

# **Modelado y Análisis de Parques de Dispositivos Convertidores de Olas OWC para el Área de Ensayos BIMEP**



**Curso 2016-2017**

**Autor: Carlos Francisco Sánchez**

**Directora: Margarita Marcos Muñoz**

# Agradecimientos

El mayor agradecimiento se lo debo a mi familia que me ha apoyado en todo momento para poder realizar este máster. A mi tutora Marga Marcos por su ayuda, orientación, paciencia y comprensión, sin ella este trabajo no hubiera sido posible. Gracias por brindarme esta oportunidad. No quiero olvidarme de agradecer permitirme el uso de las instalaciones del Laboratorio de Control a Darío Orive. Y en especial he de nombrar a mis compañeros de laboratorio Ioritz y Eneko, por haberme hecho tan motivadora y agradable la investigación a su lado.

# 1. Resumen trilingüe

El presente trabajo fin de máster se ha realizado con la colaboración de la empresa Tecnalía. La propuesta cuenta con las instalaciones de mar abierto aportadas por BIMEP, infraestructura marina destinada a la investigación, demostración y explotación de los sistemas de captación de energía marina.

En este documento en un primer lugar se estudia la configuración espacial de un parque de dispositivos de captación de energía de las olas. Concretamente se busca la configuración espacial óptima en el sentido de que la potencia total inyectada a red fluctúe lo menos posible.

En particular se han realizado simulaciones para las instalaciones de BIMEP<sup>1</sup> de un parque de 25 dispositivos OWC<sup>2</sup> de 200 KW ubicados alrededor de 4 HUB. Cada dispositivo OWC dispone de un control de velocidad con una ley optimizada fuera de línea.

Se ha desarrollado una aplicación que a partir de los siguientes parámetros: estado de mar<sup>3</sup>, ángulo de incidencia predominante<sup>4</sup>, número de boyas y distancia mínima entre boyas, se genera la configuración óptima. Posteriormente se analiza la potencia total del parque para otros estados de mar y otros ángulos de incidencia no predominantes, con objeto de analizar la variación de potencia inyectada a red.

En un segundo lugar en el presente documento se realiza un estudio de la normativa vigente de conexión a red. El objetivo de dicho estudio es conocer la normativa de generación de electricidad en la red eléctrica española, para poder posteriormente controlar un parque de dispositivos de extracción de energías de las olas de forma de que se pueda inyectar electricidad a la red cumpliendo la normativa.

Finalmente se desarrolla un software que ubica los dispositivos en el área seleccionada, y un modelo de simulación que permite la implementación de parque de dispositivos OWC generadores conectados a la red, con la posibilidad de inyección de fallos en la red, simulando el modo de actuación del sistema de control.

---

<sup>1</sup>BIMEP: Biscay Marine Energy Platform, explicado en el punto 3.1.5.

<sup>2</sup>OWC: Oscillating Water Column, explicado en el punto 3.1.4.

<sup>3</sup>Estado de mar: la condición general de la superficie libre sobre un gran cuerpo de agua con respecto a las olas del viento y la hinchazón en un cierto lugar y momento. Finalmente se representa como el listado de alturas y periodos de las olas en un tiempo y lugar determinado.

<sup>4</sup>Ángulo de Incidencia: determina la inclinación sobre cierto sistema de coordenadas del vector de traslación de la ola.

# Abstract

This work has been carried out with the collaboration of Tecnalia. The proposal has the open sea facilities provided by BIMEP, marine infrastructure for research, demonstration and exploitation of marine energy capture systems.

In this paper, the first is to study the configuration of a park of wave energy capture devices. Specifically, the optimal configuration is sought in the sense that the total injected power fluctuates as little as possible.

In particular, simulations have been carried out for the BIMEP installations of a 25 MW OWC device located around 4 HUBs. Each OWC device has a speed control with an optimized law offline.

An application has been developed based on the following parameters: sea state, predominant angle of incidence, number of buoys and minimum distance between buoys, optimum configuration is generated. Subsequently, the total power of the park is analysed for other sea states and other non-predominant incidence angles, in order to analyse the variation of power injected in the grid.

In a second place in the present document makes a study of the current regulation of connection to network is realized. The objective of this study is to create the context for the control of the power electronics devices and thus be able to comply with the regulation of electricity generation in the Spanish electrical grid.

Finally, a software is created that makes the location distribution of devices in the selected area, such as a simulation model that allows the implementation of a set of generating devices connected to a network, with the possibility of injection of faults in the electrical grid, simulating the mode of the performance of the control system.

# Laburpena

Master Amaierako Lan hau Tecnia enpresaren laguntzarekin burutu da. Roposamenak BIMEP-k eskaintako itsas instalazio irekiak ditu, ikerkuntzara, erakusketara eta itsasoko energia ustiaketara zuzendutako itsas azpiegitura.

Dokumentu honetan, lehenago eta behin, olatuen energia biltzen duen gailuen parke baten konfigurazio espaziala aztertzen da. Zehazki, konfigurazio espazial optimoa bilatzen da, hau da, sarean injektatutako potentzia totala ahalik eta gorabehera gutxien izan dezan zentzu horretan. Bereziki, 200KW-eko 25 WC gailuentzako BIMEP instalazioentzat simulazioak egin dira, 4HUB inguruan kokatuak. OWC gailu bakoitzak abiadura kontrol bat dauka, konexiorik gabeko lege ezin hobe batekin.

Hurrengo parametroetatik abiatuz, aplikazio bat garatu da: itsasoaren egoera, intzidentzia angelu nagusia, buia kopurua eta buien arteko gutxieneko distantzia, konfigurazio optimoa sortuz. Ondoren, parkearen indar totala beste itsasoko egoera batzuetarako eta beste intzidentzia angelu ez nagusietarako analizatzen da, sarean sartutako potentzia aldakuntzaren azterketa burutzeko helburuarekin.

Bigarrenik, sare konexio buruzko indarrean den normatibaren ikasketa burutzen da. Azterlan honen helburua potentzia elektronikaren gailuen kontrola testuinguruan kokatzea da eta modu horretan, Espainiar sare elektrikoan elektrizitatea sortu normatiba betez.

Azkenik, aukeratutako eremuan gailuak kokatzeko aukera ematen duen softwarea sortu da, sare batera konektatutako sorkuntza gailuen parkeen inplementazioa baimentzen duen simulazio eredu bat bezala, zeinek sarean akatsak sartzeko posibilitatea duen, kontrol sistemaren portaera simulatuz.

# Índice de contenido:

Agradecimientos.....	1
1. <b>Resumen trilingüe</b> .....	2
Índice de ilustraciones:.....	7
Índice de Tablas: .....	8
2. <b>Lista De Acrónimos</b> .....	9
3. <b>Memoria</b> .....	10
3.1. Contexto .....	10
3.1.1. La Energía Marina.....	10
3.1.2. Energía undimotriz.....	12
3.1.3. Sistemas de captación.....	14
3.1.4. Dispositivos de columna de agua oscilante.....	16
3.1.5. BIMEP .....	18
3.2. Objetivos.....	21
3.3. Beneficios que aporta el trabajo .....	21
3.4. Alcance .....	21
3.5. Estado del Arte .....	22
3.5.1. Parques de OWC .....	22
3.5.2. Control de potencia de la planta undimotriz y predicción de potencia de salida. ..	23
3.5.3. Disposición de los WEC en el Parques OWC .....	23
4. <b>Metodología</b> .....	26
4.1. Estudio del modelo WEC utilizado .....	26
4.2. Obtención del modelo agregado del parque .....	27
4.3. Disposición de los dispositivos en el área de ensayos de BIMEP.....	29
4.4. Estudio de Normativa de conexión a red.....	41
4.4.1. Frecuencia .....	41
4.4.2. Tensiones en los Nudos.....	41
4.4.3. Límites de capacidad.....	41
4.4.4. Emisión de flickers.....	42
4.4.5. Cambios en la potencia transmitida por el oleaje.....	43
4.4.6. Emisión de armónicos .....	44
4.4.7. Desequilibrio de tensiones .....	45
4.4.8. Rangos de funcionamiento .....	46
4.4.9. Respuesta frente a huecos de tensión .....	46
4.4.10. Requisito de control de tensión .....	47

4.4.11.	Control de frecuencia .....	48
4.5.	Integración del modelo de agregado del parque con el modelo de conexión a red eléctrica. ....	48
5.	<b>Presupuesto</b> .....	52
6.	<b>Análisis de rentabilidad.</b> .....	53
7.	<b>Conclusiones.</b> .....	54
	<b>Referencias</b> .....	55
	<b>Anexo I: Entendimiento físico del modelo OWC</b> .....	57
	Interpretación matemática. ....	58
	Modelo de la ola.....	58
	Modelo de la boya.....	59
	Fuerza de excitación:.....	59
	Fuerza de radiación cuerpo oscilante. ....	61
	Fuerza hidrostática .....	61
	Fuerza del sistema de extracción de potencia .....	62
	Dinámica de la boya.....	62
	Modelado de la turbina.....	64
	Modelo del generador.....	66
	Sistema de control .....	66
	Control del par.....	66
	Control del enclavamiento “Latching”:.....	68
	<b>Anexo II: Código Matlab para el desarrollo del programa de disposición dispositivos.....</b>	71
	<b>Anexo III: Tabla Estado de Mar BIMEP</b> .....	80

# Índice de ilustraciones:

Ilustración 1. Aporte De Las Fuentes De Energía En El Suministro Mundial De Energía Primaria En El 2008 (Izquierda) Y Aporte De Las Fuentes De Energía Primaria En La Generación De Electricidad Mundial En El 2008 (Derecha) (International Energy Agency, 2008).....	11
Ilustración 2, Tipos De Olas, Fuente: Plan De Desarrollo Regional Para El Uso De La Energía Proveniente Del Oleaje Atlántico. ....	12
Ilustración 3, Definición Gráfica Del Fetch. Fuente Imagen: Sailandtrip. ....	13
Ilustración 4, Diferenciación Dependiente De Ubicación, Fuente: (Ereño 2008) .....	14
Ilustración 5 , Absorbedor Puntual (Fuente: Web PipoSystems.Com ) .....	14
Ilustración 6 Y 7, Atenuadores (Fuente: Web PipoSystems.Com ) .....	15
Ilustración 8, Esquema Totalizadores (Fuente Téllez, 2013) .....	15
Ilustración 9, Clasificación Según Principio De CAPTACIÓN (Fuente: Téllez A.) .....	16
Ilustración 10 Y 11 Representación Esquema Generación Electricidad OWC, (Modeificación De Imagen De Têtu, 2016).....	17
Ilustración 12, Fotografía Del Marmok A5. Fuente BIMEP. ....	19
Ilustración 13 Representación Aerea Emplazamiento BIMEP. Fuente BIMEP.....	20
Ilustración 14, Esquema De Las Partes 2 Y 3 De La Instalación. ....	20
Ilustración 15, Central Onshore (Fuente Owc-Wec.Weebly.Com) .....	24
Ilustración16 Y 17, Agrupación De Dispositivos OWC En Línea. (EquiMar 2009) .....	24
Ilustración 18, Agrupación Radial De Dispositivos OWC. (EquiMar 2009) .....	25
Ilustración 19, Agrupación En Cadena De Dispositivos OWC. (EquiMar 2009) .....	25
Ilustración 20, Agrupación Serie De Dispositivos OWC. (EquiMar 2009) .....	25
Ilustración 21, Representación De Las Tres Etapas De Un WEC, Convertidor De La Energía De La Ola, Fuente (Maczulak 2010). ....	26
Ilustración 22, Esquema Simulink Ola-Boya-Turbina. ....	27
Ilustración 23, Representación Onda Perfectamente Sinusoidal .....	28
Ilustración 24, Configuración Ejemplo Puntos De Medición.....	29
Ilustración 25, Ejemplo Dos Configuraciones Espaciales De Campo De Boyas Con Mismos Resultados, Boyas Verdes-Boyas Amarillas. ....	30
Ilustración 26, Ejemplo De Peor Configuración Espacial Campo De Boyas, .....	31
Ilustración 27 Gradiente-Distanciamiento Primera-Última Boya Con Respecto Al Primer Estado De Mar. ....	32
Ilustración 28 Potencia-Tiempo-Espaciado Primera Última Boya. Estado De Mar: 1, Ángulo De Incidencia:-45 .....	33
Ilustración 29, Derivada Potencia-Tiempo-Espaciado Primera Última Boya. Estado De Mar: 1, Ángulo De Incidencia:-45 .....	33
Ilustración 30, Configuración Peor Caso. ....	34
Ilustración 31, Configuración Mejor Caso Optimizada Para Distancia Cableado. ....	34
Ilustración 32, Comparación (Peor Caso-Mejor Caso-Media). ....	34
Ilustración 33, Comparación Gradientes Peor Caso-Mejor Caso Para Mismo Estado De Mar (1) Y Para Mismo Ángulo De Incidencia (-45) Teniendo Ambos Casos La Misma Potencia Media. ....	35
Ilustración 34, Curva Potencia Única Boya.....	35
Ilustración 35, Potencia Registrada Para Los 20 Estados De Mar En Diferentes Configuraciones De Desfase Entre Olas. . ....	36
Ilustración 36, Potencia Registrada Para Diferentes Estados De Mar Sobre La Configuración Óptima. .	37
Ilustración 37, Potencia Y Gradientes Registrados Para Diferentes Estados De Mar (1 Y 20) Sobre La Configuración Óptima. ....	37
Ilustración 38, Rosa De Las Principales Direcciones De Potencia Anuales En BIMEP.....	37
Ilustración 39, Curva Potencia Mejor Configuración (-45°) Para Diferentes Ángulos De Incidencia. ....	38

Ilustración 40, Disposición Mejor Caso Para Ángulo Real De Incidencia BIMEP. ....	39
Ilustración 41, Zonas De Operación Para Un Dispositivo De Conversión, (Fuentes Khan J. 2008) .....	43
Ilustración 42, Tiempos Mínimos Que Ha De Ser Capaz De Soportar La Instalacion Generadora Conectada A La Red En Condiciones De Tension Eficaz A Tierra. Fuente Documento De Trabajo Sobre Requisitos Técnicos De Las Instalaciones Eólicas Y Fotovoltaicas (2009).....	46
Ilustración 43, Procedimiento De Operación (2006). Fuente: P.O. 12.3. Requisitos De Respuesta Frente A Huecos De Tensión De Las Instalaciones Eólicas.....	47
Ilustración 44, Áreas De Funcionamiento Durante Periodos De Falta Y Recuperación, Fuente: Procedimiento De Operación (2006).....	47
Ilustración 45, Incremento Unitario De La Potencia Activa En Función Del Desvío Unitario De La Frecuencia. Fuente: Procedimiento De Operación 7.1 Servicio Complementario De La Regulación Primaria .....	48
Ilustración 46, Esquema Simulink Parque OWC Red Comentado.....	49
Ilustración 47, Interior del Bloque Generador de Parque .....	50
Ilustración 48, Modelo Simulink De Red Eléctrica Trifásica,.....	51
Ilustración 49, Estructura De Una Boya Utilizada Para OWC (Chiang C. Mey).....	62
Ilustración 50, (F.-X. Faÿ, J.C.C. Henriques, M. Marcos, 2014) .....	65
Ilustración 51, Curvas Par-Velocidad. (Pereiras Et Al., 2010).....	67
Ilustración 52, Curvas Potencia-Velocidad.(Pereiras Et Al., 2010) .....	68
Ilustración 53, Turbina Bi-Radial Y HSSV. (Robles & Faÿ, 2016).....	68
Ilustración 54, (Robles & Faÿ, 2016) .....	69

## Índice de Tablas:

Tabla 1, Características Diferentes Dispositivos OWC, Fuente (García Santana 2014).....	18
Tabla 2, Posiciones De Las 25 Boyas Con Respecto Al Centro De Las Circunferencias Que Conforman Las Zonas De FONDEO.....	40
Tabla 3, Límites En Los Armónicos Inyectados A Red. ....	45
Tabla 4, Presupuesto Del Proyecto.....	52
Tabla 5, Estados de Mar, Fuente: BIMEP. ....	80

## 2. Lista De Acrónimos

**OWC:** Oscillating Water Column.

**WEC:** Wave Energy Converter.

**IDAE:** Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.

**PER:** Plan de Energías Renovables.

**OPED:** Organización de Países Exportadores de Petróleo.

**IEA:** International Energy Agency.

**BIMEP:** Biscay Marine Energy Platform.

**PANER:** Plan de Acción Nacional de Energías Renovables.

**EVE:** Ente Vasco de la Energía.

**PCTI:** Plan de Ciencia Tecnología e Innovación.

**CAPV:** Comunidad Autónoma del País Vasco.

**PTO:** Power Take Off.

**HSSV:** High Speed Stop Valve.

**SS:** Sea State.

**THD:** Total Harmonic Distortion.

# 3. Memoria

La necesidad de encontrar fuentes de energías limpias y dejar de lado la dependencia energética de los combustibles fósiles ha hecho que en los últimos años se desarrollen una serie de dispositivos para aprovechar la energía de las olas, las mareas, las corrientes marinas y en general todo tipo de energía extraíble del mar. El océano es una fuente de energía renovable de extraordinario potencial, y la obtención de su energía supone tanto un reto desde el punto de vista del control, como grandes oportunidades desde el punto de vista energético.

## 3.1. Contexto

En este apartado se tratará de describir la situación actual de los campos del saber relacionados con el presente proyecto así como el desarrollo que han tenido, guardando especial interés para la motivación del proyecto.

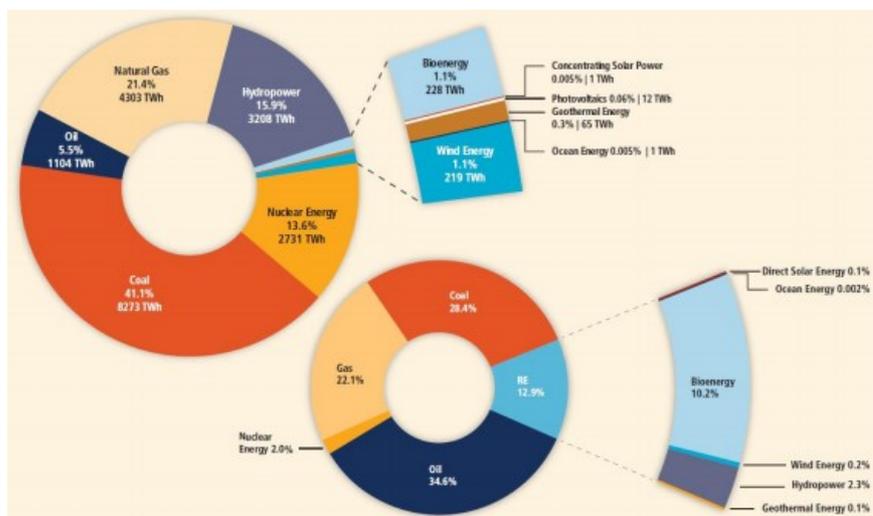
### 3.1.1. La Energía Marina

La energía marina es la energía renovable extraíble del mar. El mar goza de una gran acumulación de potencia, siendo una fuente de energía que además de abundante, es limpia, e inagotable.

Cuenta con el interés de que un tercio de la población mundial vive cerca de la costa. Y se podría obtener una media de 8 KW por cada metro de costa, además que su utilización permitiría la cercanía de generación eléctrica a distintas poblaciones, disminuyendo por tanto el 10% de pérdidas generadas en transporte y distribución (Red Eléctrica de España s.f.).

A pesar de todo ello, sigue sin ser rentable la utilización de estas tecnologías, ocasionado principalmente por el problema de la hostilidad del medio marino para los equipamiento utilizado en la de producción de energía eléctrica. Además se hace necesaria la elaboración de un marco legal que facilite o estandarice la forma de adquirir medios marinos para la explotación eléctrica, mitigando tanto los riesgos en el ecosistema, como los tecnológicos y financieros.

En los últimos años han ido apareciendo nuevas tecnologías que han favorecido la investigación de las energías marinas. Sin embargo, en el ámbito de las energías, las convencionales siguen teniendo mucho más peso que las renovables, como se aprecia en la siguiente imagen. (International Energy Agency 2008)



**ILUSTRACIÓN 1. APORTE DE LAS FUENTES DE ENERGÍA EN EL SUMINISTRO MUNDIAL DE ENERGÍA PRIMARIA EN EL 2008 (IZQUIERDA) Y APORTE DE LAS FUENTES DE ENERGÍA PRIMARIA EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD MUNDIAL EN EL 2008 (DERECHA) (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2008)**

A finales del año 2016, la capacidad total de potencia extraíble del mar en Europa era de 3,8 GW, y en el plan de acción europeo (Horizon 2020<sup>5</sup>) se quiere producir 133,3 TWh para el año 2020 (datos obtenidos de la IEA). En Euskadi las previsiones para 2020 contemplan poder disponer de una potencia instalada de 60 MW de energía de las olas y 50 MW de eólica offshore flotante. Con ello, se puede identificar el nivel de inversión y desarrollo que habrá en esta materia en los próximos años

Por otro lado, la energía del mar se puede explotar de diferentes formas, por ejemplo la energía mareomotriz, la térmica oceánica, la osmótica, la de las corrientes marinas y la oceanogénica entre otras, el presente trabajo se centra especialmente en la energía undimotriz (explicada en el siguiente apartado), que debido a las características marinas de la costa española, se considera como la ideal para ser aprovechada, siendo especialmente prometedora en la cornisa Cantábrica y en la parte norte de las Islas Canarias, zonas en las que se dan los mayores potenciales energéticos (PANER 2011-2020).

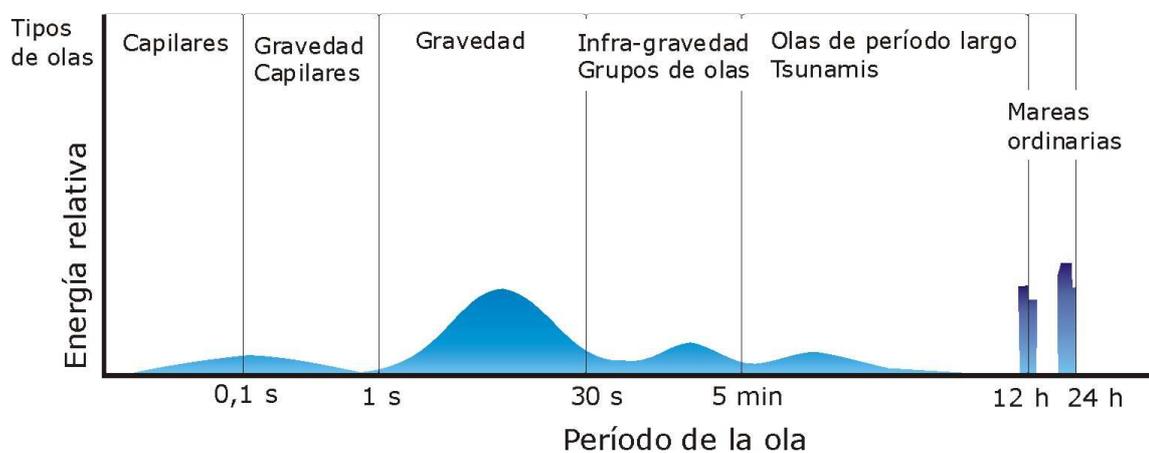
Cabe destacar que también en otras costas de España se podría aprovechar la energía de corriente marina. Concretamente es destacable, el estrecho de Gibraltar, pero por el elevado tránsito marítimo y factores ambientales, resulta una posibilidad algo compleja.

