14-1: Diagrama de Gantt



## 15. DESCARGO DE GASTOS

En este apartado se recogen los distintos gastos que ha conllevado la realización de este estudio. Los gastos se han dividido entre gastos relacionados con el trabajo de las ingenieras involucradas en el proyecto, las amortizaciones y otros gastos relacionados con las fuentes de información como la compra de artículos o libros.

*Tabla 15-1: Desglose de los gastos internos*

	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	SUBTOTAL
INGENIERA JUNIOR	25 €/h	160 h	4000 €
INGENIERA SENIOR	35 €/h	10 h	350 €
<b>TOTAL</b>			<b>4350 €</b>

*Tabla 15-2: Desglose de las amortizaciones*

	PRECIO	VIDA ÚTIL	USO	SUBTOTAL
ORDENADOR	1100 €	15000 h	160 h	11,75 €
PACK OFFICE	149 €	12 meses	2 meses	24,85 €
MATHEMATICA	145 €	12 meses	2 meses	24,16 €
<b>TOTAL</b>				<b>60,76 €</b>

*Tabla 15-3: Resumen de otros gastos*

	CANTIDAD	SUBTOTAL
ARTÍCULOS de pago	5	108,75 €
LIBROS	4	258,25 €
<b>TOTAL</b>		<b>367,00 €</b>

En el

ANEXO III – DESGLOSE DE OTROS GASTOS se especifican los precios de cada artículo de pago y libro consultados.

*Tabla 15-4: Descargo de gastos totales*

	<b>COSTE</b>
<b>HORAS INTERNAS</b>	4350,00 €
<b>AMORTIZACIONES</b>	60,76 €
<b>OTROS GASTOS</b>	367,00 €
<b>TOTAL</b>	<b>4777,76 €</b>

El descargo de gastos se ha llevado se ha realizado sin tener en cuenta el impuesto sobre el valor añadido IVA.

La mayor parte del presupuesto recae en la ingeniera junior, ya que la mayor parte del proyecto solamente requiere su trabajo y dedicación, y supone más de un 80% de éste. Al contrario de lo esperado, los gastos que incluyen los artículos de pago y libros consultados son mayores que el gasto debido al uso del ordenador, la licencia del pack de Microsoft Office y el programa Mathematica, pero aun así no suponen una gran fracción del gasto total.

## 16. CONCLUSIONES

En este apartado se presentan las conclusiones que se han obtenido tras la realización del estudio de los diseños y de los procesos fluidodinámicos que se encuentran en la generación de energía eléctrica proveniente de las olas. Éstas son las siguientes:

- A pesar de la juventud relativa del sector, existe un gran número de tecnologías con fundamentos mecánicos diferentes
- Las características oceanográficas del lugar en el que se sitúa un dispositivo son cruciales en el diseño
- Los aspectos esenciales que la tecnología ha de poseer son fáciles de concretar y evaluar
- Existe una relación evidente entre el éxito y desarrollo de un determinado conversor de energía undimotriz, y las inversiones y subvenciones de gobiernos y organismos
- En el contexto de la costa vasca y el Mar Cantábrico, la boya Wavebob es más adecuada para ser instalada
- A la hora de recabar información sobre este tema se afronta una barrera lingüística ya que la mayoría de fuentes de encuentran en inglés
- El coste más simbólico de este estudio es el trabajo de la ingeniera junior