<sup>5</sup> Horizon 2020: “Es el programa de investigación e innovación más ambicioso puesto en marcha por la Unión Europea (UE) que da lugar a más avances, descubrimientos y primicias a nivel mundial, convirtiendo las grandes ideas surgidas de los laboratorios en productos de mercado.” (Commision 2014)

### 3.1.2. Energía undimotriz

La energía undimotriz, es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía cinética y potencial contenida en el movimiento de las olas. Las olas a su vez son el resultado de diferentes factores, pero el factor de mayor interés es el efecto del viento sobre la superficie del agua; y el viento a su vez es causado por la acción del sol sobre la tierra. La energía que se puede obtener de las olas, a diferencia de la energía del viento, siendo más concentrada. Las olas se desplazan por grandes distancias con pérdidas de energía mínimas y con densidad de potencia por superficie tal, que supera la potencia eólica o la potencia aportada por el sol, “5 veces más concentrada que la energía eólica y entre 10 y 30 veces más concentrada que la energía solar” (Ereño 2008), a su vez la energía almacenada en el movimiento de las olas puede superar los 70 MW/km<sup>2</sup>.

Como se comenta anteriormente no todas las olas son causadas por el viento, hay diferentes tipos y se diferencian en base a su causa, a su periodo y a la energía contenida. Los principales tipos son los identificados en la Ilustración 2.



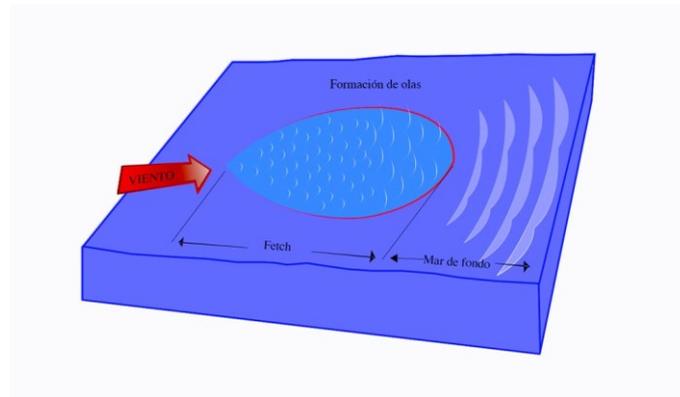
**ILUSTRACIÓN 2, TIPOS DE OLAS, FUENTE: PLAN DE DESARROLLO REGIONAL PARA EL USO DE LA ENERGÍA PROVENIENTE DEL OLEAJE ATLÁNTICO.**

Los tipos que aparecen en la Ilustración 2 se pueden diferenciar por su causa (Munk 1950): Ilustración 2

- De largo periodo, de gravedad y capilares, causadas por el viento y se le opone la tensión superficial del agua.

- Las olas causadas por terremotos, fuerzas gravitatorias (luna y tierra), tormentas, y se contraponen a todo ello el efecto Coriolis<sup>6</sup>.
- Olas ordinarias, debido al viento y la gravedad se oponen a las mismas. Son las que permiten mayor extracción de energía debido a que son las más usuales, con mayor potencia media y las más factibles de utilizar para generar electricidad.

Por otro lado la energía correspondiente a las olas ordinarias depende de 3 factores, en primer lugar de la velocidad del viento, que es la principal causa de la intensidad, posteriormente del periodo: tiempo que el viento está actuando sobre el mar y por último del *fetch*: longitud en la que el viento se mantiene sin cambios significativos en la dirección y sin encontrar obstáculos (representado en la Ilustración 3).



**ILUSTRACIÓN 3, DEFINICIÓN GRÁFICA DEL FETCH. FUENTE IMAGEN: SAILANDTRIP.**

Si bien dicha energía sólo depende de estos tres parámetros, en su aprovechamiento aparecen una serie de dificultades intrínsecas:

- Cuando hay condiciones climatológicas catastróficas (huracanes, tsunamis, tornados, etc.), en estos casos la excitación al sistema de captación de energía puede resultar excesiva.
- La amplitud, y el ángulo de incidencia de las olas están en constante cambio, lo que dificulta el control sobre los dispositivos convertidores, debido a que siempre se cuenta con cierta incertidumbre en la energía a obtener.
- La diferencia de magnitud entre las frecuencias de la ola y la red eléctrica.

El diseño del convertidor de energía tiene además limitaciones desde el punto de vista económico y ha de estar sujeto a un rango de funcionamiento, fuera del cual no deberá trabajar; en el punto (4.4.5) se entrará en mayor detalle sobre el rango de funcionamiento.

<sup>6</sup> Efecto Coriolis: efecto que considera la existencia de una aceleración *relativa* del cuerpo en dicho sistema en rotación. Esta aceleración es siempre perpendicular al eje de rotación del sistema y a la velocidad del cuerpo.

### 3.1.3. Sistemas de captación

En la actualidad hay numerosos sistemas de captación de la energía del oleaje. Al ser una tecnología en desarrollo y existir numerosas patentes de sistemas de captación, con ventajas e inconvenientes entre ellas, la elección del sistema de captación se puede complicar en gran medida. A pesar de ello hay sistemas más apropiados para circunstancias específicas.

Los sistemas encargados de convertir la energía de la ola en energía aprovechable (mecánica o eléctrica) son los llamados WEC (Wave Energy Convertors) que se pueden diferenciar teniendo en cuenta las siguientes clasificaciones:

- **Cercanía a la costa**, diferenciando en 3 ubicaciones, **en costa** (onshore), **cerca de la costa** (nearshore) entre 10 y 40 metros o **mar adentro** (offshore) más de 50 metros; la diferencia entre las olas de costa y las de aguas profundas es principalmente por la energía perdida en forma de fricción con el lecho marino y por el impacto contra la orilla. La potencia interna de la ola depende del periodo y de la altura de la misma, y principalmente esta potencia se debe a energía potencial y cinética a lo largo del tiempo.

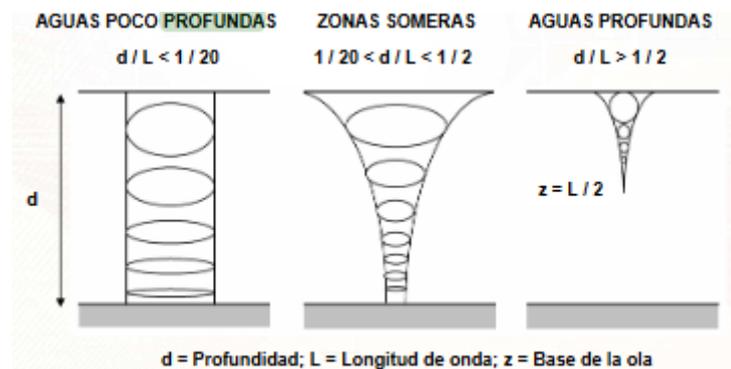
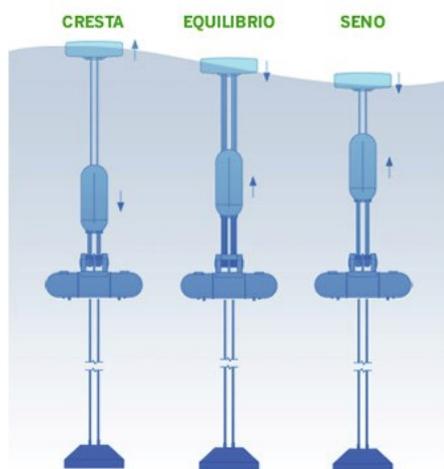


ILUSTRACIÓN 4, DIFERENCIACIÓN DEPENDIENTE DE UBICACIÓN, FUENTE: (EREÑO 2008)

- **Forma y orientación**, se aprecian 3 configuraciones principales:



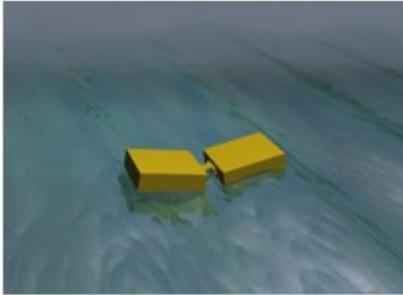
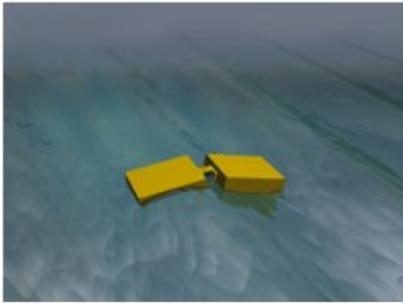
#### a) Absorbedor Puntual

Estructura flotante de tamaño reducido (si se compara con el tamaño de las olas). Su nombre es debido a que concentra la captación de energía en un punto, y la absorbe en cualquier dirección en la que se mueva la ola.

Lo normal en este tipo de WEC es la utilización de varias estructuras al mismo tiempo para obtención de mayores potencias.

ILUSTRACIÓN 5, ABSORBEDOR PUNTUAL (FUENTE: WEB PIPOSYSTEMS.COM)

### b) Atenuadores

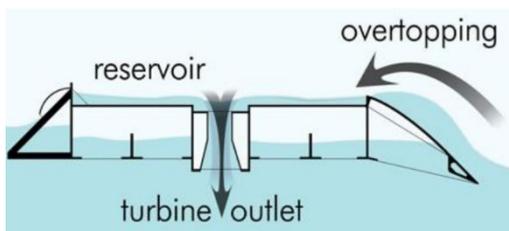


Son estructuras que se caracterizan por su estabilidad ya que las fuerzas a ambos lados de la estructura se compensan, dicha estructura es cilíndrica y se encuentra semisumergida, está formada por un eje orientado paralelamente a la dirección de propagación del oleaje y dos partes flotantes; tiene varias articulaciones conformando nodos móviles con dos grados de libertad: vertical y horizontal. El movimiento relativo entre las partes flotantes acciona un sistema hidráulico normalmente formado por 4 pistones que proporciona fluido a un depósito a presión, posteriormente se permite el acoplamiento con un generador eléctrico. (Téllez 2013)

ILUSTRACIÓN 6 Y 7, ATENUADORES (FUENTE: WEB PIPOSYSTEMS.COM )

### c) Totalizadores

Estructuras situadas perpendicularmente a la dirección de avance de la ola (paralelos al frente de onda), y que pretenden captar la energía potencial de la ola, hacen pasar el agua de la parte superior de la ola a través de una rampa, permitiendo la concentración del agua en un depósito a mayor altura,



posteriormente aprovechando dicha diferencia de cotas se hace pasar el fluido por un equipo de turbinas Kaplan de baja presión. (Pose 2009)

ILUSTRACIÓN 8, ESQUEMA TOTALIZADORES (FUENTE TÉLLEZ, 2013)

- Por último, se puede clasificar en base al **principio para la captación de energía** como se muestra en la siguiente imagen.

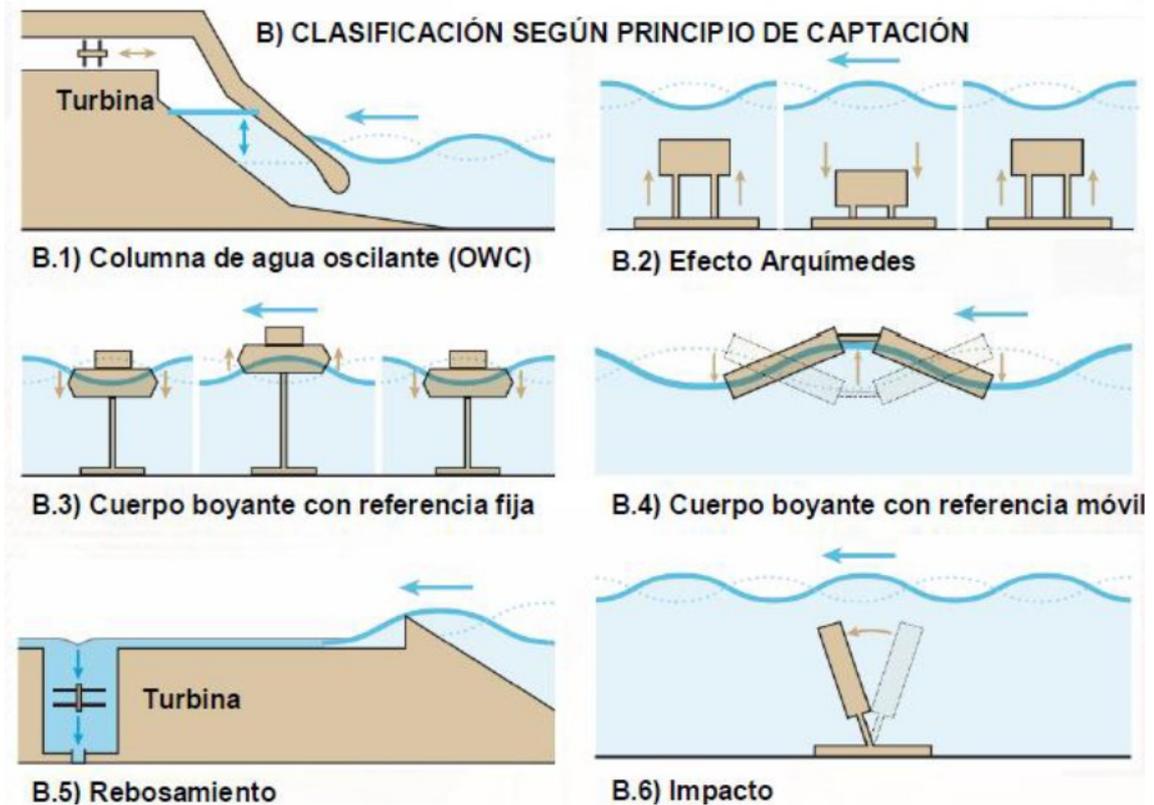
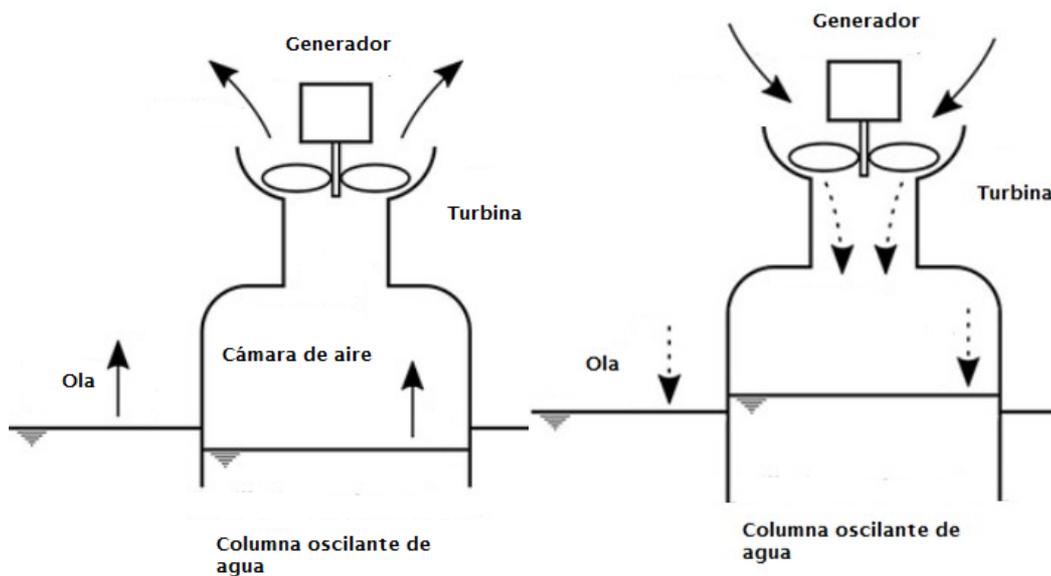


ILUSTRACIÓN 9, CLASIFICACIÓN SEGÚN PRINCIPIO DE CAPTACIÓN (FUENTE: TÉLLEZ A.)

Dentro de la clasificación descrita, el WEC del que se hace uso en este proyecto es el OWC, se debe a ello que se describirá en mayor profundidad en el próximo apartado.

### 3.1.4. Dispositivos de columna de agua oscilante

En los dispositivos de columna de agua oscilante (OWC siglas de “Oscillating Water Column”, como se describe en la lista de acrónimos) el modo de obtención de energía, se debe al movimiento oscilante producido por las olas; generando sobrepresión o vacío en la cámara de aire, como se identifica en la siguiente ilustración, causando el movimiento entre el aire exterior e interior de la cámara, siendo dicho flujo el usado para mover la turbina (produciendo energía mecánica de la energía neumática del aire). Posteriormente esta energía mecánica se puede transformar en eléctrica.



**ILUSTRACIÓN 10 Y 11 REPRESENTACIÓN ESQUEMA GENERACIÓN ELECTRICIDAD OWC, (MODEIFICACIÓN DE IMAGEN DE TÊTU, 2016).**

La estructura tiene forma de tubo Venturi, de manera que la sección del tubo que comunica con la turbina es menor que la sección que se encuentra en contacto con el mar. Consiguiendo que pese a que la velocidad del oleaje sea baja, la velocidad de giro de la turbina sea alta (Sole 2004).

Este tipo de sistemas pueden ser estructuras fijas normalmente costeras o estructuras flotantes (como se explica en el apartado 3.1.3), a su vez hay grandes variaciones en superficies y potencias conseguidas entre las centrales undimotrices.

Nombre del dispositivo	Potencia del dispositivo (kW)	Superficie que ocupa (m <sup>2</sup> )	Ratio aprox. Potencia /Superficie	Fluido de trabajo (aire, agua o aceite a presión)	Instalaciones en el mar profundo, medio y costeras
OWC de Unión Fenosa	27	48	559	Agua de mar	Costera
Tapchan	400	7000	57	Agua de mar	Costera
El Pato Salter	2310	4050	570	Aceite a presión	Aguas profundas
OWC Clam	2500	2827	884	Aire	Aguas profundas
Cilindro de Bristol	2000000	1656000	1208	Agua de mar	Aguas profundas
Balsa de Cockerell	2000	5000	400	Aceite a presión	Aguas profundas
Buque Kaimci	2000	960	2083	Aire	Aguas profundas
Bomba de Manguera	110	113	973	Agua de mar	Aguas profundas
Bomba de pistón	45	64	707	Agua de mar	Aguas profundas
OWC NEL	2000000	1552000	1289	Aire	Aguas profundas
Convertidor de Belfast	75	51	1471	Aire	Costera
OWC Kvaerner	500	79	6366	Aire	Costera
OWC Sakata	60	360	167	Aire	Costera
OWC de Kujukuri	30	31	955	Aire	Costera
OWC de Pico	400	96	4167	Aire	Costera
BBDB	200	36	5556	Aire	Poco profundas
OWC Mighty Wale	110	1200	92	Aire	Poco profundas
OWC de China	30	40	750	Aire	Costera
OWC Energetech	500	875	571	Aire	Costera
OWC Limpet	500	84	5952	Aire	Costera
OWC Alda	1000	-	-	Aire	Costera
OWC Nereida	250	700	537	Aire	Costera
OWC Breakwave	750	525	1427	Aire	Costera
FWVP	1500	-	1019	Agua de mar	Aguas profundas
PowerBuoy	20	20	1531	Aceite a presión	Aguas profundas
Pelamis	750	490	118	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavedragon	6000	51000	160	Agua de mar	Aguas profundas
SSG	12000	75000	1944	Agua de mar	Todo tipo de ubicación
Plataforma flotante de múltiples convertidores	2520	1296	-	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavestar	6000	1440	4167	Aceite a presión	Poco profundas
AWS	1200	90	13296	Aire	Poco profundas
Searev	500	375	1333	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavebob	1500	225	6667	Aceite a presión	Aguas profundas
Oyster	500	216	2315	Agua de mar	Poco profundas
Waveroller	13	16	825	Aceite a presión	Poco profundas
Multiwave Plane	30	22	1374	Agua de mar	Poco profundas
Aquabuoy	500	157	3183	Agua de mar	Aguas profundas

TABLA 1, CARACTERÍSTICAS DIFERENTES DISPOSITIVOS OWC, FUENTE (GARCÍA SANTANA 2014)

Los sistemas OWC destacan sobre las diversas arquitecturas de WEC por la sencillez en la conversión eléctrica, debido a la alta velocidad del flujo del aire y la ausencia de sistemas mecánicos antes de la turbina; a su vez el sistema OWC es considerado el más prometedor por diferentes autores como [Whittaker, 1993], [Brooke, 2003] y [Muthukumar, 2005].

## 3.1.5. BIMEP

El presente documento está destinada a ser probado en BIMEP. BIMEP es una infraestructura de investigación, demostración y ensayo de convertidores de energía de las olas (OWC). Cuenta con cuatro puntos de amarre en un espacio de 5,27 km<sup>2</sup> situados frente a la costa de Armintza (Bizkaia), permite conectar 20 MW a la red. Su objetivo es llevar a cabo la prueba y demostración del comportamiento de dispositivos de captación de energía de las olas en condiciones reales. Debido al propósito descrito, la instalación de los Captadores de Energía Marina que se instalaran en BIMEP será de uso temporal. Su instalación nunca será indefinida, ni su finalidad primordial será la producción de energía eléctrica, ya que se trata de tecnologías que aún no presentan suficiente madurez como para su explotación comercial (Fuente: (Bimep 2013)).

Será habitual que una nueva tecnología se fondee en la instalación durante los meses de verano, retirándose durante los meses de invierno. A medida que su tecnología vaya

desarrollándose de acuerdo a la experiencia adquirida en BIMEP, los periodos de fondeo podrán alcanzar los 24 meses seguidos.

Se espera que con los datos y la experiencia adquirida en el BIMEP se mejorarán y desarrollarán tecnologías en energía undimotriz, hasta alcanzar suficiente grado de desarrollo como para que el precio de la electricidad que estos captadores proporcionen sea similar al de otras fuentes renovables. Por ello es imprescindible que los investigadores y científicos puedan poner a prueba sus tecnologías para así poder mejorarlas.