## 17. BIBLIOGRAFÍA

- APO. (2018). *Aquamarine Power Oyster*. Obtenido de Ramboll:  
[http://www.ramboll.com/projects/re/aquamarine\\_oyster2](http://www.ramboll.com/projects/re/aquamarine_oyster2)
- BOLT. (2018). *BOLT Lifesaver*. Obtenido de Fred. Olsen Autonomous Sea Power:  
<http://windcarrier.com/boltwavepower/>
- Cabal, H., Labriet, M., & Lechón, Y. (2011). Review of the world and European renewable energy resource potentials. En I. Galarraga, M. González-Eguino, & A. Markandya, *Handbook os Sustainable Energy* (págs. 262-264). Cheltenham, Reino Unido: Edward Elgar Publishing Limited.
- CETO. (2018). *Wave*. Obtenido de Carnegie Clean Energy:  
<https://www.carnegiece.com/wave/>
- Cornett, A. (2008). A global wave energy resource assesment. *Proceedings of the Eighteenth International Offshore and Polar Enegenieering Conference Vancouver, BC, Canada*. Vancouver.
- Crestwing. (2018). *Wave Energy*. Obtenido de Crestwing:  
<https://crestwing.dk/english/technology.html>
- CUE. (2017). *Acuerdos internacionales sobre acción por el clima*. Obtenido de Consejo de la Unión Europea: <http://www.consilium.europa.eu/es/policies/climate-change/international-agreements-climate-action/>
- DEXA. (2018). *Dexa Wave*. Obtenido de Partnerskabet for Bølgekraft:  
<https://wavepartnership.dk/dexa-wave>
- EMEC. (2014). *Pelamis Wave Power*. Obtenido de The European MArine Energy Centre LTD: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
- EMEC. (2015). *Aquamarine Power*. Obtenido de The Eurpoean Marine Energy Centre: <http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>
- EMEC. (2017). *Wave Developers*. Obtenido de The European Marine Energy Centre: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>
- EMECP. (25 de Febrero de 2016). Press release: EMEC seeks feedback from industry for p2-002. *The European Marine Energy Centre LTD*.

- Esteban, G. A., & Peña, A. (2015). *Mecánica de Fluidos*. Bilbao, Vizcaya, País Vasco: Escuela Superior de Ingenieros.
- EUCOM. (2014). *La energía azul. Medidas necesarias para aprovechar el potencial de la energía oceánica de los mares y océanos europeos hasta 2020 y en adelante*. Comisión Europea, Bruselas.
- EUCOM. (2015). *The Paris Protocol – A blueprint for tackling global climate change beyond 2020*. Comisión Europea, Bruselas.
- Eurostat. (2018). *Renewable energy statistics*. Obtenido de Eurostat: [http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable\\_energy\\_statistics](http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics)
- Falnes, J. (Enero de 1997). Principles for capture of energy from ocean waves. Phase control and optimum oscillation.
- Falnes, J. (Junio de 2002). Optimum Control of Oscillation of Wave-Energy Converters. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 12(2).
- Falnes, J. (Octubre de 2007). A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, 20(4), 185-201.
- Falnes, J., & Hals, J. (2011). Heaving buoys, point absorbers and arrays. *The Royal Society*(370), 246–277.
- FloatingPP. (2018). *Floating Power Plant*. Obtenido de <http://www.floatingpowerplant.com>
- Galarraga, I., González-Eguino, M., & Markandya, A. (2011). *Handbook Of Sustainable Energy*. Cheltenham, Reino Unido: Edward Elgar Publishing Limited.
- Garrison, T. (2010). *Oceanography: An Invitation to Marine Science*. Belmont, Estados Unidos: Brooks/Cole.
- IEA. (2017). *Renewables 2017 - Analysis and Forecasts for 2022*. International Energy Agency.
- Inversor. (2018). *Seabased: Cost-competitive renewable wave energy*. Obtenido de Inversor Oy: <https://www.invesdor.com/en/pitches/899>
- IRENA. (2014). *Ocean Energy - Technology Readiness, Patents, Deployment Status and Outlook*. International Renewable Energy Agency.

- Kerebel, C., Stoerring, D., & Horl, S. (2017). *Fichas técnicas sobre la UE - la energía renovable*. Obtenido de Parlamento Europeo: [http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/es/displayFtu.html?ftuId=FTU\\_2.4.9.html](http://www.europarl.europa.eu/atyourservice/es/displayFtu.html?ftuId=FTU_2.4.9.html)
- Kofoed, J. P. (2017). The Wave Energy Sector. En A. Pecher, & J. P. Kofoed, *Handbook of Ocean Wave Energy* (Vol. 7, págs. 17-42). Springer Open.
- Lundsgaard, M. N. (18 de Octubre de 2017). New investment in the Crestwing wave energy project. *Energy City*.
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010). Assessing the Global Energy Potential. *OAME2010*.
- Magagna, D., & Uihlein, A. (Septiembre de 2015). Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. *International Journal of Marine Energy*, 84-104.
- Mouwen, F. (2008). *Presentation on Wavebob to Engineers Ireland*. Wavebob.
- Muliawan, M. J., Gao, Z., & Moan, T. (Agosto de 2013). Application of the Contour Line Method for Estimating Extreme Responses in the Mooring Lines of a Two-Body Floating Wave Energy Converter. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 135.
- OffshoreWind. (3 de Abril de 2013). Ireland: Wavebob to Go into Liquidation. *Offshore WIND*.
- OpenEISB. (5 de Julio de 2017). *Uppsala Seabased AB Wave Energy Converter*. (N. R. Laboratory, Productor) Obtenido de OpenEI: [https://openei.org/wiki/MHK\\_Technologies/Uppsala\\_Seabased\\_AB\\_Wave\\_Energy\\_Converter](https://openei.org/wiki/MHK_Technologies/Uppsala_Seabased_AB_Wave_Energy_Converter)
- OpenEIWB. (10 de Agosto de 2010). *Wavebob*. (N. R. Laboratory, Productor) Obtenido de OpenEI: [https://openei.org/wiki/MHK\\_Technologies/Wavebob](https://openei.org/wiki/MHK_Technologies/Wavebob)
- OPT. (2018). *Ocean Power Technologies*. Obtenido de Ocean Power Technologies: <http://www.oceanpowertechnologies.com>
- Ortiz, F. J., Arteché, J. L., & Sanz, P. (2004). Caracterización del oleaje en aguas costeras del Cantábrico. (I. N. Centro Meteorológico Territorial en Cantabria y Asturias, Ed.) *El Clima entre el Mar y la Montaña*.

- Pecher, A., & Kofoed, J. P. (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy* (Vol. 7). Aalborg, Dinamarca: Springer Open.
- Pelamis. (2018). *Pelamis Technology*. Obtenido de Pelamis Wave Power: <https://www.pelamiswave.com/pelamis-technology/>
- Previsic, M. (2004). *Offshore Wave Energy Conversion Devices*. E21 & EPRI.
- REN21. (2017). *Renewables 2017, Global Status Report*. Paris.
- Seabased. (2018). *Seabased Technology*. Obtenido de Seabased: <https://www.seabased.com/the-technology>
- SubseaWorldNews. (23 de Mayo de 2012). Norway: Langlee Secures Funds for Wave Energy Converter Testing. *Subsea World News*. Obtenido de <https://subseaworldnews.com/2012/05/23/norway-langlee-secures-funds-for-wave-energy-converter-testing/>
- Teske, S. (2015). *Energy Revolution 2015, a Sustainable World*. Greenpeace, Hamburg.
- Todalshaug, J. H. (2013). Practical limits to the power that can be captured from ocean waves by oscillating bodies. *International Journal of Marine Energy*, 3(4), 70-81.
- Todalshaug, J. H. (2017). Hydrodynamics of WECs. En A. Pecher, & J. P. Kofoed, *Handbook of Ocean Wave Energy* (Vol. 7, págs. 139-158). Springer Open.
- Trabish, H. K. (21 de Octubre de 2010). Wavebob is Ready to Make Wave Energy. *GreenTech Media*.
- WaveRoller. (2018). *WaveRoller*. Obtenido de AW-Energy: <http://aw-energy.com/waveroller/>
- Wavestar. (2018). *Ullimited clean energy with the Wavestar machine*. Obtenido de Wavestar: <http://wavestarenergy.com>
- WMO. (1998). *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. World Meteorological Organization, Génova.