BIMEP cuenta con la instalación eléctrica preparada, y un área para poder realizar la instalación (mostrada en la Ilustración 13) con 4 zonas de fondeo, esta instalación a su vez está dividida en 3 partes (mostrado en las Ilustración 13 y en la Ilustración 14):

- **Primera parte (Cable de Costa):** formada por el cable más grueso de la instalación, es el capaz de transportar los 20 MW y el encargado de unir la subestación con la costa.

- **Segunda parte (Cables Estáticos):** formada por 4 cables que unirán los 4 HUBs de las zonas de fondeo (tercera parte) y la costa donde se acopla con la primera parte de la instalación, cada uno estos cables es capaz de transferir 13,2 KV y 5 MW.

- **Tercera parte (HUBs):** es la caja de conexiones de las boyas, a la cual se pueden conectar hasta 25 boyas por caja, en BIMEP se cuenta con 4 cajas de conexiones, a su vez por medio del cable umbilical se conecta a la boya.

- **Equipo OWC:** formadas por dos estructuras semisumergida capaces de generar un máximo de 200 KW de potencia a partir de energía undimotriz (energía aportada por la ola), su funcionamiento básico se basa en producir electricidad por medio del aire que es desplazado por la ola en el interior de la boya. El modelo de OWC empleado en BIMEP es el Marmok A5 (Ilustración 12) que cuenta con 42 metros de longitud, y un peso de 80 toneladas.

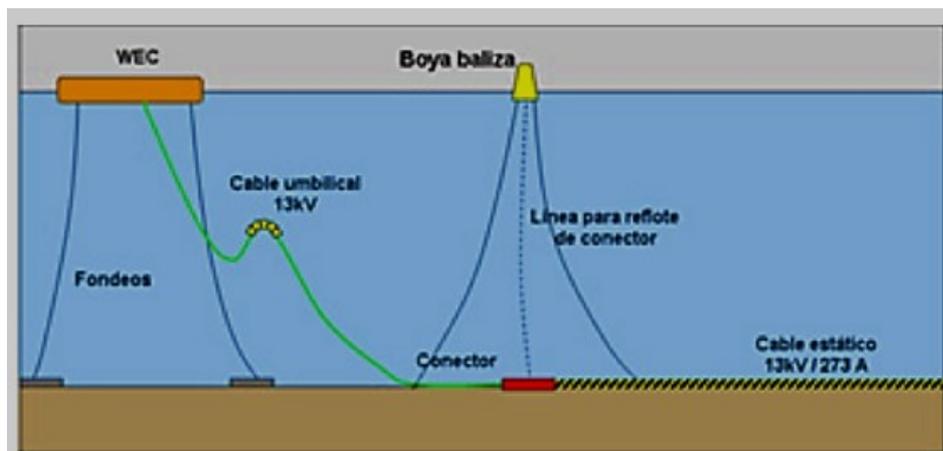


ILUSTRACIÓN 12, FOTOGRAFÍA DEL MARMOK A5. FUENTE BIMEP.



**ILUSTRACIÓN 13 REPRESENTACIÓN AEREA EMPLAZAMIENTO BIMEP. FUENTE BIMEP.**

Como se muestra en la figura anterior en BIMEP se cuenta con 4 zonas de fondeo donde irán ubicados los HUB de conexión con las boyas y las respectivas boyas, dichas zonas de fondeo son las circunferencias mostradas en la imagen anterior, cada una de ellas cuenta con un diámetro de 750 metros lo cual será una condición de contorno para el posicionado.



**ILUSTRACIÓN 14, ESQUEMA DE LAS PARTES 2 Y 3 DE LA INSTALACIÓN.**

## 3.2. Objetivos

Como se ha mencionado anteriormente este trabajo se enmarca dentro del área de las energías marinas, concretamente en la conversión de energía del oleaje en energía eléctrica, disposición de los dispositivos productores y la conexión a red.

A su vez este objetivo se desarrolla en objetivos secundarios:

1. Obtención del modelo agregado, con el objetivo de que a partir de la simulación de un único dispositivo WEC se pueda obtener la potencia total del parque en todo momento.
2. Integración del modelo agregado en un modelo existente de conexión a red.
3. Generar un modelo de inyección a red con posibilidad de simulación de fallos, con el objeto de poder analizar el comportamiento del sistema frente a fallos en la red, estableciendo un modelo para futuros controles de parque.
4. Estudio de la normativa de conexión a red de parques undimotrices, para poder establecer futuros controles.

El presente proyecto forma parte de uno de los proyectos para el aula Tecnalia de la Universidad del País Vasco, se contextualiza para el área de ensayos de BIMEP, a su vez tiene como propósito el de facilitar herramientas informáticas que permita futuros estudios; también tiene en cuenta la posibilidad de variar la localización, las características de mar y los propios equipos generadores, para así poder ajustarse a futuros estudios con diferentes especificaciones.

## 3.3. Beneficios que aporta el trabajo

El presente Trabajo Fin de Máster se puede considerar una continuación de proyectos anteriores, se dispone con anterioridad de un modelo de control de un dispositivo OWC que describe tanto la dinámica del mar como la del sistema de captación y generación eléctrica.

En este proyecto se harán modelos de control que permitan representar el parque undimotriz al completo, así como la representación de la red eléctrica modelable en conexión al mismo. También se hará un estudio de la normativa para generación eléctrica a la cual habrá que ajustarse para la conexión a red. Y un diseño de aplicación informática que servirá de herramienta en el diseño de parques undimotrices en cuanto a localización de dispositivos se refiere.

## 3.4. Alcance

Como límites del trabajo, se llegará a establecer el modelo que permite realizar el control del parque undimotriz con conexión a red, permitiendo establecer estrategias de control en futuros proyectos, y así poder cumplir con las normativas estudiadas

Se realizará un modelo de red acoplable al sistema, este mismo contará con funcionalidades como la generación de armónicos, huecos y desequilibrios.

Se establecerá un diseño de la ubicación de dispositivos OWC dentro de las áreas facilitada por BIMEP para la obtención de la potencia óptima, entiendo como potencia óptima la potencia con menor variación (más estable) a lo largo del tiempo, a su vez este diseño se centrará en la

utilización de datos estadísticos de registros de olas y ángulos incidentes en el área de ensayos, tratando en todo momento de obtener la mejor distribución de dispositivos para las condiciones más frecuentes. Para hacer todo ello posible se diseñará el sistema global por medio de un modelo de agregado que permitirá la reproducción simplificada de todo el parque.

## 3.5. Estado del Arte

En el siguiente estado del arte se realizará una búsqueda de centrales undimotrices a lo largo del mundo, el entorno nacional y en Euskadi.

### 3.5.1. Parques de OWC

Los parques OWC son la agrupación de dispositivos OWC, (también conocidos como granja de olas), el objetivo de hacer uso de varios de estos dispositivos es la obtención de una mayor potencia, debido a que la potencia generada por un único dispositivo en la configuración off-shore es bastante escasa, es cierto que hay dispositivos OWC que generan más potencia que otros, pese a ello la instalación de cableado en alta mar, el equipamiento eléctrico necesario y la forma de la propia potencia generada, hace que sea preferible la conexión de varios dispositivos a la red; esto último es debido a que la onda generada es de mejor calidad cuando se hace uso de varios dispositivos de menor potencia frente a un único dispositivo de mayor potencia. Además de todo ello el riesgo de pérdida de disponibilidad del parque es menor, dado que pueden estar en estado funcional varios dispositivos mientras se hace el mantenimiento o la reparación de alguno de los equipos que forman el parque.

La localización de los diferentes captadores de olas tiene que tener en consideración diferentes puntos que se vuelven cruciales en el diseño del parque (Commission of the European Communities May 2010):

- La distancia entre dispositivos debe permitir la optimización de la señal, pero debe de respetar el límite de cercanía, estando lo suficientemente alejados como para poder suponer como despreciable los problemas de interacción. Respetar esta distancia permitirá una mayor producción, así como el acceso de barcos al mantenimiento del parque. Ello conlleva minimizar la interacción entre boyas, de tal forma que la ola que llega a cada dispositivo sea lo más similar a la ola de entrada (antes de pasar por cualquier dispositivo WEC)
- Tratar de que la potencia obtenida por el conjunto del parque sea lo más estable posible.

Desde hace alrededor de veinte años se han construido diversas plantas que utilizan la tecnología de la columna de agua oscilante, habiéndose alcanzado en el año 2004 un total de potencia instalada de 1 MW. Algunas de ellas aún siguen funcionando, pero muchas otras han sido destruidas por los fuertes oleajes. A continuación se explican las características de las plantas más importantes, por orden de construcción (Fernandez Diez 2004):

La primera central undimotriz es la de **Kvaerner**, construida en la isla de Toftestallen, en Noruega en el año 1985 y disponiendo de 500 kW. Posteriormente en 1988 se construyó la central de **Mighty Whale**, construido en Japón. Se diferencia de la mayoría de los dispositivos en que es una estructura flotante, no fija, y, por lo tanto, necesita pequeñas fuerzas de anclaje. Tiene

unas dimensiones de 30x40 m y una potencia de 110 kW. Los rendimientos son considerablemente altos, hasta el 60%. En el año 1990 se crea la central de **Sakata**, en Japón que fue la que cuenta con el primer convertidor que formó parte del rompeolas de un puerto, anclado al fondo marino con balasto de arena. El tren de potencia era de 60 kW, utilizaba una turbina Wells de tipo tándem. Ese mismo año se fabrica la central de **Vizhinjam**, en el estado de Kerala, en India. Que también integraba la configuración en un rompeolas; pero a diferencia de la Sakata está produciendo 150 kW de potencia.

En 1994 España se une al negocio de la energía undimotriz con la **OWC de Unión FENOSA** situando la primera planta española de energía de las olas, en La Coruña. En el año 2000 se integra una central en la Isla de Islay, en Gran Bretaña, también conocida por ser la primera en introducir un transformador tipo LIMPET<sup>7</sup>. **Energetech** en 2002 desarrollo e instaló 500 kW en Australia. Llamando la atención por tener un reflector de forma parabólica. Y para terminar en 2005 se instala en Guipúzcoa siendo la primera planta con un sistema de dieciséis turbinas, alojadas en un rompeolas y conectadas a la red.

### 3.5.2. Control de potencia de la planta undimotriz y predicción de potencia de salida.

Según Falcão (2010) el control de plantas OWC presenta como mayor problema de funcionamiento la aleatoriedad de la fuente energética y el desconocimiento de modos de la magnitud de las cargas del oleaje (Falcao 2010).

El generador eléctrico que más se utiliza para los parques de dispositivos OWC es la **máquina de inducción**, en gran parte por su capacidad de generar electricidad en grandes rangos y velocidades, por encima de la de sincronismo (Sole 2004). Se suele utilizar junto con el control de par (control explicado en el último apartado del anexo 1) y el de velocidad, para así poder ajustar la carga a las necesidades de la red en tiempo real.

Por último, hay que tener en cuenta que en todos los casos se necesita un convertidor de potencia con el fin de acoplar el generador a la red.

### 3.5.3. Disposición de los WEC en el Parques OWC

Las formas estándar estudiadas hasta el momento de colocación de boyas en parques según (EquiMar 2009) son:

---

<sup>7</sup> **LIMPET: Transformador Terrestre de Energía Marina.**

- Un dispositivo independiente.
- En filas / lineal.
- En estrella.
- Con cadena de redundancia.
- En serie.

A continuación se describirán las diferentes formas de agrupación así como ventajas presentes en cada una de ellas:

- **Un dispositivo independiente** sería el caso típico implantado para las centrales onshore, por lo que para el caso de estudio actual no guarda gran importancia.



ILUSTRACIÓN 15, CENTRAL ONSHORE (FUENTE OWC-WEC.WEEBLY.COM)

- La agrupación en **líneas o filas** es la metodología más utilizada para parques pequeños y medianos, cuentan con sistemas de colección tanto de corriente alterna como continua.

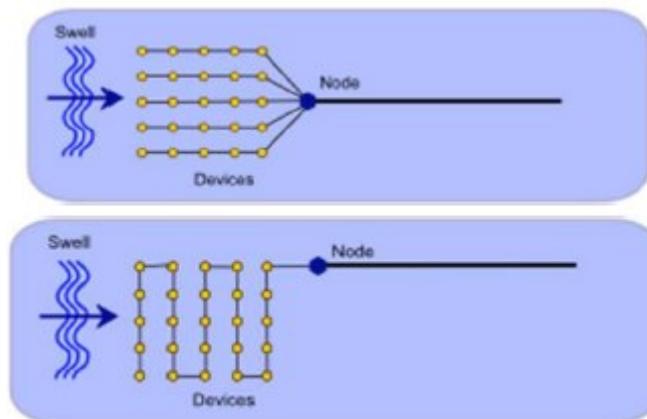


ILUSTRACIÓN 16 Y 17, AGRUPACIÓN DE DISPOSITIVOS OWC EN LÍNEA. (EQUIMAR 2009)

- La agrupación **radial o en estrella**. Cuenta con los dispositivos conectados independientemente al HUB. Siendo el sistema más utilizado cuando el parque cuenta muchas unidades o un gran tamaño. Su sistema de colección puede ser tanto de corriente alterna como continua.

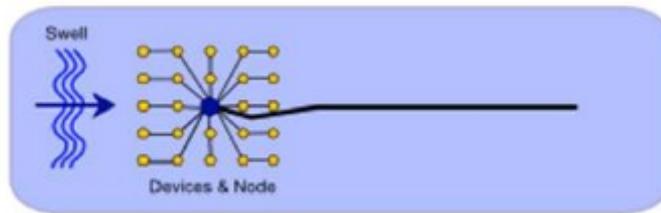


ILUSTRACIÓN 18, AGRUPACIÓN RADIAL DE DISPOSITIVOS OWC. (EQUIMAR 2009)

- La agrupación **en cadena con redundancia**. Cuenta con disposición de los dispositivos conectados en serie a lo largo del cable colector formando una malla. Tiene que haber un conmutador (lo señalado como tap de la imagen inferior) encargado de controlar el flujo de potencia en el circuito. Por la redundancia del sistema se vuelve una configuración de interés para parques con alto riesgo de contingencias, como en los anteriores casos su sistema de colección puede ser tanto de corriente alterna como continua.

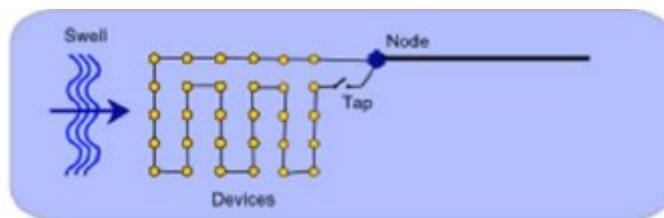


ILUSTRACIÓN 19, AGRUPACIÓN EN CADENA DE DISPOSITIVOS OWC. (EQUIMAR 2009)

- Agrupación **en serie**. En esta configuración los dispositivos se encuentran conectados en serie en varias ramas que a su vez actúan conectándose en paralelo entre sí. Su sistema de colección es en corriente continua y se aplica a parques de pequeño y mediano tamaño.

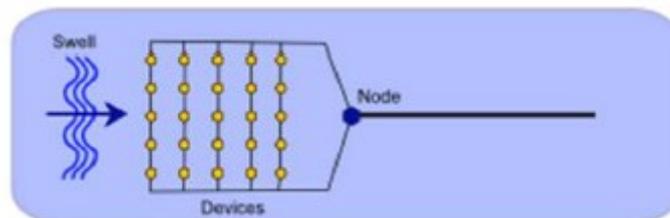


ILUSTRACIÓN 20, AGRUPACIÓN SERIE DE DISPOSITIVOS OWC. (EQUIMAR 2009)

# 4. Metodología

En el presente Trabajo Fin de Máster se han desarrollado diferentes tareas relacionadas entre sí, que han dado lugar a los resultados finales:

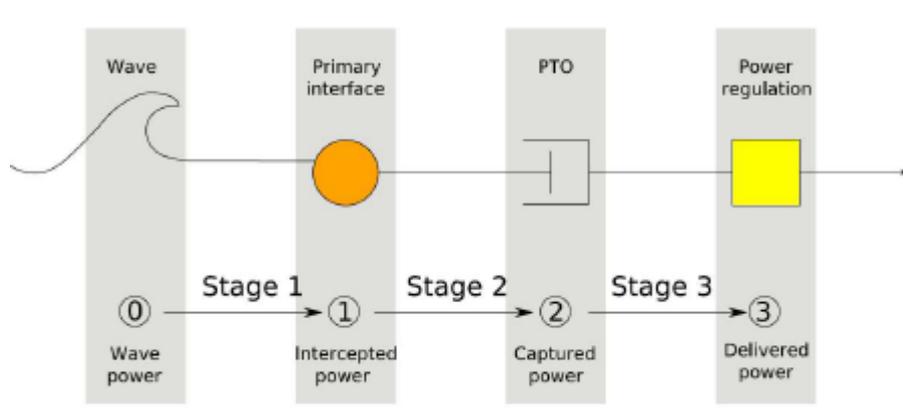
1. Estudio del modelo del sistema WEC utilizado.
2. Obtención del modelo agregado.
3. Diseño y desarrollo de un programa informático que permita la mejor colocación de los dispositivos convertidores de olas, dentro de los límites establecidos por BIMEP. Entendiéndose por tanto de la menor fluctuación frente a las olas de entrada en el sistema.
4. Estudio de la normativa vigente para la conexión del parque a la red eléctrica española.
5. Integración del modelo agregado del parque en el modelo de conexión a la red; permitiendo así el control, y permitiendo por tanto la integración de fallos en la red.

Como se puede apreciar hay una relación entre todas las tareas, siendo imprescindible para el global del trabajo cada uno de los apartados.

## 4.1. Estudio del modelo WEC utilizado

A lo largo de este trabajo se ha hecho uso del modelo del WEC facilitado por otros proyectos anteriores, por lo que, en algunos casos se harán variaciones en el mismo y en otros se usará a modo de caja negra dentro de otros modelos, por lo que será imprescindible el conocimiento del modelo, ya que permite hacer simulaciones desde la ola hasta la turbina de generación eléctrica que presenta el OWC.

El modelo expresado como un diagrama de bloques en el que cada bloque se identifica con partes del sistema WEC, desde la ola hasta el generador, como se ve en la Ilustración 21.



**ILUSTRACIÓN 21, REPRESENTACIÓN DE LAS TRES ETAPAS DE UN WEC, CONVERTIDOR DE LA ENERGÍA DE LA OLA, FUENTE (MACZULAK 2010).**

Se aprecia que el modelo implementado en la Ilustración 22 sigue la esquemática de la figura anterior.

0) **Wave power**, potencia hidráulica de **la ola** correspondiendo con Wave\_force del esquema simulink.

1) **Intercepted power**, captación de la potencia hidráulica por medio de **la boya**. Correspondiendo con WEC del esquema simulink.

2) **Captured power**, transformación de la energía potencial y cinética realizada por el aire desplazado en la cámara de aire de la boya y transformación de las mismas en energía mecánica (por medio de la **turbina bi-radial**). Correspondiendo con OWC del esquema simulink.

3) **Delivered power**, transformación de la energía mecánica obtenida en energía eléctrica inyectable a la red, por medio del **generador eléctrico**. No representado en el siguiente esquema.

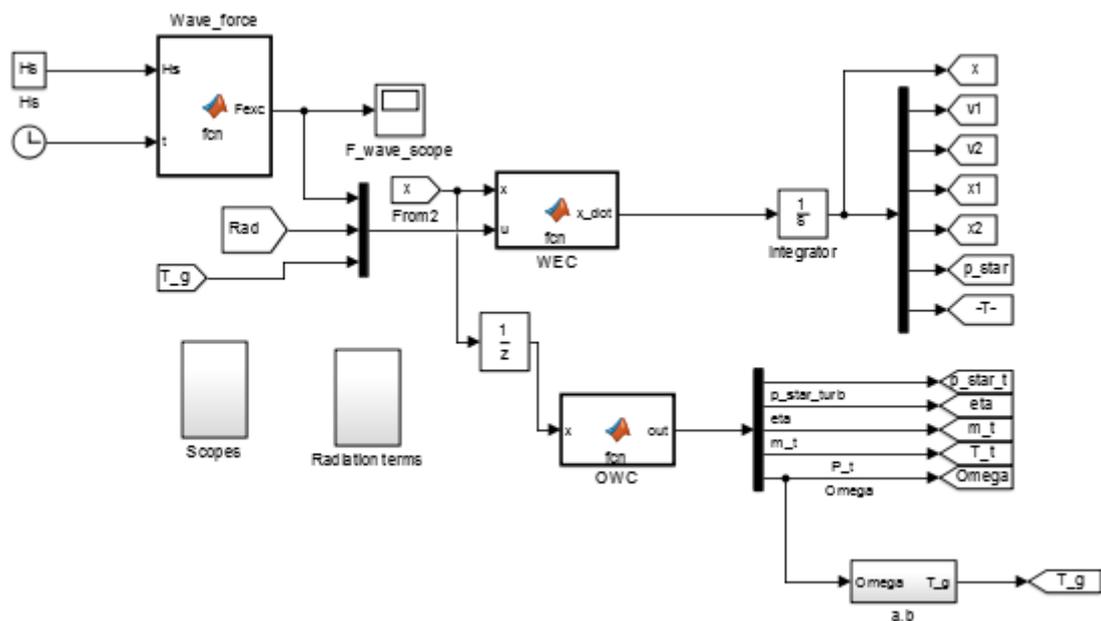


ILUSTRACIÓN 22, ESQUEMA SIMULINK OLA-BOYA-TURBINA.

Para una mejor comprensión del diagrama anterior, se adjunta el primer **anexo** de este documento que explica las ecuaciones e interpretación matemática interna del modelo.

## 4.2. Obtención del modelo agregado del parque

Un modelo agregado es un modelo simplificado, en el que simulando partes del sistema y haciendo ciertas interpretaciones permite el desarrollo de los efectos que produce el sistema global. La simulación de 25 dispositivos OWC (las implantadas por área de fondeo en BIMEP) con sus respectivos controles y con el modelo de las olas como entrada al sistema, puede llevar consigo un elevado coste computacional. Por ello es interesante la implementación del modelo agregado.

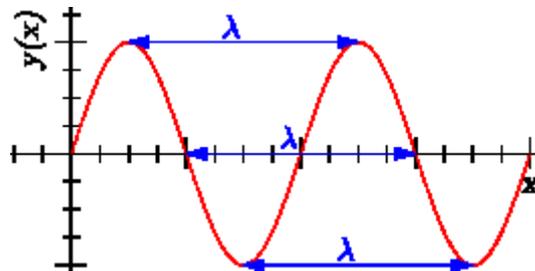
Se considera que es posible la realización de un modelo agregado debido a que:

- Todos los dispositivos utilizados en el parque son el mismo modelo de OWC, con lo que se concluye que actuarán generando la misma energía frente a la misma entrada.
- La ola que entra en la zona de fondeo es la misma para todos los dispositivos, pese a no ser en el mismo instante de tiempo, la ola no sufre grandes cambios de potencia en su desplazamiento (simplificación tomada). Ya que los dispositivos están suficientemente alejados como para no crear interacciones entre ellos.
- Consideración de las olas como paralelas perfectas sin cambios de direcciones y sin intervención de una dirección de incidencia secundaria. Posteriormente se analizará el efecto de otros ángulos de incidencia.

Para poder llevar a cabo el modelo agregado hay que comprender cómo se realiza el movimiento de la ola, así como cuánto es el tiempo que ésta tarda en llegar a cada uno de los dispositivos. Este tiempo será el desfase (cálculo explicado posteriormente en Ecuación 1 y Ecuación 2), que se utilizará para el cálculo de la potencia en el resto de dispositivos, suponiendo como referencia el primer dispositivo sobre el que la ola impacta.

Haciendo uso del modelo agregado se consigue que sólo se tenga que hacer una simulación de boya: la boya referencia, y posteriormente se hará un cálculo del desfase con respecto a las otras boyas. Así se podrán sumar las ondas de potencia desfasadas, obteniendo como resultado la generación de potencia del parque.

Para el cálculo del desfase es de total importancia la velocidad de traslación de una ola, velocidad que no depende de la altura de la ola, ni de la velocidad del viento (aunque puede influir), siendo su dependencia principal, la longitud de onda.



**ILUSTRACIÓN 23, REPRESENTACIÓN ONDA PERFECTAMENTE SINUSOIDAL**

Para entornos de aguas profundas, la velocidad de la ola se toma por la siguiente expresión:

$$c = \sqrt{\frac{g \cdot \lambda}{2 \cdot \pi}}$$

**ECUACIÓN 1, VELOCIDAD DE OLA AGUAS PROFUNDAS**

Expresión donde “**c**” se identifica con velocidad de traslación (para aguas profundas), “**g**” constante de gravedad, y “**landa**” longitud de onda. Dicha ecuación se puede expresar en función del periodo, sabiendo que **landa** es igual a la velocidad por el periodo de la onda; se llega a la siguiente expresión:

$$c = \frac{g \cdot T}{2 \cdot \pi}$$

## ECUACIÓN 2, VELOCIDAD DE OLA AGUAS PROFUNDAS

En el caso de aguas poco profundas respecto a la longitud de onda, la expresión se puede simplificar a la ecuación número 3, la cual no es utilizable en BIMEP, dado que las zonas de fondeo cuentan con profundidades de entre 45 y 95 metros; y esta ecuación cobra sentido en los puntos que la profundidad toma valores de la mitad de la longitud de onda.

$$c = \sqrt{\frac{g}{h}}$$

## ECUACIÓN 3, VELOCIDAD DE OLA AGUAS POCO PROFUNDAS, COSTA.

En la Ecuación 3, Velocidad De Ola Aguas Poco Profundas, Costa. “**h**” es la profundidad, entendiéndose por lo tanto que la velocidad de las olas de costa sólo depende de la profundidad y no del periodo de la ola.

Con el cálculo de la velocidad y conociendo las coordenadas de todos los dispositivos es sencillo el cálculo del desfase (tiempo que tarda en llegar la ola), y para su cálculo, se hace interesante la denominación de la referencia, que se ha seleccionado como el primer punto del área de fondeo por el que la ola llega a pasar (círculo rojo Ilustración 24).

Como se puede ver en la siguiente figura, para el cálculo de la distancia se realiza la proyección del dispositivo sobre el ángulo de incidencia de la ola (línea amarilla), y con respecto a la referencia, se calcula la distancia que ha de recorrer la ola para impactar con cada boya.

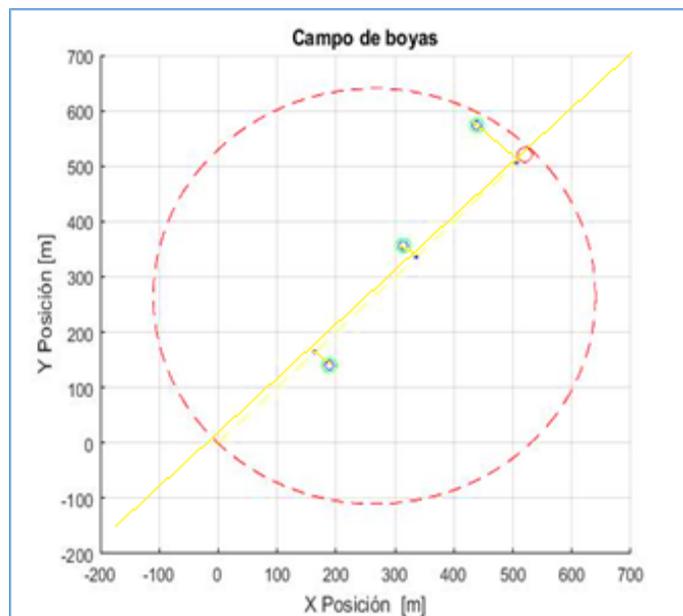
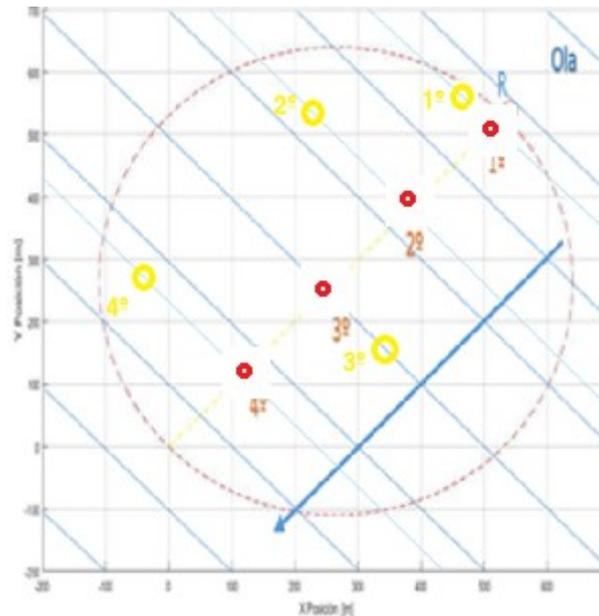


ILUSTRACIÓN 24, CONFIGURACIÓN EJEMPLO PUNTOS DE MEDICIÓN.

## 4.3. Disposición de los dispositivos en el área de ensayos de BIMEP.

A la hora de configurar la ubicación de los dispositivos hay que tener en cuenta los puntos cruciales en el diseño de un parque ya mencionados en el estado del arte (apartado 3.2.1.), y

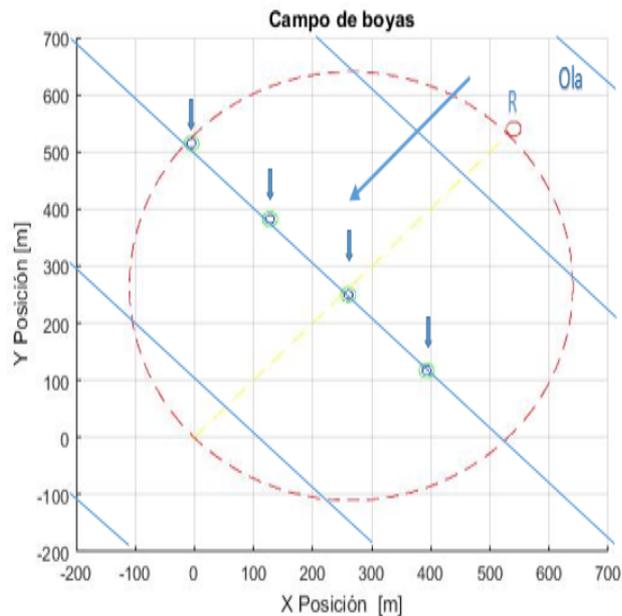
entender la variedad de localizaciones que se pueden escoger, ya que, no siempre que se estudie una configuración diferente, se obtendrá una potencia distinta. Esto último es debido a que en el caso estudiado hay numerosas configuraciones óptimas, así como otras que no lo son dado que en la optimización sólo se depende del tiempo en que tarda la ola en llegar a los dispositivos, (la distancia en la dirección de avance de la ola). En la siguiente imagen (Ilustración 25) se explica con un ejemplo. Como sólo depende del tiempo que tarda la ola en llegar hasta la boya, habría otras configuraciones que permitirían los mismos resultados de tiempos y por tanto de sumatorio de potencias instantáneas. En la imagen posterior se aprecia cómo, para diferentes configuraciones de parque (rojas y amarillas), se obtiene la misma potencia resultante.



**ILUSTRACIÓN 25, EJEMPLO DOS CONFIGURACIONES ESPACIALES DE CAMPO DE BOYAS CON MISMOS RESULTADOS, BOYAS VERDES-BOYAS AMARILLAS. .**

En base a todo lo anterior, la ubicación de las boyas puede llevar a dos casos límites:

- **Obtener máximo pico potencia:** en este caso debido a la sumatoria de la potencia creada por cada ola, el resultado total será la potencia suministrada por una boya multiplicada por el número de boyas instalado. Esta configuración en el caso de ser conectada a la red, sería la menos adecuada, debido a que introduciría picos de potencia y grandes fluctuaciones en la red teniendo que realizar un rectificado de la onda. Como se ve en la Ilustración 26 en esta configuración la ola llegaría a todas la boyas en el mismo instante de tiempo.



**ILUSTRACIÓN 26, EJEMPLO DE PEOR CONFIGURACIÓN ESPACIAL CAMPO DE BOYAS, .**

- **Obtener la potencia más regular:** onda sin grandes oscilaciones, obteniendo la menor derivada de la potencia posible, y acercándose por lo tanto a la potencia media. Considerado como el mejor caso para la conexión a red, permitiendo al sistema de control una menor carga de trabajo a la hora de aplanar la curva de potencia.

Para obtener esta curva de potencia lo más regular posible se ha realizado un programa informático que realiza la ubicación de las 25 boyas con las que cuenta BIMEP, este programa hace una discretización de los 750 metros de diámetro de la zona de fondeo (distancia máxima entre dispositivos OWC para BIMEP), y prueba de forma iterativa las configuraciones en las que se pueden disponer boyas, esta prueba calcula la potencia generada por el campo de boyas y a su vez su derivada, permitiendo seleccionar la configuración que presente la menor derivada.

Para el cálculo de la derivada se realiza la siguiente simplificación (aproximación de primer orden):

$$\dot{p} = \frac{P_t - P_{t+h}}{h}$$

#### **ECUACIÓN 4, SIMPLIFICACIÓN DE LA DERIVADA**

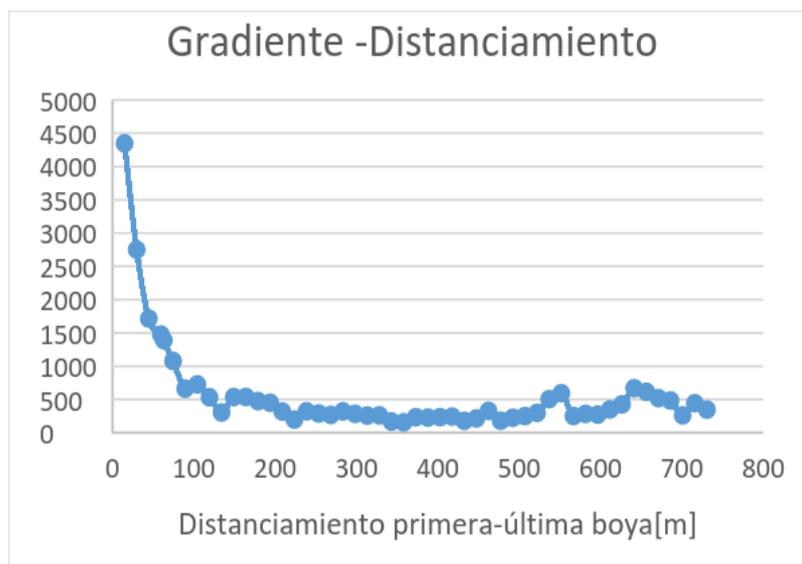
Tras la selección de la mejor ubicación sobre la línea de incidencia se trazan perpendiculares, que corresponderán a las líneas en las que si se ubicarán las boyas, generando curvas de potencias iguales como se muestra en la Ilustración 25.

Es en este momento cuando se realiza la ubicación de las coordenadas de cada boya sabiendo por un lado que cada boya tiene que estar situada sobre cada una de esas líneas perpendiculares a la línea de incidencia, y además siguiendo el criterio de que entre dispositivos debe de haber una distancia superior a 5 veces el diámetro de boya, dado que con distancias iguales o superiores se acepta que la perturbación boya-ola se vea prácticamente restaurada. Y con ello se llega al resultado final de la ubicación más conveniente.

A su vez está mejor configuración puede variar, debido a que la mejor configuración para un estado de mar no es la misma que para otro estado de mar y viceversa al igual que el ángulo de incidencia de la ola también puede variar en gran medida. Por ello para el diseño se han seleccionado los valores de ángulo de incidencia y estado de mar más típicos en la zona del litoral de Armintza (localización de BIMEP).

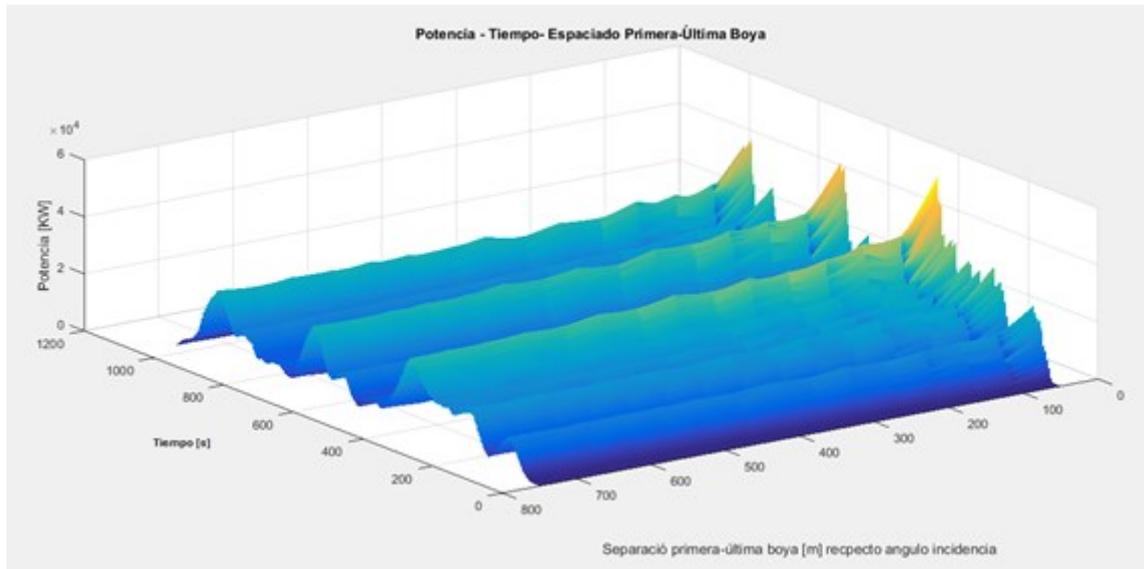
El código que permite esta localización de dispositivos se adjunta como anexo 2. Este programa permite hacer los cálculos de la potencia establecida para el parque y a su vez, permite la generación de las diferentes disposiciones, al ser integrable con el esquema simulink que representa el parque.

En la siguiente gráfica se indica como varía la fluctuación (sumatorio de la derivada de la potencia) con las diferentes configuraciones que se podrían establecer en bimep, valores de distanciamiento primera-última boya que toman como máximo la distancia del diámetro del área de fondeo, (con respecto a la perpendicular de la ola incidente). Sería interesante obtener el mínimo gradiente, como se explicaba en el apartado 4.3, y a su vez cumplir con las otras especificaciones comentadas.



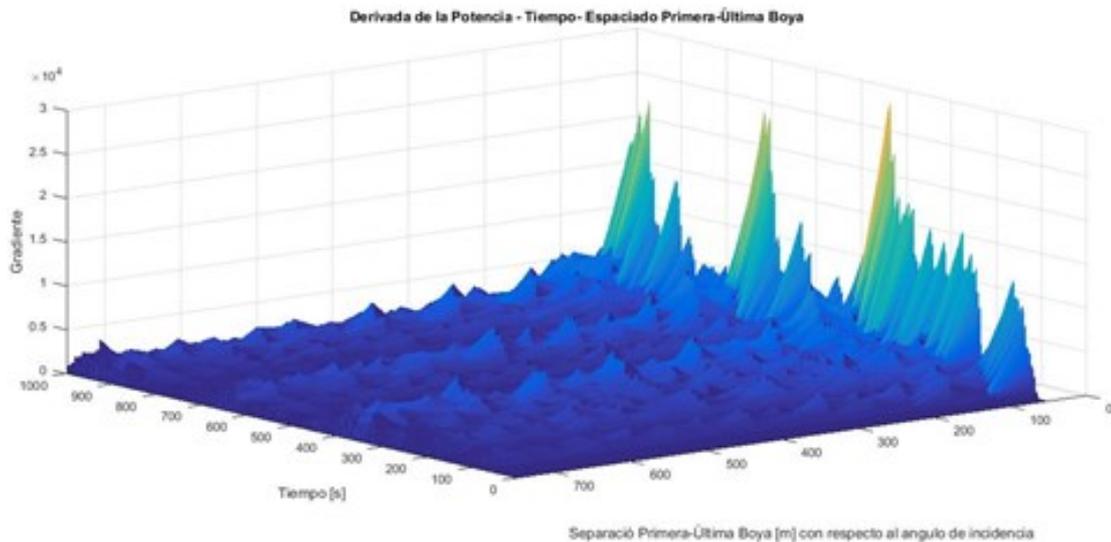
**ILUSTRACIÓN 27 GRADIENTE-DISTANCIAMIENTO PRIMERA-ÚLTIMA BOYA CON RESPECTO AL PRIMER ESTADO DE MAR.**

La anterior imagen tiene la peculiaridad de que interpreta los gradientes en los que la distancia entre dispositivos es menor de 5 veces el diámetro de la boya, estas distancias son hasta 400 metros, siendo la peor zona para la ubicación de dispositivos por su gran fluctuación de potencia y además son configuraciones en las que la ola no se ve restaurada en su totalidad. Por otro lado esta imagen representa la suma de gradientes a lo largo del tiempo de simulación para diferentes distanciamientos: primera-última boya, pero no permite identificar cómo se modifica la potencia en los diferentes instantes de tiempo. Para ello se representa la siguiente ilustración.



**ILUSTRACIÓN 28 POTENCIA-TIEMPO-ESPACIADO PRIMERA ÚLTIMA BOYA. ESTADO DE MAR: 1, ÁNGULO DE INCIDENCIA:-45**

Si se deriva la superficie mostrada en la Ilustración 28 haciendo uso de la simplificación de la derivada (Ecuación 4), se obtiene el gradiente de la superficie, mostrado en la imagen posterior.

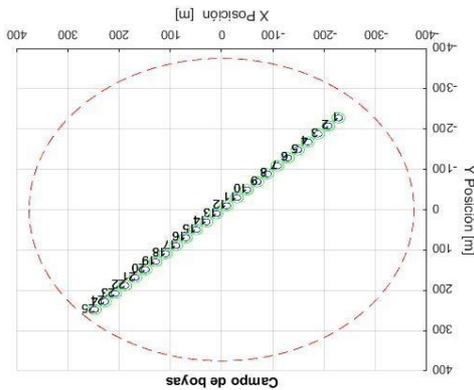


**ILUSTRACIÓN 29, DERIVADA POTENCIA-TIEMPO-ESPACIADO PRIMERA ÚLTIMA BOYA. ESTADO DE MAR: 1, ÁNGULO DE INCIDENCIA:-45**

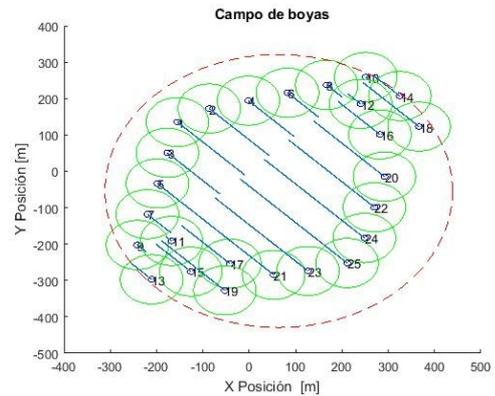
Los primeros valores de desfase (primera-última boya) tienen magnitudes de fluctuación muy elevados (valores parte izquierda de la figura anterior), lo cual se asume que es debido a que aún no supera el periodo completo de la onda, por lo que la disposición espacial de las boyas no permite el registro de la totalidad del periodo, perdiendo por tanto la continuidad entre que termina una ola y empieza la siguiente.

En las siguientes gráficas se comparan las curvas de potencia entre un caso en que la disposición de las boyas es adecuada (optimizada), y otro caso, con una disposición de las boyas, nada favorable para el objetivo propuesto. En las dos gráficas se ha considerado el ángulo de

incidencia igual que el de BIMEP (-45°). Se puede apreciar que en la imagen 38 se representa la estela generada por la boya (líneas azules), no colocando dispositivos en dicha línea paralela ángulo incidente de la ola, dado que es la zona más perturbada por la boya.