## ANEXO I – CÁLCULO DE LOS DIAGRAMAS DE BUDAL PARA LAS TENOLOGÍAS SEABASED Y WAVEBOB

Para el cálculo del límite debido al patrón de resonancia solamente se tiene en cuenta las características de la ola incidente, la densidad del agua y la gravedad:

$$P_A = \frac{\rho g^3 T^3 H^2}{128\pi^3} = c_\infty T^3 H^2$$

La salinidad del Mar Cantábrico es de 35 g/L, por lo que tendrá una densidad de 1027 kg/m<sup>3</sup>. La altura de la ola que se va a considerar es de 2 m. Con estos datos y tomando 9,81 m/s<sup>2</sup> para la fuerza de la gravedad se obtiene  $c_\infty$ :

$$c_\infty = \frac{\rho g^3}{128\pi^3} = \frac{1027 \times (9,81)^3}{128\pi^3} = 244,30$$

La ecuación de la curva para  $P_A$  es, por lo tanto:

$$P_A = 997,19 T^3$$

El límite de Budal viene definido por la siguiente expresión:

$$P_B = \frac{\rho g H \pi V}{4T} = c_0 \frac{HV}{T}$$

Se puede calcular  $c_0$  ya que los parámetros son conocidos:

$$c_0 = \frac{\rho g \pi}{4} = \frac{1027 \times 9,81 \pi}{4} = 7912,78$$

La ecuación de la curva para  $P_B$  en función del volumen desplazado  $V$  y el periodo de la ola  $T$  es:

$$P_B = 15825,57 \frac{V}{T}$$

$V$  es un parámetro que depende de la geometría del cuerpo flotante y del desplazamiento máximo impuesto por el diseño del dispositivo. Para calcular  $V$  se va a utilizar la ecuación

$$V_{max} = 2s_{max}A_w$$

Como no se tienen datos de los fabricantes de los dispositivos para el desplazamiento máximo  $s_{max}$  se va a tomar el valor estándar 1,2 m para los dos



dispositivos. El área  $A_w$  es la sección transversal de las boyas. Para Seabased se calcula como  $A_w = \pi D^2/4$ , y para Wavebob es  $A_w = \pi(D_{ext}^2 - D_{int}^2)/4$  ya que tiene forma toroidal. En la siguiente tabla se recogen estos cálculos.

Tabla 0-1: Calculo del volumen desplazado por los dispositivos

SEABASED			WAVEBOB		
<b>D</b>	4,6	m	<b>Din</b>	10	m
<b>A</b>	16,62	m <sup>2</sup>	<b>Dext</b>	20	m
<b>smax</b>	1,2	m	<b>A</b>	235,62	m <sup>2</sup>
<b>V</b>	39,89	m <sup>3</sup>	<b>smax</b>	1,2	m
			<b>V</b>	565,49	m <sup>3</sup>

Una vez que disponemos de los volúmenes, se puede obtener la expresión de las curvas de los límites de Budal para cada dispositivo:

$$P_{B \text{ seabased}} = 631213,26 \frac{1}{T}$$

$$P_{B \text{ wavebob}} = 8949148,30 \frac{1}{T}$$

Se pueden representar las dos curvas correspondientes a cada dispositivo en un mismo gráfico para observar las zonas permitidas en términos de potencia, y además se puede relacionar con los periodos de las olas más comunes en la zona considerada (Mar Cantábrico).

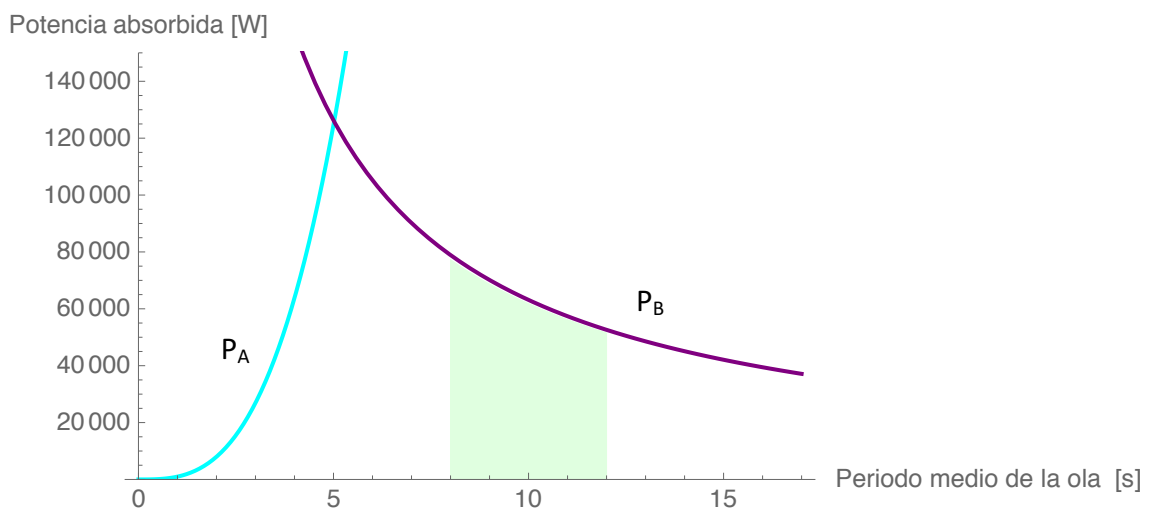


Figura 0-1: Diagrama de Budal de la boya Seabased

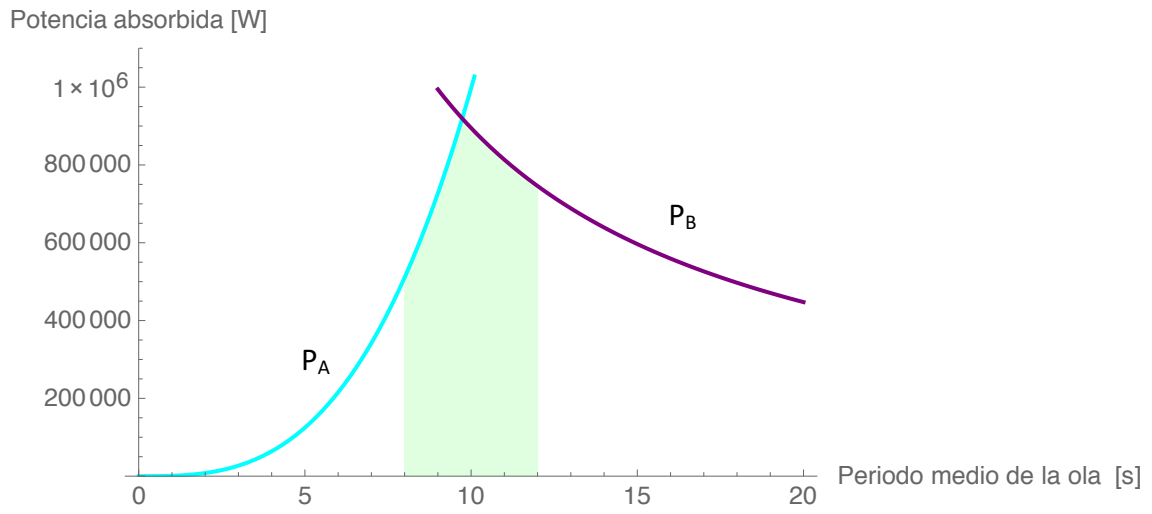


Figura 0-2: Diagrama de Budal de la boya Wavebob

## ANEXO II – DESCRIPCIÓN DEL DIAGRAMA DE GANTT

En este anexo se presenta una descripción detallada de las diferentes tareas principales realizadas en el trabajo.