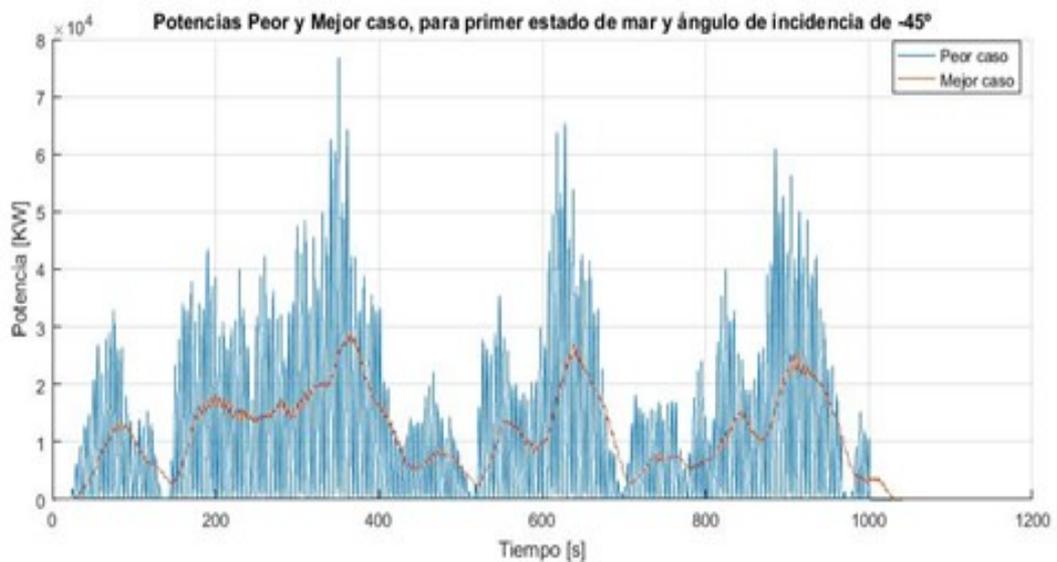


**ILUSTRACIÓN 30, CONFIGURACIÓN PEOR CASO.**



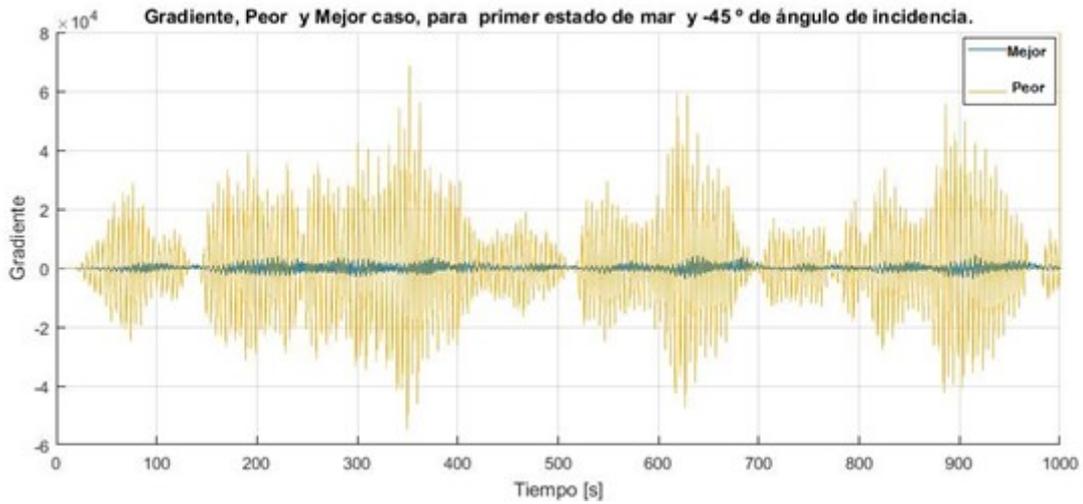
**ILUSTRACIÓN 31, CONFIGURACIÓN MEJOR CASO OPTIMIZADA PARA DISTANCIA CABLEADO.**

Las configuraciones anteriores obtienen las siguientes curvas de potencia frente al estado de mar número 1, siendo la curva azul la curva de potencia de la Ilustración 30 y la curva naranja la curva de potencia de la Ilustración 31.



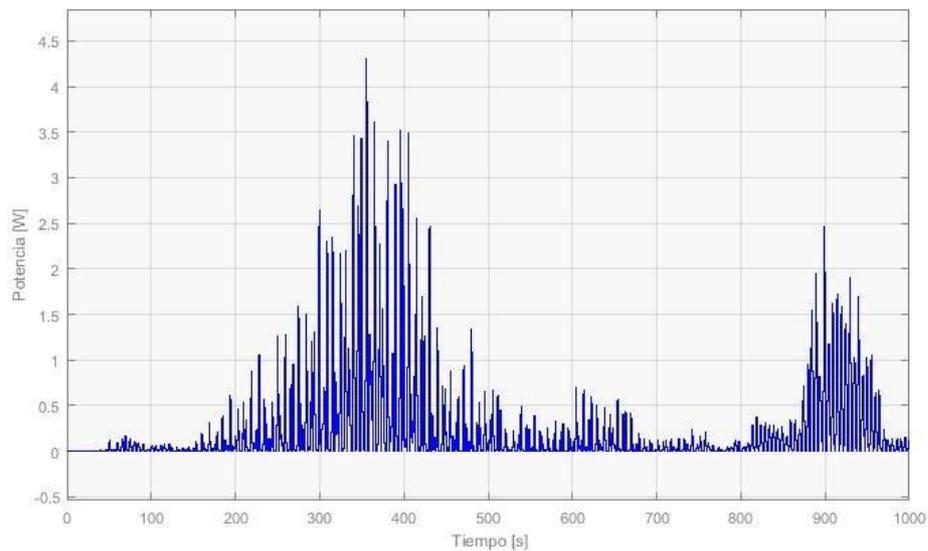
**ILUSTRACIÓN 32, COMPARACIÓN (PEOR CASO-MEJOR CASO-MEDIA).**

Y si se realiza la derivada de las curvas mostradas en la figura anterior se obtienen las curvas representadas en la Ilustración 33.



**ILUSTRACIÓN 33, COMPARACIÓN GRADIENTES PEOR CASO-MEJOR CASO PARA MISMO ESTADO DE MAR (1) Y PARA MISMO ÁNGULO DE INCIDENCIA (-45) TENIENDO AMBOS CASOS LA MISMA POTENCIA MEDIA.**

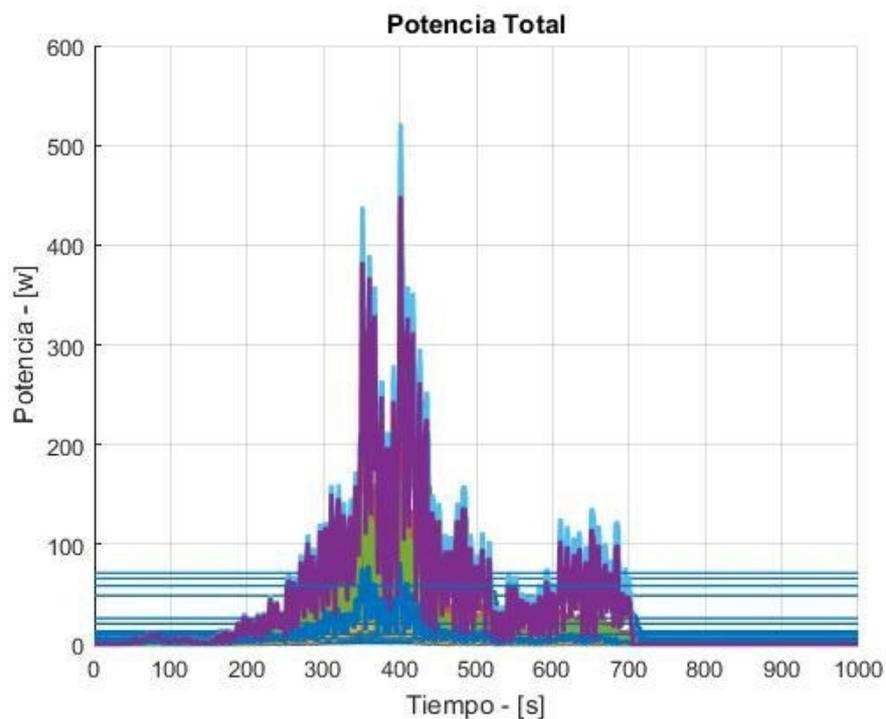
Para poder entender mejor la gráfica anterior, se representa en la Ilustración 34 la curva de potencia generada por una boya, que como se puede apreciar es una mera división de la curva de potencia para el peor caso, en el cual la ola impacta en el mismo instante de tiempo contra todas las boyas.



**ILUSTRACIÓN 34, CURVA POTENCIA ÚNICA BOYA.**

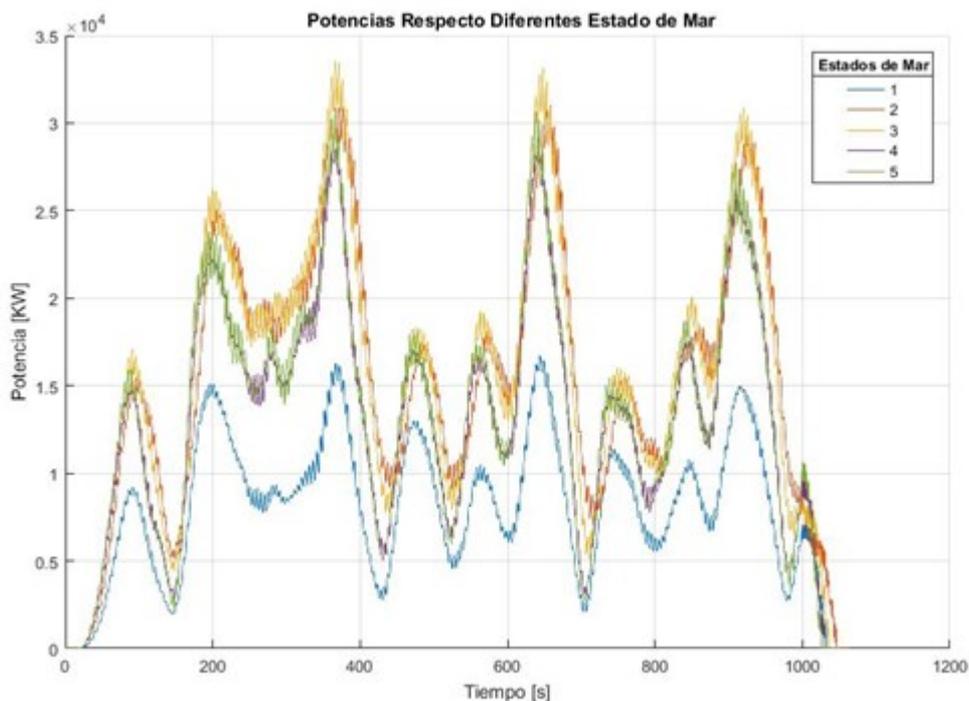
En el registro de olas en BIMEP (estado de mar) se registran los datos de periodo, altura y frecuencia de las olas en diferentes días en las costas de Arminza, para así poder caracterizar el mar de esa zona, en especial en esta zona es más frecuente tener olas de 0,89 metros y periodo, 10,51 frente a olas con períodos de 12,19 y alturas de 3,73 metros). En el Anexo III: Tabla Estado de Mar BIMEP se encuentran especificados los 20 estados de mar utilizados para el registro de la mejor configuración; en la Ilustración 35, Potencia Registrada Para Los 20 Estados De Mar En Diferentes Configuraciones De Desfase Entre Olas. Ilustración 35 se puede apreciar cómo la

potencia media (líneas azules horizontales) es diferente al variar el estado de mar (en especial al variar la altura de ola incidente).

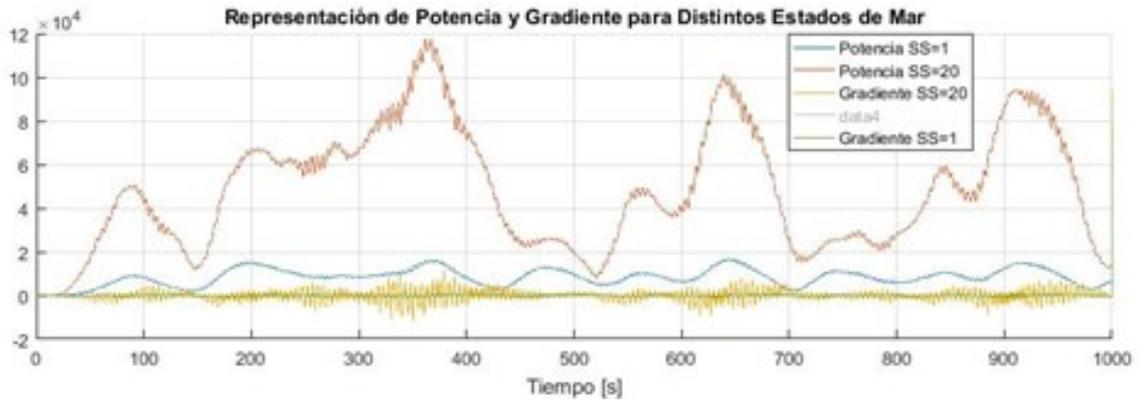


**ILUSTRACIÓN 35, POTENCIA REGISTRADA PARA LOS 20 ESTADOS DE MAR EN DIFERENTES CONFIGURACIONES DE DESFASE ENTRE OLAS. .**

Tras haber seleccionado cual será la localización espacial de las boyas se hacen las comprobaciones de cómo son las curvas de potencia para los diferentes estados de mar, como se muestra en la figura posterior, se ajusta razonablemente bien el sistema a los diferentes estados de mar registrados.

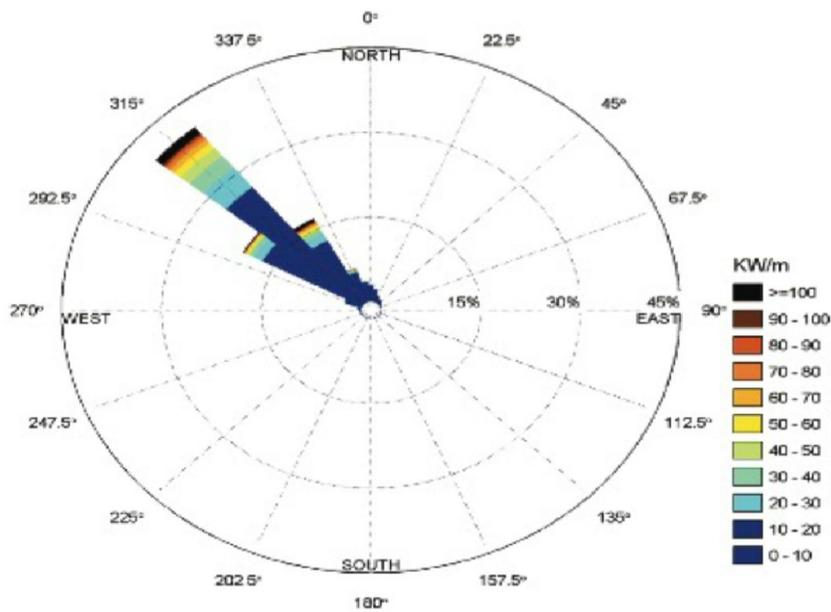


**ILUSTRACIÓN 36, POTENCIA REGISTRADA PARA DIFERENTES ESTADOS DE MAR SOBRE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA.**



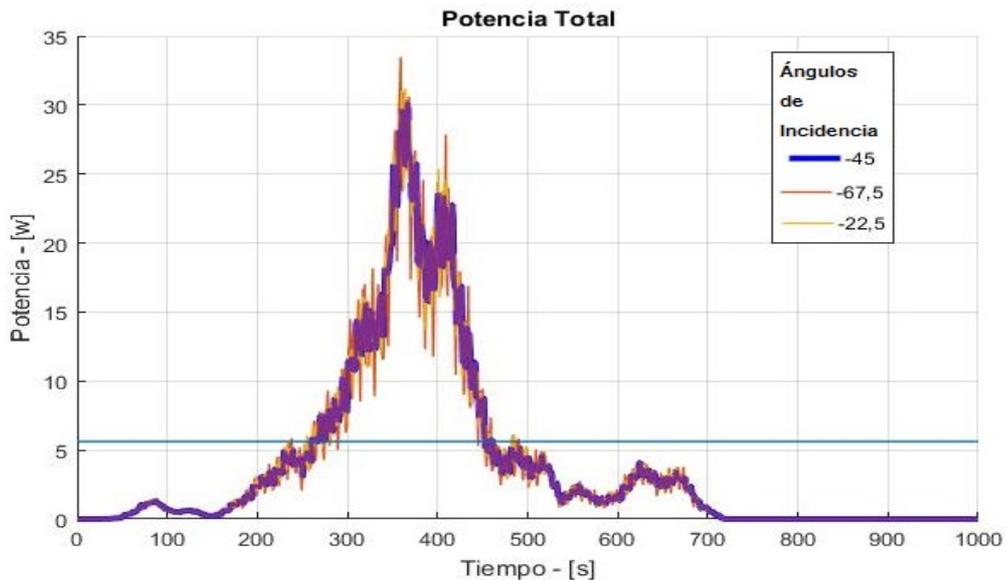
**ILUSTRACIÓN 37, POTENCIA Y GRADIENTES REGISTRADOS PARA DIFERENTES ESTADOS DE MAR (1 Y 20) SOBRE LA CONFIGURACIÓN ÓPTIMA.**

Como se ha explicado en puntos anteriores cada configuración es óptima únicamente para un ángulo de incidencia, por lo que un cambio en el ángulo de incidencia puede hacer que una configuración a priori buena se vuelva una mala configuración o incluso la peor. En BIMEP se establece un mapa de los ángulos de incidencia registrados, imagen mostrada a continuación, en el que la longitud de los vectores indica la probabilidad del mismo ángulo y los colores ilustran la potencia por metro que suelen desplazar dichas olas.



**ILUSTRACIÓN 38, ROSA DE LAS PRINCIPALES DIRECCIONES DE POTENCIA ANUALES EN BIMEP.**

Como se aprecia en la figura anterior, el ángulo de incidencia más común es el de 315°, pero también se percibe cierta variedad de ángulos de incidencia desde -67,5° hasta -22,5°. Representándose la curva potencia de las diferentes incidencias de las olas para poder visualizar sus efectos.



**ILUSTRACIÓN 39, CURVA POTENCIA MEJOR CONFIGURACIÓN (-45°) PARA DIFERENTES ÁNGULOS DE INCIDENCIA.**

En la curva anterior se aprecia que pese a tener mayores oscilaciones, el sistema se mantiene con baja fluctuación, demostrando cierta robustez:

- o En los cálculos de la configuración del emplazamiento de las boyas es fundamental conocer el ángulo de incidencia predominante de las olas en la zona seleccionada, ya que respecto al mismo serán realizadas todas las ubicaciones y son principalmente dependientes del mismo.
- o La ubicación óptima para el caso real tendrá que permitir un distanciado superior al periodo temporal, y posteriormente se comparará los casos óptimos para cada uno de los ángulos de incidencia de los estados de mar que se producen en dicha ubicación, conociendo la frecuencia de los diferentes casos. Con todo ello se podrá seleccionar la mejor disposición.

La disposición del campo de boyas perfecta para BIMEP, por espaciado entre boyas mínimo, abaratando cables, y por permitir la disposición de la onda más estable, es la mostrada en la siguiente imagen (con el ángulo real de incidencia de BIMEP de -45°), en la que el distancia entre la boya 1 y 25 es de 555 m, aunque como ya se ha explicado, da buenos resultados a partir de un distanciamiento de la primera-última boya igual a 126,46 metros: la distancia que tarda en recorrer la ola en 9 segundos, coincidiendo con el periodo utilizado para la simulación.



10	<b>251.4410 259.2192</b>
11	<b>-167.7319 -191.3493</b>
12	<b>240.4101 185.3972</b>
13	<b>-210.5826 -296.9910</b>
14	<b>324.8387 207.0347</b>
15	<b>-126.1540 -275.3536</b>
16	<b>281.9880 101.3929</b>
17	<b>-41.7255 -253.7161</b>
18	<b>366.4166 123.0304</b>
19	<b>-52.7563 -327.5380</b>
20	<b>291.7461 -14.4312</b>
21	<b>52.8854 -284.6874</b>
22	<b>270.1086 -98.8597</b>
23	<b>126.7074 -273.6565</b>
24	<b>248.4712 -183.2883</b>
25	<b>211.1359 -252.0190</b>

**TABLA 2, POSICIONES DE LAS 25 BOYAS CON RESPECTO AL CENTRO DE LAS CIRCUNFERENCIAS QUE CONFORMAN LAS ZONAS DE FONDEO.**

A su vez la disposición óptima del HUB de conexión se deberá de concentrar en la zona más cercana de cada área de fondeo con el cable estático y con el cable de costa (como se explica en el apartado 3.1.5). Siguiendo la regla de que los cables más anchos y caros de la instalación sean lo menos largos posibles, y a su vez la forma de conexión entre OWC se llevara a cabo por agrupación en cadena con redundancia (como se explica en el apartado 3.5.3), debido a la ventajas que ofrece en cuanto a posibles tormentas marinas que podrían llevar a estados desastrosos en la instalación.

## 4.4. Estudio de Normativa de conexión a red

Actualmente no hay normativas exclusivas para la energía undimotriz, esto se debe principalmente a la madurez de esta tecnología, igualmente para la conexión del parque undimotriz se vuelve crucial el cumplimiento de la normativa eléctrica vigente, suministrar la señal eléctrica bajo las condiciones establecidas. Para cumplir este objetivo, se describirán algunos de los requisitos generales descritos en los Procedimientos de Operación fijados por el Operador de la Red, que en el caso de España es Red Eléctrica de España (REE).

### 4.4.1. Frecuencia

Según el Procedimiento de Operación P.O. 1.4, que rige las condiciones de entrega de la energía en los puntos frontera de la red gestionada por el operador del sistema, la frecuencia nominal del sistema es de 50 Hz. Se consideran como normales las variaciones de frecuencia comprendidas entre 49.85 y 50.15 Hz. (BOE 18/08/98 1998)

### 4.4.2. Tensiones en los Nudos

Del mismo modo que en el apartado anterior, según el P.O. 1.4, en condiciones normales de operación, la tensión en el nivel de 400 kV en los puntos frontera estará comprendida entre los 390 y 420 kV. En el nivel de 220 kV la tensión estará comprendida entre 205 y 245 kV. Durante breves instantes se podrán presentar valores máximos de hasta 435kV y mínimos de hasta 375 kV en el nivel 400 kV. Mientras que en el nivel de 220 kV, las tensiones podrán bajar de forma esporádica hasta los 200 kV. Los parámetros de control de la tensión también describen distintos valores límites dependiendo de la época del año y de si es un fallo simple o pérdidas en doble circuito (BOE 18/08/98 1998).

### 4.4.3. Límites de capacidad

En la integración de un parque marino se debe tener en cuenta las características de la red existente más cercana para realizar su diseño y no sobrepasar los **límites de capacidad de la infraestructura eléctrica existente**. Considerando dos límites de capacidad, un **límite térmico** y un límite que consiste en la **valoración del equipamiento eléctrico existente**.

- **Límites térmicos**

Al ubicar estas centrales en localizaciones en las que la red no está preparada para la inyección de potencia, es posible que las líneas vean superados sus límites térmicos y por tanto no funcionen en condiciones normales de operación.

Para evitar o reducir estos efectos es recomendable realizar una evaluación térmica del sistema para buscar el punto de conexión más adecuado en la red. Este estudio se debe a que el diseño de la red es anterior a la conexión y por tanto puede estar diseñada para llevar un flujo menor al que se quiere instalar.

- **Valoración de la aparamenta eléctrica existente**

Todos los componentes que integran una red de transporte o distribución, así como los circuitos de alimentación a distintas zonas de consumo son diseñados a una potencia nominal específica y son ajustados acorde a un flujo de potencia dentro de unos límites.

Se pueden emplear ciertos **métodos para solucionar los efectos negativos** que aparecen en el régimen permanente:

**Refuerzo de la red.** Un refuerzo en conductores, transformadores o interruptores de mayor capacidad, evitaría problemas con los nuevos flujos de potencia permitiendo por tanto una mayor entrada; sería una de las soluciones más caras pero también de las más sencillas.

**Optimización del tamaño del parque undimotriz.** Diseñar el parque undimotriz para la instalación de red que se encuentra en la zona a ubicar el parque, de tal modo que el parque se ajuste a la red existente.

**Ajustes en el factor de potencia.** Modificar el factor de potencia de la planta para elevar o disminuir la tensión en el punto de conexión.

**Transformadores con tomas.** Elevando la tensión en las tomas en los instantes de gran demanda o disminuyéndola para los instantes de gran generación y demasiada tensión.

#### 4.4.4. Emisión de flickers

En la norma (50160:2011 UNE-EN 2011) “Características de la Tensión suministrada por las Redes Generales de Distribución”, los flickers se definen como “*una impresión de inestabilidad de la sensación visual debida a un estímulo luminoso en el cual la luminosidad o la distribución espectral fluctúan en el tiempo*”. Estas fluctuaciones de tensión provocan variaciones de luminancia<sup>8</sup> que serán apreciadas por los usuarios conectados en la cercanía al emisor de flickers. Pueden ser medirse por las siguientes magnitudes, según el Documento de Trabajo sobre Requisitos Técnicos de las instalaciones Eólicas y Fotovoltaicas (2009):

- **Severidad de duración breve** (Pst), que es la medida en un periodo de 10 min.
- **Severidad de duración larga** (Plt), calculada a partir de una secuencia de 12 valores de Pst en un intervalo de 2 h, según la fórmula siguiente:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

##### ECUACIÓN 5, SEVERIDAD DE DURACION LARGA.

En el P.O. 12.2, se indican los límites de emisión de parpadeo en cada nudo de la red de transporte:

$$P_{st} \leq 0,8$$

$$P_{lt} \leq 0,6$$

---

<sup>8</sup> Luminancia: Resultado que se obtiene al dividir la intensidad luminosa de una superficie entre su área aparente para un observador alejado de ella.

En el caso de los dispositivos de generación undimotriz, la intermitencia del recurso, las condiciones de arranque y desconexión de los generadores y las interacciones con los equipos de control de la red pueden provocar en la red grandes niveles de emisión de flickers. Igualmente no todos los dispositivos emiten el mismo nivel de fluctuaciones en la señal generada.

**Posibles soluciones** para los flickers:

- Utilizar en los pasos intermedios antes de conexión a red almacenamiento de energía.
- Utilizar formas de arrancar suave, en el caso de sistemas con generadores de inducción o una interfaz de electrónica de potencia capaz de amortiguar dichas variaciones en la emisión.

#### 4.4.5. Cambios en la potencia transmitida por el oleaje.

Como ya se mencionó anteriormente la cierta aleatoriedad de la fuente de energía que se utiliza, provoca cambios o saltos en la tensión suministrada a los consumidores. Además de que en ocasiones se pueden llegar a desconectar algunos de los dispositivos OWC como consecuencia de faltas o condiciones de mar severas.

La unidad **control debe de permitir realizar acciones de conexión o desconexión a los dispositivos de producción en función de las zonas de operación en las que se encuentren**, como se observa en la figura posterior. Las zonas de operación vienen determinadas por las condiciones en la que se encuentre el oleaje, estas dependen de la altura de ola y la energía por periodo.

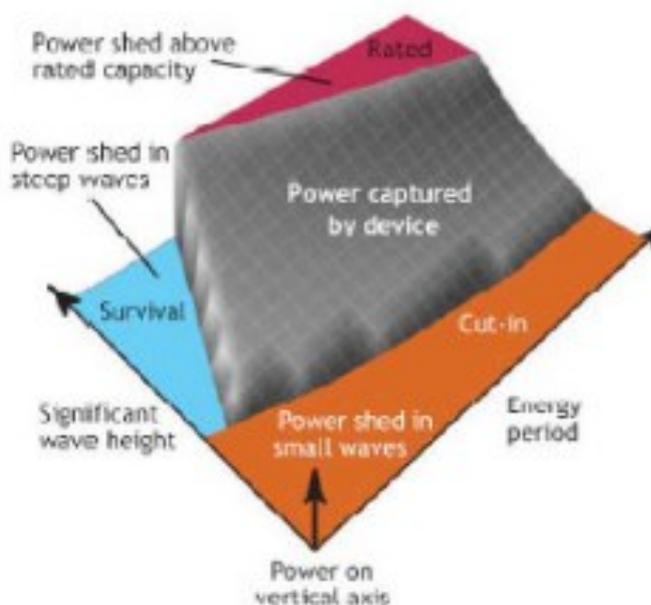


ILUSTRACIÓN 41, ZONAS DE OPERACIÓN PARA UN DISPOSITIVO DE CONVERSIÓN, (FUENTES KHAN J. 2008)

Como se puede apreciar en la imagen anterior hay diferentes zonas de operación para un parque undimotriz:

- **“Survival”**, sería la situación en la que hay un alto tiempo entre olas y por tanto baja potencia por periodo, no merecería la explotación del recurso (oleaje).
- **“Cut-in”**, caso contrario al anterior. existe una gran energía pero la altura de la ola es tan pequeña que no permite la operación efectiva del dispositivo.
- **“Rated”**, zona en la que es mejor no operar por la gran altura de ola y la excesiva energía transmitida.
- **“Power Captured”**, zona que mantiene condiciones de altura y energía de ola que permiten la explotación del recurso.

#### 4.4.6. Emisión de armónicos

Los armónicos pueden crear variaciones en la forma de la señal. Esta emisión de armónicos se normaliza en la UNE-EN 50160 (2011) por medio de la tensión armónica definida como *“una tensión sinusoidal cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental de la tensión de alimentación”*. A su vez se evalúa individual y globalmente:

- **Individualmente**, según su amplitud relativa **“ $u_h$ ”**, siendo ésta la tensión del armónico con relación a la tensión fundamental **“ $u_1$ ”**, donde **“ $h$ ”** representa el orden del armónico.
- **Globalmente**, se puede evaluar como el valor de la tasa de distorsión armónica total **“THD”** calculada utilizando la siguiente expresión:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (u_h)^2}$$

ECUACIÓN 6, TASA DE DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

En el Documento de Trabajo sobre Requisitos Técnicos de las instalaciones Eólicas y Fotovoltaicas (2009) se establecen los siguientes límites de emisión de armónicos en el nudo a conectar con la red de transporte:

Armónicos Impares		Armónicos Pares	
Orden	Tasa Armónico (%)	Orden	Tasa Armónico (%)
h	(%)	h	(%)
3	1,80	2	1,00
5	1,80	4	0,90
7	1,80	6	0,40
9	0,90	8	0,20
11	1,30	10	0,20
13	1,30	12	0,20
15	0,30	14	0,20
17	0,90	16	0,20
19	0,90	18	0,20
21	0,20	20	0,20
23	0,60	22	0,20
25	0,60	>22	0,20
>25	0,20		
Tasa Total de Distorsión Armónica (THD) 3,00 %			

**TABLA 3, LIMITES EN LOS ARMÓNICOS INYECTADOS A RED.**

En el caso de los WEC la emisión de armónicos se **presenta principalmente por los dispositivos de conmutación empleados en convertidores de electrónica de potencia necesarios para servir de interfaz del sistema con la red**; como por ejemplo los generadores síncronos de imanes permanentes (rotativo o lineal) o generadores de inducción doblemente alimentados.

#### 4.4.7. Desequilibrio de tensiones

Los sistemas de transporte de corriente más comunes son trifásicos y estos mismos han de estar equilibrados. Un sistema trifásico está equilibrado cuando sus corrientes son iguales y están desfasadas simétricamente, cuando aparecen desequilibrios, deben encontrarse dentro de ciertos límites para el correcto funcionamiento de la red. El desequilibrio se produce principalmente debido al nivel en las fluctuaciones existentes en las oscilaciones de la ola.

En el Documento de Trabajo sobre Requisitos Técnicos de las instalaciones Eólicas y Fotovoltaicas (2009) aparece “ $\mu^9$ ”, expresado como el porcentaje de la relación entre la componente de tensión de secuencia inversa y la componente de tensión de secuencia directa, ambas componentes vectoriales, y a su vez función del tiempo que dure este desequilibrio.

Los siguientes valores de desequilibrios de tensión que se permiten conectar a los nudos de la red de transporte son:

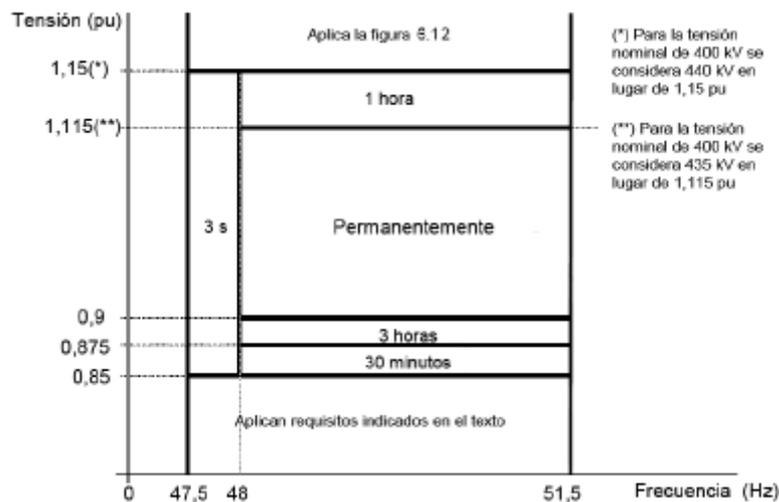
- $\mu \leq 0,7$  % para duraciones de desequilibrios en rango de minutos (límite de corta duración)

<sup>9</sup>  $\mu$ : grado de desequilibrio.

- $\mu \leq 1$  % para duraciones de desequilibrios en rango de segundos (límite de muy corta duración)

## 4.4.8. Rangos de funcionamiento

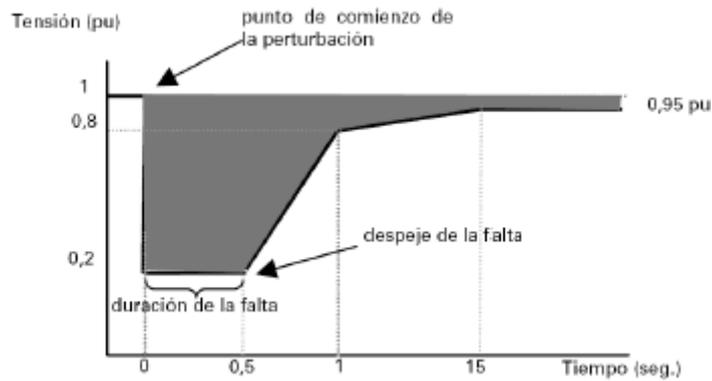
Como se aprecia en las imágenes inferiores la instalación generadora debe de permanecer acoplada a la red en función de los valores que tome la tensión eficaz a tierra y a su vez de la frecuencia y duración de la falta.



**ILUSTRACIÓN 42, TIEMPOS MINIMOS QUE HA DE SER CAPAZ DE SOPORTAR LA INSTALACION GENERADORA CONECTADA A LA RED EN CONDICIONES DE TENSION EFICAZ A TIERRA. FUENTE DOCUMENTO DE TRABAJO SOBRE REQUISITOS TÉCNICOS DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS Y FOTOVOLTAICAS (2009)**

## 4.4.9. Respuesta frente a huecos de tensión

En el “P.O. 12.3. Requisitos de Respuesta frente a Huecos de Tensión de las Instalaciones Eólicas” se indica como la instalación de producción debe de ser capaz de soportar sin desconexión, los huecos de tensión producidos por cortocircuitos trifásicos, bifásicos a tierra o monofásicos, con las magnitudes y la duración de huecos indicados en la siguiente imagen. No se deberá desconectar la instalación para huecos de tensión que se encuentren en el interior del área sombreada.

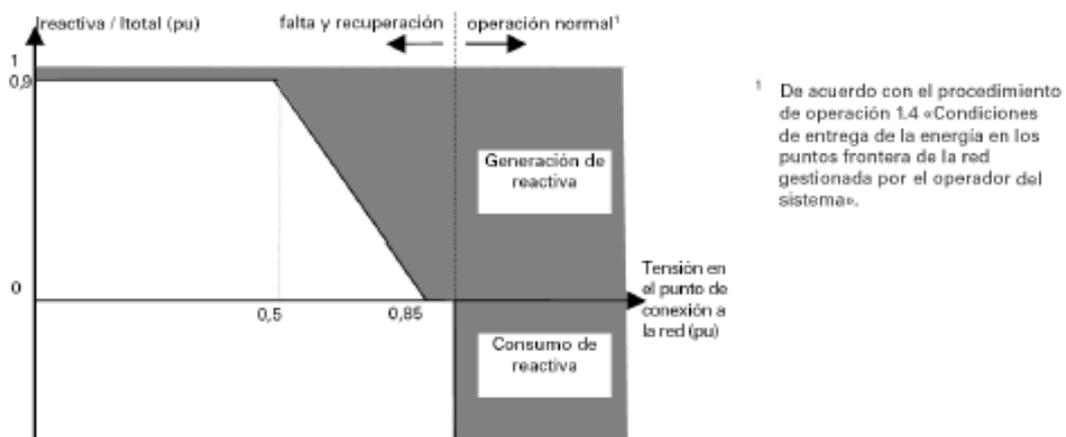


**ILUSTRACIÓN 43, PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN (2006). FUENTE: P.O. 12.3. REQUISITOS DE RESPUESTA FRENTE A HUECOS DE TENSIÓN DE LAS INSTALACIONES EÓLICAS.**

En la generación undimotriz es de esperar que al utilizar esta fuente de energía renovable como es el oleaje se le exija el mismo requisito que en la eólica. Además tanto durante la falta como durante el periodo necesario para la recuperación de la tensión posterior a la falta, la instalación deberá suministrar la máxima intensidad posible. Esta aportación de intensidad ha de desaparecer transcurridos 150 ms desde el inicio de la falta o desde el instante que se despeje la falta.

#### 4.4.10. Requisito de control de tensión

La regulación de tensión y potencia reactiva para controlar la tensión (como dicta el documento de Trabajo sobre Requisitos Técnicos de las instalaciones Eólicas y Fotovoltaicas) en el estacionario se realiza por medio de la absorción e inyección de potencia reactiva, teniendo límites de inyección en función de la potencia activa inyectada, con una velocidad de respuesta tal que toda respuesta se ha de establecer en menos de 1 minuto, como se muestra en la Ilustración 44.

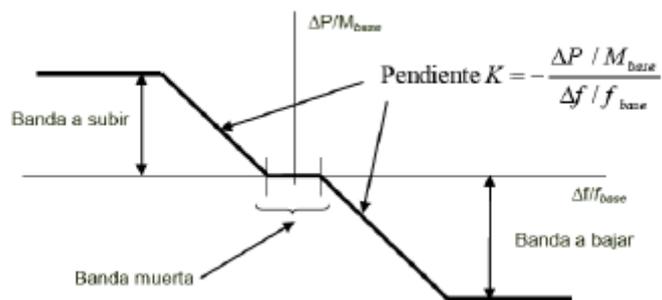


**ILUSTRACIÓN 44, ÁREAS DE FUNCIONAMIENTO DURANTE PERIODOS DE FALTA Y RECUPERACIÓN, FUENTE: PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN (2006).**

### 4.4.11. Control de frecuencia

El cumplimiento del Procedimiento de Operación 7.1 Servicio complementario de la regulación primaria es de obligatorio cumplimiento para las unidades de producción eléctrica. Este control tendrá que activarse y desactivarse en tiempo real a solicitud de operador del sistema, éste solicitará al grupo generador variaciones en función de la necesidad de la regulación potencia-frecuencia.

La variable manipulada por el sistema será la potencia activa y variará en función de la frecuencia cumpliendo con lo indicado en la siguiente imagen.



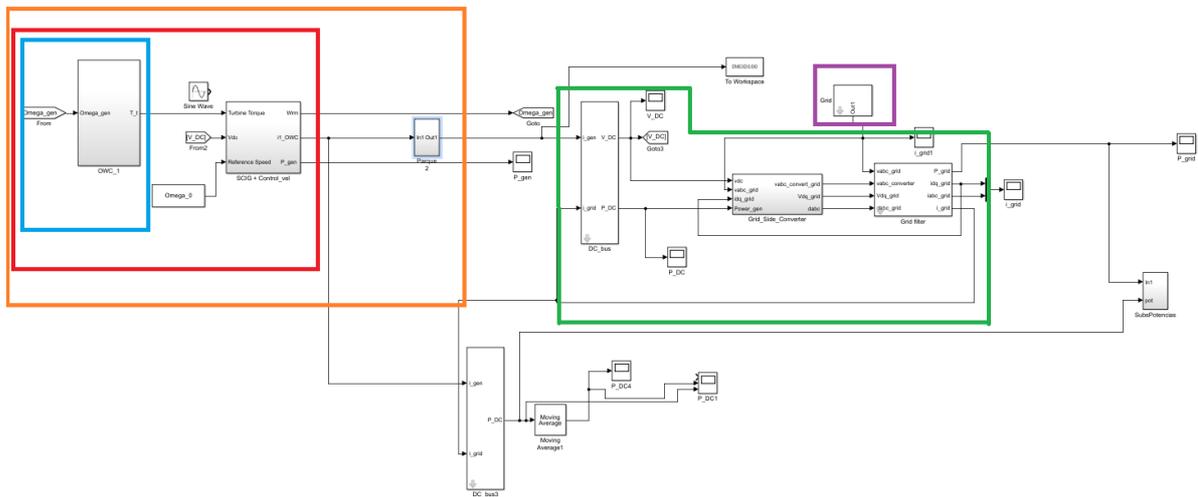
**ILUSTRACIÓN 45, INCREMENTO UNITARIO DE LA POTENCIA ACTIVA EN FUNCIÓN DEL DESVIÓ UNITARIO DE LA FRECUENCIA. FUENTE: PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN 7.1 SERVICIO COMPLEMENTARIO DE LA REGULACIÓN PRIMARIA**

Además se debe de cumplir que la pendiente con la que se modifica la potencia ha de estar entre 15 y 50. Y la instalación debe de contar con la capacidad de ajustar la banda muerta entre  $\pm 10$  mHz y  $\pm 200$  mHz.

## 4.5. Integración del modelo de agregado del parque con el modelo de conexión a red eléctrica.

En este apartado se pretende obtener un modelo de control que permita representar sistema generador eléctrico del parque unido a la red con un modelo que permita producir variaciones en la misma, de tal forma que se puede simular como actuaría el sistema y permitir el posible estudio sobre el modo de control para cada caso.

A continuación se describirán brevemente las partes más importantes que conforman el esquema simulink como se muestra en la siguiente imagen:



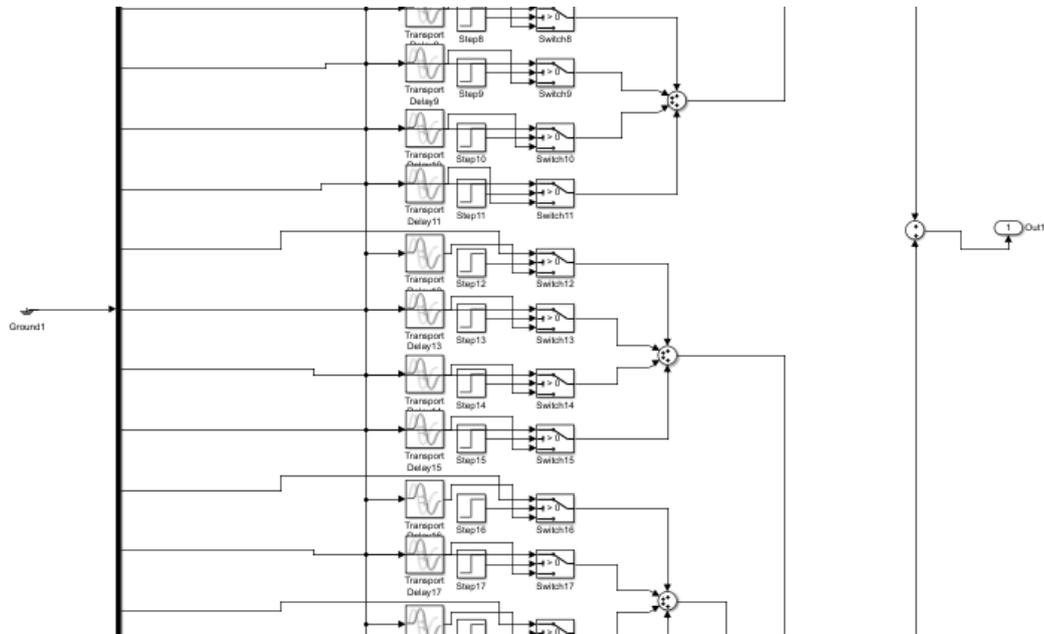
**ILUSTRACIÓN 46, ESQUEMA SIMULINK PARQUE OWC RED COMENTADO.**

La parte contenida en el cuadrado azul representa la ola y la dinámica del captador, es la parte del sistema ya descrita en el apartado 4.1. y además representado en la Ilustración 22. Dicho bloque tiene como entrada el estado de mar, valores de altura y periodo registrados en el mar, creando un oleaje representativo. Realiza el cálculo el par que crearía la turbina. Internamente lleva un control óptimo para la producción de máxima potencia, se basa en que el captador se encuentre en todo momento en fase con las olas.

El cuadrado rojo engloba tanto la boya como el generador que la representa, el generador modelado es de Jaula de ardilla, el generado está contra de velocidad de la turbina, tiene como salidas el flujo eléctrico que se crea (intensidad) y la potencia eléctrica generada; como entradas del sistema cuenta con la velocidad de referencia la cual quiere establecer, la potencia mecánica generada por la turbina y el propio voltaje del bus DC al que posteriormente será conectado el sistema. Este bloque engloba un único dispositivo OWC, siendo por tanto el modelo agregado del sistema.

El cuadrado naranja por tanto representa la unión del conjunto de boyas que forman el parque, internamente simplemente está formado por sumadores, delays<sup>10</sup> y switches que permiten el apagado y encendido de las boyas (como se representa en la siguiente ilustración), se permite modificar la intensidad de la primera boya para crear la intensidad eléctrica que representaría el parque en conjunto. El propio código mencionando en el punto 4.2 es el encargado de modificar los valores de los retrasos que corresponderían a cada dispositivo OWC. El bloque adicional a los ya descritos tiene de entrada la intensidad del generador y como salida la intensidad del parque. Por tanto el conjunto representa al modelo agregado del parque OWC.