Las actividades principales se muestran en el diagrama de Gantt de la siguiente forma:

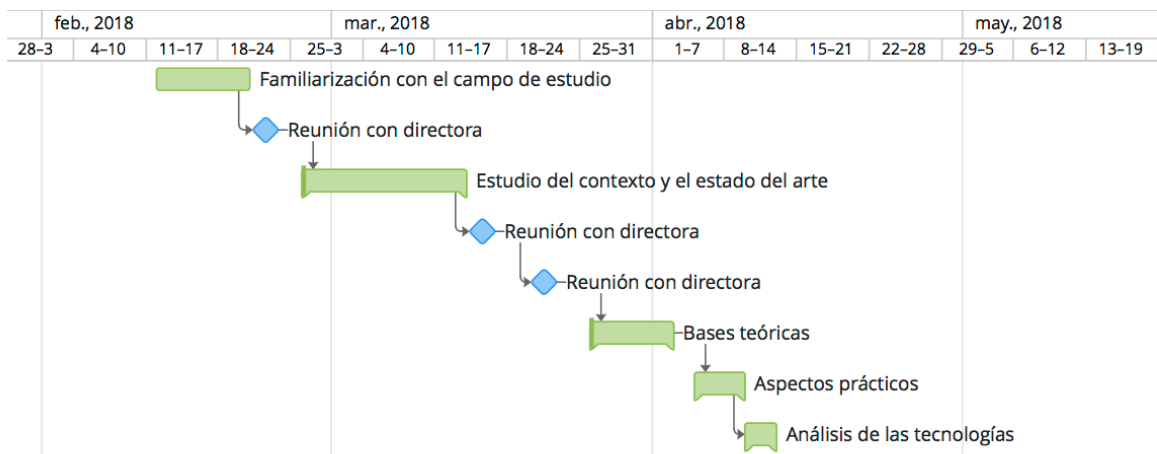


Figura 0-1: Diagrama de las tareas principales

La primera actividad principal es la familiarización con el campo de estudio, pero no se subdivide en ninguna actividad secundaria por lo que no se va a analizar con más profundidad. Aunque cabe destacar que después de esta tarea tuvo lugar una reunión de control con la directora del trabajo.

El estudio del contexto y el estado del arte se puede dividir en cuatro subtareas. En total se dedicaron 16 días a esta parte, ocupando tres días cada una de las tres primeras subtareas, y cinco días la búsqueda de información sobre los diseños existentes. Durante esta etapa se consultaron sobre todo informes de organismos internacionales y páginas web de compañías que desarrollan convertidores de energía undimotriz.

Tras finalizar esta tarea tuvieron lugar otras dos reuniones de control consecutivas con la directora del trabajo.

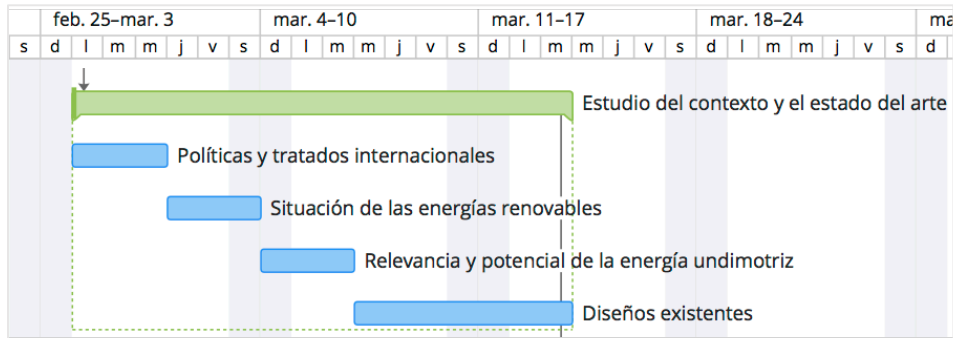


Figura 0-2: Diagrama de las tareas del estudio del contexto y el estado del arte

El desarrollo de las bases teóricas se divide en dos subtareas, la primera es la lectura de materiales con el objetivo de adquirir los conocimientos necesarios para posteriormente realizar la segunda tarea que es el desarrollo matemático. A esta tarea se dedicaron en total 8 días, de los cuales cinco recaen en la lectura de materiales y tres en el desarrollo matemático.