<sup>10</sup> Delays: retraso, en simulink es un bloque que permite el retraso temporal de la entrada en una cantidad de tiempo especificada.



**ILUSTRACIÓN 47, INTERIOR DEL BLOQUE GENERADOR DE PARQUE**

Internamente el bloque realiza la suma de las intensidades generadas por las los 25 generadores correspondientes a los 25 dispositivos que se quieren implantar en BIMEP.

Posteriormente en el interior de la figura verde de la Ilustración 46 se añade el modelo facilitado por otro trabajo fin de master que representa en un primer lugar el bus dc, contando como entradas la intensidad de salida del parque y la intensidad de la red, su salidas son el voltaje DC y la potencia DC, viene representado por el valor de la capacitancia del bus DC y el voltaje inicial del bus DC.

Posteriormente a este bloque se le adjunta un controlador de la red y a su vez un convertor DC/AC, teniendo como entrada el voltaje DC, el voltaje línea-línea de la red, la intensidad de la red y la potencia transmitida por el bus DC; a su vez de salidas cuenta con el voltaje alterno creado.

Para finalizar con el interior de la figura verde se cuenta con el filtro RC, que toma como entradas las salidas del bloque anterior y además la tensión trifásica que representa a la red de transporte eléctrico, sus salidas son la intensidad de la red, el voltaje fase-neutro y el fase-fase además de la tensión aparente final ya calculada en base al voltaje e intensidad de la red.

Finalmente la representación de la red eléctrica de transporte (se puede apreciar en la siguiente imagen) es la representada en el cuadrado violeta. No presenta entradas generadas por los otros bloques siendo por tanto independiente de los demás y su salida, es el voltaje trifásico.

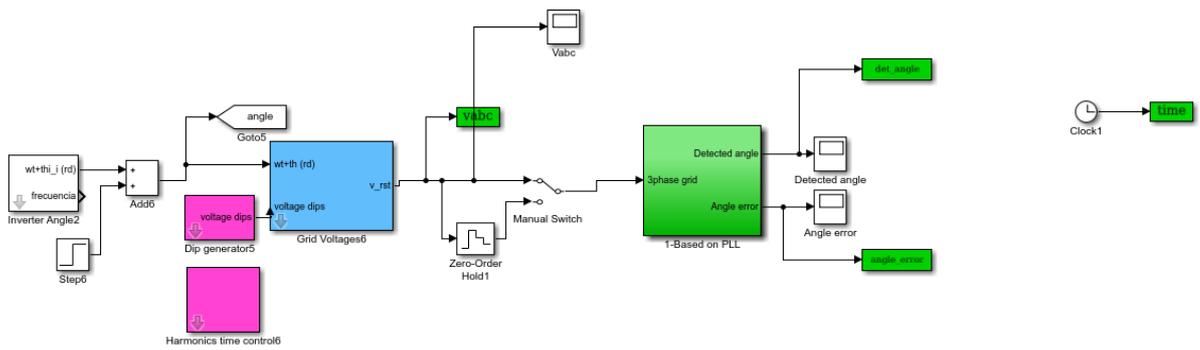


ILUSTRACIÓN 48, MODELO SIMULINK DE RED ELÉCTRICA TRIFÁSICA,

Cuenta con tres bloques principales:

- **Grid Voltages:** Representa la red trifásica RST, es configurable pero con los valores predeterminados genera tres ondas sinusoidales desfasadas 120 grados y con amplitud 1 pu. En este mismo bloque se podrían crear desequilibrios entre las diferentes líneas.
- **Dip Generator:** Permite crear huecos en cada una de las fases en el instante que se desee y con una profundidad comprendida entre el 0 y el 100%, su salida alimenta al bloque anterior para crear estas perturbaciones en la red.
- **Harmonics Time Control:** Permite introducir armónicos en la red, puede generar hasta el armónico 25, siendo los necesarios a considerar por la normativa explicada en el punto 4.4.6. A su vez cada armónico puede empezar y acabar en el instante que se desee, también este bloque permite el solape de los diferentes armónicos; y además se pueden genera armónicos por fases.

Con todo ello habría quedado explicado en líneas generales el esquema simulink que comprende el concepto “Wave to Wire<sup>11</sup>” del campo de dispositivos OWC encontrados en BIMEP.

<sup>11</sup> **Wave to Wire:** “de la ola al cable” viene a significar el concepto de modificar la potencia de la ola en potencia eléctrica inyectable a la red eléctrica.

## 5. Presupuesto

Se trata de un trabajo de investigación y realización de software, en el que no ha sido necesario la adquisición de materiales ni la utilización de mano de obra, por lo que sólo se tendrá en cuenta para el apartado de presupuesto, las horas de realización del proyecto y los sueldos que habrían sido necesarios en caso de haber sido ejecutado por una empresa privada.

	<b>Horas invertidas</b>	<b>Sueldo</b>	<b>Total</b>
<b>Director del proyecto</b>	30h	25euros/hora	750 euros
<b>Co-Director del proyecto</b>	30h	25euros/hora	750 euros
<b>Ingeniero</b>	600h	15euros/hora	9000 euros
			10.500 euros

**TABLA 4, PRESUPUESTO DEL PROYECTO**

Si se considera el presupuesto destinado para el proyecto general en BIMEP son 20 millones de euros, precio en el cual se tendría que tener en cuenta todo el material, mano de obra, equipos, investigaciones, etc. Se puede intuir que este proyecto dentro de BIMEP tiene un presupuesto asequible.

## 6. Análisis de rentabilidad.

En un sector de producción eléctrica son las empresas generadoras las que eligen cuál es el medio de producción de energía a emplear; dado que son empresas y por tanto tienen fines económicos, sólo utilizarán energías renovables si encuentran rentabilidad en las mismas.

Un proyecto como este debe estar sujeto a trabajos independientes de análisis de rentabilidad, dado la complejidad de hacer un estudio económico de una tecnología en desarrollo y en estado tan primitivo, sujeta a cambios en el consumo y en la producción variable dependiente del oleaje. Aun así se conoce que en un futuro llegará un momento en el que el desarrollo de la tecnología y el precio de su competidor directo, los combustibles fósiles (en extinción), harán que este tipo de energía llegue a ser sumamente rentable.

Pero en la actualidad debido al desarrollo de esta tecnología y al precio de las investigaciones que se han de depositar en este campo no es una energía sumamente rentable que englobe unos beneficios competitivos con muchas otras tecnologías.

Para el estudio de rentabilidad se ha hecho una comparación con la central undimotriz de Mutriku, esta central también ubicada en País Vasco genera la electricidad que consumen 400 personas, tiene una potencia instalada de 296 KW (aproximadamente la cuarta parte de un molino de viento estándar) en sus primeros 3 años de funcionamiento se consiguió obtener la cantidad de 36.000 euros, suma bastante escasa si se piensa en la inversión inicial de 2,5 millones de euros en la construcción de la central, haciendo que, sin considerar variaciones en el precio de la electricidad ni deterioro en la central, se cubriese la inversión en 208,3 años. De todas formas el objetivo de BIMEP no es exclusivamente la producción eléctrica si no la investigación y desarrollo de las tecnologías que intervienen en la producción de energía undimotriz por lo que puede ser algo más rentable, además al ser una central más moderna se tendrán tecnologías con mejores rendimientos.

En BIMEP la inversión ha sido de 20 millones de euros y en este caso con una conexión de 20 MW (como máxima), aun así como se explica en el apartado 3.1.5 el objetivo primordial de BIMEP no es la generación eléctrica si no el estudio de la energía undimotriz y la investigación en su desarrollo.

Para poder alcanzar un grado de madurez adecuado en estas tecnologías que permita reducir de forma considerable el coste de la energía que generan, es necesario investigar y aprender de los prototipos que se instalarán en el BIMEP para así poder mejorarlos hasta alcanzar un nivel comercial. Se necesitará, aún, un mínimo de 20 años para que empecemos a ver plantas comerciales de captadores de energía marina inyectando en la red energía eléctrica a un coste competitivo con otras fuentes de generación.

# 7. Conclusiones.

En base a los apartados ya descritos en metodología se han llegado a diferentes resultados en el presente documento. Por un lado se han obtenido los códigos tanto para generación del mejor emplazamiento como los esquemas simulink que permiten la conexión “Wave to Wire”. Pese a la existencia de registros de valores de estados de mar y registros de diferentes ángulos de incidencia en la zona de emplazamiento, se considera que se podría realizar un estudio más preciso si para los diferentes estados de mar registrados se conocieran además los ángulos de incidencia más frecuentes; pudiendo hacerse un estudio combinado de ambas variables para seleccionar la ubicación idílica, si además se conociera la época del año en la que se dan los diferentes estados de mar podría permitir más variables a estudiar y a optimizar.

A su vez pese a la inexistencia de normativa en conexión a red de parques de energía undimotriz, en este documento, se ha llegado a conclusiones de parámetros necesarios para la actuación del control y posible unión con la red.

También se concluye con un modelo simulink capaz de permitir la simulación de un parque OWC con conexión modelable de red (posibilidad de inyección de fallos), sirviendo como medio para posteriores estudios de posibles controles, en el desarrollo de dichos futuros estudios será necesario si se requiere una mayor adaptabilidad de la potencia inyectada del diseño de nuevos controladores de dispositivos OWC, debido a que no se pueden realizar desconexiones de boyas y si se implementa un modelo agregado no se puede ajustar de diferente manera los controles de los diversos dispositivos que forman el parque, este problema se soluciona haciendo uso de diversos controles integrables en el sistema, no sólo el control para generación de máxima potencia si no otros controles como de mínima potencia, de potencia media, etc. Creando tantos modelos de control como estrategias se deseen; con estos modelos de control se podrá seleccionar cuales de los dispositivos del parque adaptan una estrategia y cuales otras, generando por tanto un modelo de control más ambicioso y mucho más ajustable.

# Referencias

50160:2011 UNE-EN. 2011. «Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución.»

2013. *Bimep*. <http://bimep.com/>.

BOE 18/08/98. 1998. «P.O. 1.4 Condiciones entrega energía puntos frontera.»

Commission, European. 2014. «Community Research and Development Information Service.», SEC (2010) 1161.

Commission of the European Communities. May 2010. «Equitable Testing and Evaluation of Marine Energy Extraction Devices in terms of Performance, Cost and Environmental Impact.» Deliverable D 5.4. <https://ec.europa.eu/>

EquiMar. 2009. «Deliverable D 5.4. Site matching and interaction effects.» <http://www.equimar.org/>

Ereño, Pedro Ibañez. 2008. «Energías de las olas: Energías de las olas.» Jornada sobre Energía del Mar A Coruña , (01/07/08)

Falcao, Antonio. 2010. «Wave energy utilization. A review of the technologies» Article provided by Elsevier in its journal Renewable and Sustainable Energy Reviews. pag: 900-915.

Falnes, Johannes. 2002. «Ocean waves and oscillating systems .» Norwegian University of Science and Technology NTNU. ISBN 0 521 78211 2.

García Santana, Agustín. 2014. «Técnica mejorada de control reactivo aplicada a centrales undimotrices con accionamiento directo mediante generadores lineales.» Tesis doctoral, Universidad de Sevilla

2008. *International Energy Agency*. <https://www.iea.org/>.

Maczulak, Anne. 2010. *Renewable Energy Sources and Methods*. Editorial: Green Technology.  
ISBN13: 978-0816072033

Munk, Walter H. 1950. "Origin and generation of wave." Long Beach, California: ASC:  
Proceedings 1st International Conference on Coastal Engineering. *ISSN 2156-1028*.

Plan de Acción Nacional de Energías Renovables (PANER). 2011-2020. Energia y desarrollo sostenible.

Pose, Fernanda Miguélez. 2009. *La energía que viene del mar*. <http://www.minetad.gob.es>

*Red Eléctrica de España*. <http://www.ree.es/es/>.

Sole, Antonio Creus. 2004. *Energías Renovables*. Editorial: Ceysa. Cano Pina.  
ISBN: 9788486108540

Magagna, Davide y Uihlein, Andreas (2008). Ocean Wave and Tidal Current Conversion Technologies and their Interaction with Electrical Networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 58, May 2016, Pages 1070-1081

(2008). Ocean Wave and Tidal Current Conversion Technologies and their Interaction with Electrical Networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* Volume 58, May 2016, Pages 1070-1081

Documento de Trabajo sobre Requisitos Técnicos de las instalaciones Eólicas y Fotovoltaicas, PCT-A-REV - febrero 2009

# Anexo I: Entendimiento físico del modelo OWC

En este anexo se definirán las ecuaciones que explican la dinámica del OWC, procediendo al entendimiento del modelo ola-boya-turbina-generator

## Contenido

Interpretación matemática.....	58
Modelo de la ola.....	58
Modelo de la boya.....	59
Fuerza de excitación:.....	59
Fuerza de radiación cuerpo oscilante.....	61
Fuerza hidrostática.....	61
Fuerza del sistema de extracción de potencia.....	62
Dinámica de la boya.....	62
Modelado de la turbina.....	64
Modelo del generador.....	66
Sistema de control.....	66
Control del par.....	66
Control del enclavamiento “Latching”.....	68

# Interpretación matemática.

En este punto se tratará de obtener las ecuaciones necesarias para modelar el sistema completo, haciendo referencia a cuál es la simplificación realizada y a qué corresponden los diversos parámetros.

## • Modelo de la ola.

La estimación de la potencia y de la energía que describen a una ola se definen en base a diferentes parámetros, para ello es necesario representar a la ola como si fuera una onda plana, en un tiempo específico (a considerar) en el que las fases de la ola serán constantes en todos los planos perpendiculares a la dirección de propagación de la misma. El modelo matemático correspondiente:

$$\eta(x, t) = a \cdot \cos(\omega t - kx)$$

ECUACIÓN 7

Y el modelo matemático correspondiente a la elevación de sucesivas olas, sería tal que:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \cos(\omega_i t + \phi_i)$$

ECUACIÓN 8

Y el modelo matemático del espectro (registro gráfico que presenta un sistema físico al ser excitado y posteriormente analizado) es representado por medio del espectro de Jonswap, realizándose dicho modelo en sistemas no lineales de ondas largas, siendo el modelo más conveniente para la utilización sobre olas marinas:

$$S(\omega) = 320 \frac{H_s^2}{T_p^4} \frac{1}{\omega^5} \exp\left(-\frac{1950}{T_p^4} \frac{1}{\omega^4}\right) \gamma^a$$

ECUACIÓN 9

La ecuación correspondiente al espectro de Jonswap (Ecuación 9) es igual a la de Pierson-Moskowitz añadiéndole a la misma el factor de realce de pico extra  $\gamma^a$ . En BIMEP para la obtención de los valores internos de las expresiones anteriormente señaladas se hace uso de los datos adquiridos en el “diagrama de dispersión de BIMEP”, mostrado a continuación.

		Hs [m] - Significant wave height																						
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5
Tp [s] - Wave peak period	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	6,84E-04	2,28E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5	1,64E-02	9,16E-03	1,56E-03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6	2,27E-02	3,45E-02	1,11E-02	4,18E-03	5,70E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	2,28E-02	5,18E-02	2,58E-02	1,11E-02	5,78E-03	1,41E-03	3,04E-04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	1,63E-02	5,46E-02	6,23E-02	1,82E-02	6,46E-03	4,98E-03	3,04E-03	9,88E-04	7,60E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	9	1,61E-02	3,54E-02	6,49E-02	4,11E-02	1,39E-02	8,29E-03	4,30E-03	4,37E-03	1,67E-03	1,90E-04	7,60E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	6,65E-03	1,96E-02	2,68E-02	4,02E-02	3,38E-02	1,05E-02	5,51E-03	4,52E-03	3,38E-03	1,29E-03	4,18E-04	2,28E-04	3,80E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	5,21E-03	9,88E-03	2,25E-02	2,11E-02	2,98E-02	2,22E-02	8,93E-03	2,13E-03	1,94E-03	1,86E-03	1,18E-03	7,22E-04	2,66E-04	3,80E-05	1,14E-04	7,60E-05	0	0	0	0	0	0	0
	12	2,74E-03	3,08E-03	1,14E-02	9,31E-03	1,21E-02	1,57E-02	1,43E-02	6,61E-03	1,71E-03	1,56E-03	8,36E-04	1,56E-03	8,36E-04	5,32E-04	2,28E-04	7,60E-05	1,90E-04	7,60E-05	0	0	0	0	0
	13	1,33E-03	2,05E-03	2,97E-03	4,87E-03	3,35E-03	6,50E-03	7,38E-03	4,75E-03	3,92E-03	1,44E-03	6,46E-04	9,88E-04	1,90E-04	1,90E-04	4,56E-04	3,80E-05	3,80E-05	1,52E-04	7,60E-05	3,80E-05	7,60E-05	3,80E-05	3,80E-05
	14	8,36E-04	4,94E-04	5,70E-04	6,46E-04	7,22E-04	1,48E-03	1,29E-03	1,98E-03	1,79E-03	1,29E-03	3,42E-04	9,50E-04	3,04E-04	2,28E-04	1,52E-04	1,14E-04	1,52E-04	0	0	0	0	0	0
	15	7,60E-05	1,90E-04	2,66E-04	0	0	3,80E-05	1,90E-04	1,52E-04	5,70E-04	7,98E-04	4,94E-04	5,70E-04	3,04E-04	7,60E-05	7,60E-05	3,80E-05	3,80E-05	0	0	0	0	0	0
	16	3,80E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,60E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total		11%	22%	23%	15%	11%	7%	5%	3%	1%	1%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%

DIAGRAMA 1, DISPERSIÓN DE BIMEP

## • Modelo de la boya.

Es necesaria la ecuación del movimiento para un cuerpo rígido oscilante, planteable por medio de la segunda ley de Newton. Para un dispositivo OWC la fuerza total puede expresarse de la siguiente manera (Price 2009).

$$F_{total}(t) = f_{exc}(t) + f_r(t) + f_h(t) + f_{PTO}(t) + f_t(t) + f_{perd}(t) \rightarrow M \cdot \ddot{x}$$

### ECUACIÓN 10, SUMATORIO DE FUERZAS EN UN SISTEMA WEC.

Donde  $f_{exc}(t)$  es la fuerza debida a la excitación del oleaje,  $f_r(t)$  es la fuerza radiante de olas por parte de la boya,  $f_h(t)$  es la fuerza hidrostática del agua,  $f_{PTO}(t)$  es la fuerza del sistema de extracción de potencia,  $f_s(t)$  es la fuerza de restauración del ancla de la boya al suelo marino,  $f_{perd}(t)$  es la fuerza de pérdidas en el WEC,  $M$  es la masa y  $x(t)$  es la posición. Las fuerzas correspondientes a restauración del resorte y las pérdidas no pueden ser medidas, no han sido calculadas en el modelo, pero si son fuerzas apreciables y que influyen en el balance total.

Se procede a la explicación desarrollada de cada uno de los puntos que intervienen en este balance de fuerzas.

## Fuerza de excitación:

“La fuerza de excitación aplicada a un cuerpo rígido que oscila por el oleaje depende de la elevación de la ola incidente. La relación entre la elevación de la ola y la fuerza de excitación es no causal” (Falnes 1995).

Es la única fuerza de las representadas en la ecuación anterior que presenta términos no lineales.

$$F_{exc}(t) = \eta(t) \cdot \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\omega) \rightarrow F_{exc}(t) = \left[ \sum_{i=1}^N a_i \cdot \cos(\omega_i t + \phi_i) \right] \cdot \left[ \sum_{i=1}^N \Gamma_i(\omega) \right]$$

### ECUACIÓN 11

El término “ $\Gamma(\omega)$ ” es la parte no lineal de la ecuación número 11, corresponde con “la representación de la respuesta impulsiva de un sistema premonitorio (no causal) con memoria” (Price 2009) y el término  $\eta(t)$  es la amplitud del oleaje.

La no causalidad de un sistema de tipo lineal quiere decir que la entrada del sistema no es la causa de la salida existente. Realmente la salida puede ser causada por la entrada así como podría ser causada por una tormenta lejana. Además la ola puede impactar con el WEC antes de que la boya alcance el punto de referencia elegido, por lo que el sistema se podría adelantar al presente (Falnes 1995).

La fuerza de excitación en dominio frecuencial también puede ser calculada en función de la amplitud de la ola haciendo uso de “Br” en la expresión, valor de la resistencia de amortiguamiento.

$$|F_{exc}(\omega)| = \sqrt{\frac{2 \cdot g^3 \rho \cdot B_r(\omega)}{\omega^3}} \cdot |A|$$

**ECUACIÓN 12**

Sabiendo que el valor de omega ( $\omega$ ) se corresponde con la siguiente expresión donde “k” es la frecuencia espacial de la ola en radianes por metro (rad/m).

$$\omega^2 = g \cdot k$$

**ECUACIÓN 13**

Y el valor correspondiente a Br de omega corresponde a:

$$B_r(\omega) = \frac{k}{8J} \cdot |W(\omega)|^2$$

**ECUACIÓN 14**

Donde el término de “J” identifica el valor de la energía transportada por la ola  $W(\omega)$  es la fuerza de excitación para un oleaje regular.

$$J = \frac{\rho g}{4\omega} \cdot |A|^2$$

$$|W(\omega)| = \sqrt{\frac{2 \cdot g^3 \rho \cdot B_r(\omega)}{\omega^3}}$$

**ECUACIÓN 15 Y 16**

Finalmente como última aproximación se toma que el valor de la fuerza de excitación, se calcula en base a la amplitud y a la altura significativa.

$$F_{exc}(t) = H_s \cdot A \cdot v$$

## Fuerza de radiación cuerpo oscilante.

“La fuerza del sistema oscilante sobre el fluido causada por el movimiento forzado del cuerpo sobre el agua en calma se conoce como la fuerza de radiación” (Price 2009). La fuerza de radiación para un cuerpo rígido oscilante es asociada con la convolución entre velocidad del oscilador y coeficientes de radiación. Los coeficientes de radiación se obtienen de forma experimental por medio de ensayos hidrodinámicos.