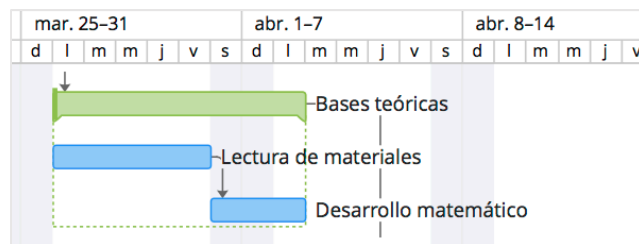


Figura 0-3: Diagrama de las tareas de las bases teóricas

El desarrollo de los aspectos prácticos también se divide en dos subtareas siendo la primera la lectura de materiales. La segunda sub-tarea se corresponde con la definición de las características esenciales de un convertidor de energías undimotriz. La duración total de esta etapa es de cuatro días, divididos por igual entre las dos subtareas.

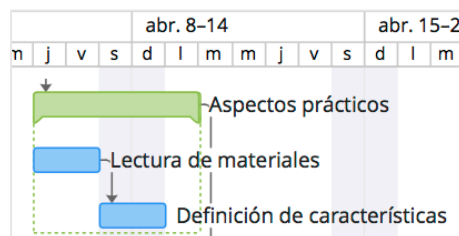


Figura 0-4: Diagrama de las tareas de los aspectos prácticos

La última tarea es el análisis de las tecnologías, que se divide en la definición de las alternativas y la evaluación de las tecnologías. A la primera sub tarea se dedicó un día, mientras que a la segunda se dedicaron dos, ocupando esta tarea un total de tres días.

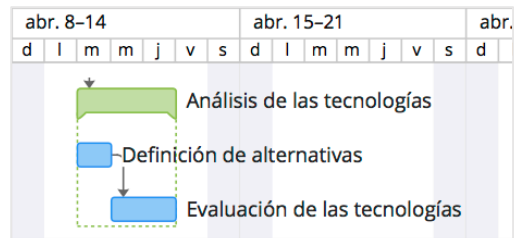


Figura 0-5:Diagrama de las tareas del análisis de las tecnologías

## ANEXO III – DESGLOSE DE OTROS GASTOS

Tabla 0-1: Desglose de otros gastos

	PRECIO
<b>ARTÍCULOS</b> de pago (por título y referencia)	
A review of wave energy extraction ( <b>Falnes, 2007</b> )	25,75 €
Application of the Contour Line Method for Estimating Extreme Responses in the Mooring Lines of a Two-Body Floating Wave Energy Converter ( <b>Muliawan, Gao, &amp; Moan, 2013</b> )	20,45 €
Assessing the Global Energy Potential ( <b>Mørk, Barstow, Kabuth, &amp; Pontes, 2010</b> )	20,45 €
Optimum control of oscillation of wave-energy converters ( <b>Falnes, 2002</b> )	16,35 €
Practical limits to the power that can be captured from ocean waves by oscillating bodies ( <b>Todalshaug, 2013</b> )	25,75 €
<b>SUBTOTAL</b>	108,75 €
<b>LIBROS</b> (por título y referencia)	
Handbook Of Ocean Wave Energy ( <b>Pecher &amp; Kofoed, 2017</b> )	49,05 €
Handbook of Sustainable Energy ( <b>Galarraga, González-Eguino, &amp; Markandya, 2011</b> )	128,80 €
Oceanography: An invitation to marine science ( <b>Garrison, 2010</b> )	65,40 €
Mecánica de Fluidos ( <b>Esteban &amp; Peña, 2015</b> )	15,00 €
<b>SUBTOTAL</b>	258,25 €
<b>TOTAL</b>	367,00 €