La fuerza de radiación de un cuerpo sobre el agua será igual a la siguiente expresión:

$$F_{rad}(t) = A_{\infty}\ddot{x}(t) + \int_0^t K(t-\tau)\dot{x} \cdot d\tau$$

ECUACIÓN 17

En dicha expresión se toma la omega como infinita ( $\omega \rightarrow \infty$ ) debido a la consideración de que se añade masa adicional constantemente al sistema (Count y Jefferys 1980). La convolución integral del dominio de la frecuencia (Fossen y Perez 2007) es tal que:

$$R = \int_0^t K(t-\tau)\dot{x} \cdot d\tau$$

ECUACIÓN 18

Simplificando en funciones de transferencia para poder resolver el espacio de estados, queda como:

$$\dot{X}_r = A_r X_r + B_r \dot{x}$$

$$R = C_r X_r + D \dot{x}$$

ECUACIÓN 19 Y 20,

## Fuerza hidrostática

Según el principio de Arquímedes un fluido ejerce sobre un cuerpo sumergido una fuerza igual al peso del fluido desplazado. Un cuerpo (con peso  $mg$ ) se encuentra en equilibrio cuando es contrarrestado por el peso del fluido desplazado (con peso  $\rho g v$ , o  $mg$  del fluido).

$$F_h(t) = K_h \cdot x(t) = \rho g S_b x(t)$$

ECUACIÓN 21, PRIMERA PARTE ( $K_h \cdot x(t)$ ) SÓLO ASUMIBLE PARA PEQUEÑOS DESPLAZAMIENTOS FUERA DE LA ZONA DE EQUILIBRIO.

La constante  $S_b$  es el coeficiente de rigidez hidrostática del cuerpo y es igual a la superficie de contacto en sentido vertical.

## Fuerza del sistema de extracción de potencia

Es la fuerza que se puede obtener del sistema, siempre en sentido contrario al movimiento de la boya, como el dispositivo está formada por dos cuerpos móviles entre sí, nunca se puede conocer el movimiento absoluto producido, estudiando siempre el movimiento relativo entre ambas partes.

$$F_{PTO}(t) = \Delta p S \rightarrow \Delta p = p_{in} - p_{at} = p^* p_{at}$$

### ECUACIÓN 22

Realmente es la fuerza más interesante a la hora de dimensionar el sistema, la turbina y la energía extraíble.

## Dinámica de la boya

El cálculo del movimiento de la boya se describe por medio de dos cuerpos, ambos representados en el esquema inferior, a la hora de realizar las ecuaciones relacionadas con las fuerzas ejercida en dicho movimiento es necesario describir tanto la fuerza que ejerce un cuerpo sobre otro como el cuerpo sobre sí mismo.



$$\begin{aligned} (m_1 + A_{\infty,11})\ddot{x}_1(t) + A_{\infty,12}\ddot{x}_2 \\ = F_{exc,1}(t) - R_{11} - R_{12} - \rho_w g S_1 x_1(t) \\ + \Delta p S_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_{\infty,21}\ddot{x}_1 + (m_2 + A_{\infty,22})\ddot{x}_2(t) \\ = F_{exc,2}(t) - R_{22} - R_{21} - \rho_w g S_2 x_2(t) \\ - \Delta p S_2 \end{aligned}$$

### ECUACIÓN 23 Y 24

ILUSTRACIÓN 49, ESTRUCTURA DE  
UNA BOYA UTILIZADA PARA OWC  
(CHIANG C. MEY)

Simplificando en espacio de estados para el cálculo obtenemos que los valores de la función son :

$$X = (\dot{x}_1 \dot{x}_2 x_1 x_2 | p^* \Omega | Rad)^T ;$$

$$U = (F_{exc,1} F_{exc,2} , T_g)^T ;$$

$$Y = (p^* , \eta , \dot{m}_t , T_t)^T ;$$

**ECUACIÓN 25, 26 Y 27,**

Finalmente expresando el siguiente espacio de estados.

$$\dot{X}_r = A_r X_r + B_r \dot{x}$$

$$R = C_r X_r + D_r \dot{x}$$

**ECUACIÓN 28 Y 29**

Donde cada una de las diferentes matrices son expresadas como:

$$A = \begin{pmatrix} G_1^{-1} G_2 \\ G_3 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} G_1^{-1} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{4(1+m) \times 2} & 0_{4(1+m) \times 1} \end{pmatrix}$$

$$C = (I_{4 \times 4} \quad 0_{4 \times 4m})$$

$$D = (0_{4 \times 3})$$

**ECUACIÓN 30, 31, 32 Y 33,**

Donde los parámetros internos de las mismas son:

$$G_1 = \begin{pmatrix} M_1 & A_{\infty,12} \\ A_{\infty,21} & M_2 \end{pmatrix}$$

$$G_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -K_1 & 0 & p_{at} S_2 & 0 & -C_{r,11} & -C_{r,12} & 0_{1 \times m} & 0_{1 \times m} \\ 0 & 0 & 0 & -K_2 & -p_{at} S_2 & 0 & 0_{1 \times m} & 0_{1 \times m} & -C_{r,21} & -C_{r,22} \end{pmatrix}$$

$$G_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1xm} & 0_{1xm} & 0_{1xm} & 0_{1xm} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0_{1xm} & 0_{1xm} & 0_{1xm} & 0_{1xm} \\ B_{r,11} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & A_{r,11} & 0_{mxm} & 0_{mxm} & 0_{mxm} \\ 0_{mx1} & B_{r,12} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mxm} & A_{r,12} & 0_{mxm} & 0_{mxm} \\ B_{r,21} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mxm} & 0_{mxm} & A_{r,21} & 0_{mxm} \\ 0_{mx1} & B_{r,22} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mx1} & 0_{mxm} & 0_{mxm} & 0_{mxm} & A_{r,22} \end{pmatrix}$$

ECUACIÓN 34, 35 Y 36,

## • Modelado de la turbina.

Tras el modelado de la dinámica de una boya OWC se debe de obtener la energía extraíble del sistema, para ello se ha de hacer una representación matemática de la turbina y del generador conectado a la misma. Se conoce que en los sistemas WEC hay diferentes formas de extracción de la energía de la ola.

En sistemas OWC el método de extracción se basa en la utilización de turbinas de aire, en la selección de la turbina de aire dentro de todos los tipos existentes, guardan especial interés las que presentan auto-rectificador, de tal forma que el flujo alterno del aire, se convierte en una rotación unidireccional. También es posible hacer uso de turbinas sin auto-rectificador equipando el sistema, con válvulas, que obligan a que el aire atraviese la turbina que se mueva siempre en la misma dirección, que si bien esta opción es más costosa y compleja. Dichas válvulas se podrían instalar, si se hace un control del latching, como se explicará posteriormente.

### Tipos de turbinas con auto-rectificador en sistemas OWC:

- **Turbina Wells**, presentando la ventaja de que la tecnología empleada es simple y además es la que más ha sido estudiada en este tipo de sistemas.
- **Turbina impulso**, presentando las ventajas de buenas características en el arranque, baja velocidad en su operación.
- **Turbina bi-radial**, amplio rango de coeficientes de flujo para un buen nivel de rendimiento, y rendimientos superiores a las anteriores como se puede ver en la siguiente figura. Será la empleada en el presente trabajo.

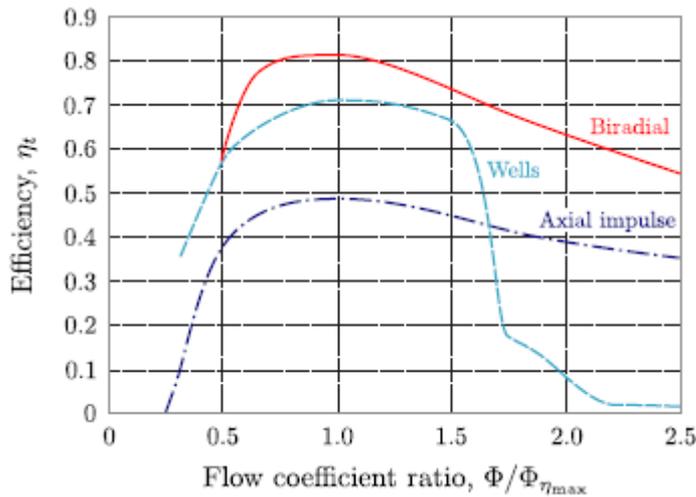


ILUSTRACIÓN 50, (F.-X. Faÿ, J.C.C. Henriques, M. Marcos, 2014)

Tras el modelado de la dinámica de una boya OWC se debe de obtener la energía extraíble del sistema, para ello se ha de hacer una representación matemática de la turbina y del generador conectado con la misma. Las turbinas utilizadas son turbina bi-radiales, tratando de extraer la energía cinética disponible del aire sin cambios bruscos en su velocidad de rotación; esto se refleja en una transmisión de un movimiento rotacional uniforme representado en potencia mecánica al eje del generador. (Pinilla)

En la modelación de las turbinas aparecen los siguientes adimensionales:

○ Adimensional de altura de presión:  $\Psi = \frac{p_{at} p^*}{\rho_{at} \Omega^2 d^2}$

ECUACIÓN 37

○ Adimensional de flujo de masa:  $\Phi = \frac{\dot{m}_t}{\rho_{at} \Omega d^3}$

ECUACIÓN 38

○ Adimensional de potencia:  $\Pi = \frac{P_t}{\rho_{at} \Omega d^3}$

ECUACIÓN 39

○ Rendimiento:  $\eta = \frac{P_t}{p_{at} p^* (\dot{m}_t / \rho)}$

ECUACIÓN 40

El trabajo obtenido por la turbina se puede estimar desde el análisis de los adimensionales obteniendo la siguiente expresión:

$$W_{turbina} = C_T \cdot \rho \cdot \Omega^3 \cdot h \cdot r_f^4 (\phi^2 + 1)$$

ECUACIÓN 41

El rendimiento se calcula leyendo las curvas de la turbina. Para una presión y una velocidad de giro en un instante, se puede obtener el flujo y la eficiencia.

Donde  $W$  es la potencia extraída por la turbina,  $C_T$  es el coeficiente adimensional de par (expresión posterior),  $\rho$  la densidad,  $h$  es la altura del flujo,  $\Omega$  la velocidad de rotación y  $r$  es el radio medio de la turbina. (Pereiras, El, & Montoya, 2010)

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2} \cdot \rho (v_R^2 + u_R^2) \cdot A_R \cdot r_R}$$

#### ECUACIÓN 42

Donde en la ecuación anterior los parámetros se corresponden con:  $T$  es el par mecánico aportado por la turbina,  $v_R$  es la velocidad radial,  $u_R$  la velocidad circunferencial,  $A_R$  es el área media proporcionada por el radio medio.

Pero como se ve anteriormente la fuerza del sistema de extracción de potencia se corresponde con la Pto, y con dicha expresión se puede obtener la potencia extraíble del sistema:

$$W_{turbina} = F_{PTO}(t) \cdot \eta \cdot Q_{Turbina} \rightarrow W_{turbina} = p^* \cdot p_{at} \cdot \eta \cdot Q_{Turbina} = P_{neumática} \cdot \eta$$

#### ECUACIÓN 43

## • Modelo del generador

Un sistema eléctrico convierte la energía mecánica en el eje, en energía eléctrica. La energía eléctrica se disipa sobre una carga. En consecuencia, el sistema eléctrico está aislado, la frecuencia y la magnitud del voltaje pueden ser variables. Estas especificaciones implican mayores libertades en el sistema de control del generador de turbina, permitiendo una amplia gama de velocidades de trabajo. De este modo, la rigidez que implica la conexión a la red (por ejemplo, una estricta frecuencia y tensión para alimentar a la red) se evita. (Pereiras et al., 2010). En este proyecto se hará uso de un generador asíncrono (de jaula de ardilla)

## Sistema de control

Se conoce que el punto de control óptimo para la obtención de la máxima potencia de la ola se encuentra en la condición de resonancia entre boya y ola, cuando ambas frecuencias naturales coinciden. En la práctica es complicado que el sistema se encuentre en dicho punto, por lo que es necesario la realización de una estrategia competitiva de control. (Robles & Faÿ, 2016)

El control, en sistemas OWC se puede realizar en diferentes puntos del sistema y de diversas formas. Explicación de posibles vías de control:

## • Control del par

Realizando un control entre la diferencia entre el par producido por la turbina y el presente por el generador. Para la modelación del sistema de control hace falta resolver la ecuación de la dinámica conjunta turbina generador. (Pereiras et al., 2010)

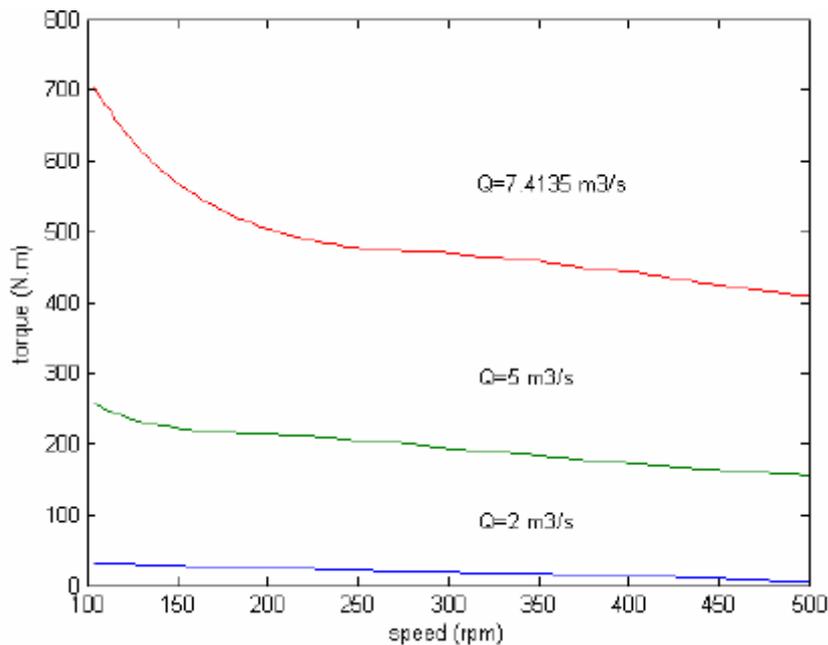
$$T_t - T_g = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$$

**ECUACIÓN 44**

Relacionando la resta del par de la turbina ( $T_t$ ) y del sistema eléctrico ( $T_g$ ) con la inercia del rotor ( $J$ ) y con la velocidad del eje. Se calcula el generador de acuerdo con la velocidad de rotación y la carga eléctrica conectada.

Para la modelación también es necesario un valor del caudal de flujo de aire específico en la turbina, necesitando valores de la carga eléctrica y de la excitación del generador para trabajar de manera estable. Si el sistema eléctrico no se ajusta a la energía mecánica del flujo no será extraída, pero si se convertirá en energía cinética. Eso conduce a un comportamiento inestable caracterizado por una velocidad de arranque. (Pereiras et al., 2010)

En la siguiente gráficas extraídas de “*Conception of a Radial Impulse Turbine for an Oscillating Water Column (OWC)*” (B. Pereiras; D. Montoya; F. Castro)” se relaciona el caudal de aire con el par obtenido así como la velocidad del rotor, y posteriormente con respecto a la potencia.



**ILUSTRACIÓN 51, CURVAS PAR-VELOCIDAD.** (Pereiras Et Al., 2010)

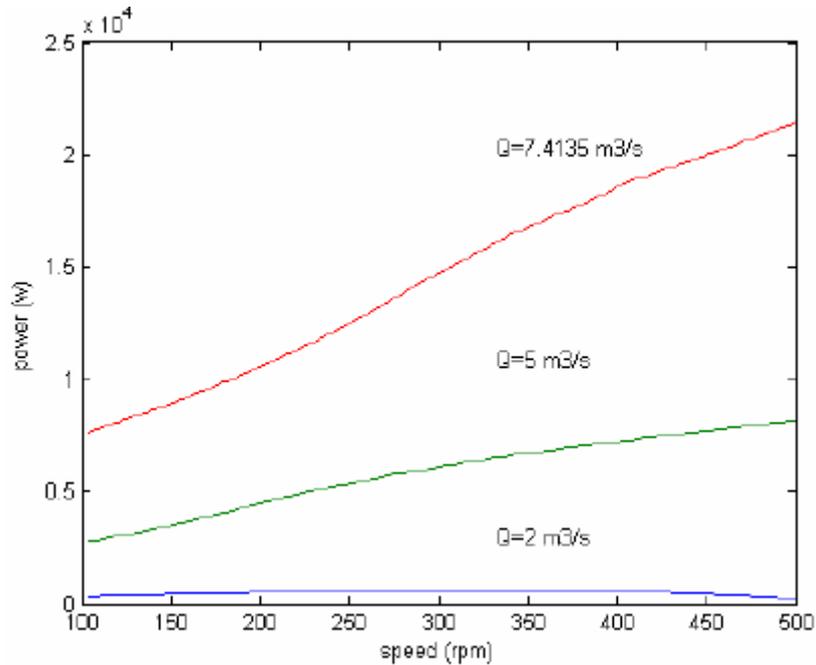


ILUSTRACIÓN 52, CURVAS POTENCIA-VELOCIDAD.(Pereiras Et Al., 2010)

### • Control del enclavamiento “Latching”:

Es un control realizado sobre un grado de libertad, realizándose sobre la apertura y cierre de las válvulas que permiten el paso del aire a la turbina, conocidas como HSSV (High Speed Stop Valve) mostrada su localización en la turbina bi-radial en la siguiente imagen; en el caso de olas de mar irregulares, caso general, hay que realizar una predicción de la fuerza de excitación con la que llegarían al sistema para poder calcular la fuerza real. Al ser un control por retención, necesariamente será sub-óptima (conociendo que el control distará del punto óptimo por la imposibilidad de alcanzarlo, pero tratando en todo momento de ser lo más cercano). (Robles & Faÿ, 2016)

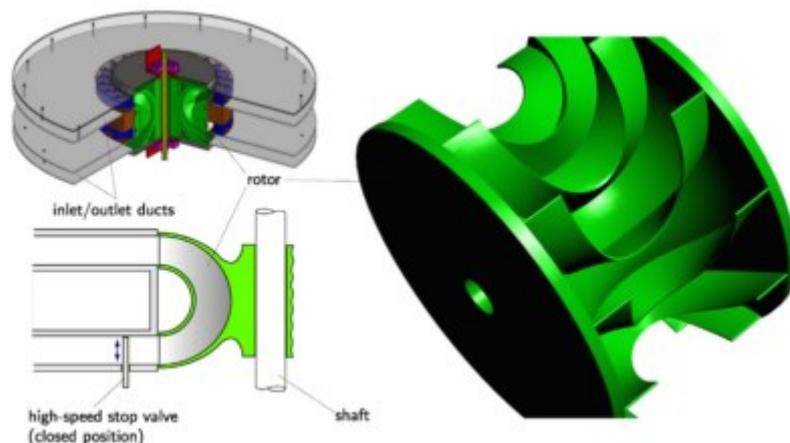


ILUSTRACIÓN 53, TURBINA BI-RADIAL Y HSSV. (Robles & Faÿ, 2016)

En la siguiente imagen se muestra la velocidad de la boya con respecto a la ola en las diferentes situaciones:

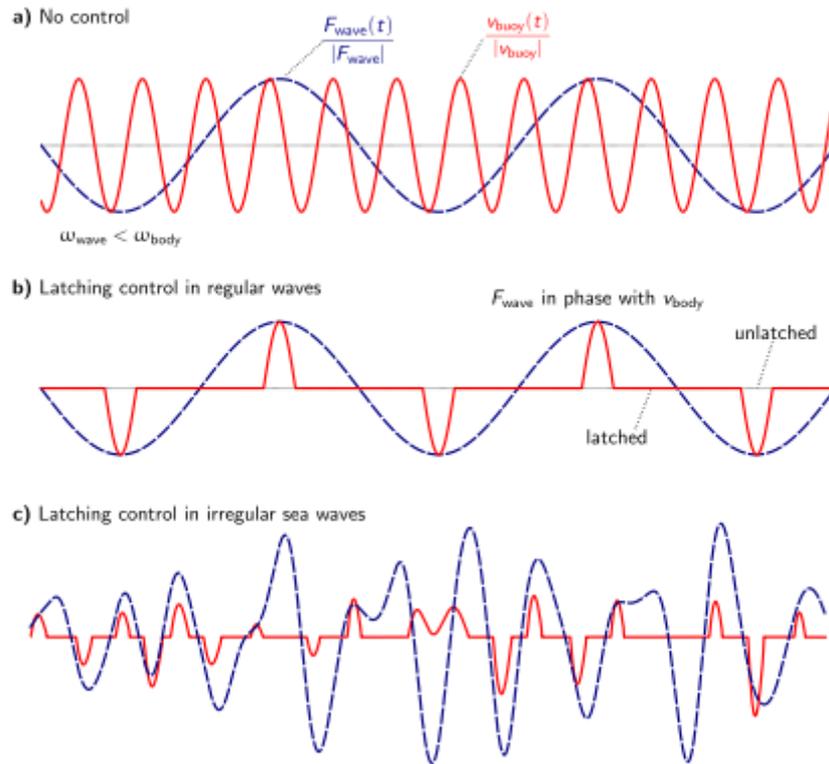


ILUSTRACIÓN 54, (Robles & Faÿ, 2016)

El control se basa en la apertura/cierre instantáneos de la HSSV para maximizar la potencia extraída de la turbina.

$$C(T, x, u) = T^{-1} \cdot e_t(T),$$

ECUACIÓN 45

Considerando T como el periodo de apertura cierre de HSSV y C (T,x, u) es una expresión asociada al estado final.

## Referencia Anexo I

F.-X. Faÿ, J.C.C. Henriques, M. Marcos, E. R. (2014). Control strategies for oscillating water column wave energy converters. *Underwater Technology*, 32(1), 3–13. <https://doi.org/10.3723/ut.32.003>

Pereiras, B., El, D., & Montoya, A. (2010). Conception of a Radial Impulse Turbine for an Oscillating Water Column ( OWC ) Conception of a Radial Impulse Turbine for an Oscillating Water Column ( OWC ), (April 2016).

Pinilla, A. E. (n.d.). Generación de Energía Eléctrica a través de una Turbina Wells para dispositivos portátiles .

Robles, E., & Faÿ, F. (2016). Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter, 90, 229–241. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.12.065>

Têtu, A. (2016). Power Take-Off Systems for WECs, 7, 1–17.



# Anexo II: Código Matlab para el desarrollo del programa de disposición dispositivos.

En este anexo se adjuntan las partes del código más relevantes para la realización del trabajo, habiendo algunas partes de bajo interés no añadidas.

## a) Main

```
%% Simulación parque de boyas con los diferentes estados de mar.
% Autor: Carlos Francisco Sánchez con colaboración de
% Axier Ugartemendia y François-Xavier Faÿ.

% Condiciones iniciales:
clear data;
clear all;
clc;
%Se borran datos anteriores.

%Datos generales.
Buoys=25; % Número de boyas.
Paralelo=1; % Número de boyas en paralelo. Con 1 se indica que no hay boyas
en paralelo.
%Te=9; % Periodo entre olas.
Incidence_Angle=-45; % Ángulo de incidencia de la ola.
Angbo=-45; % Ángulo de posicionamiento de las boyas.
i=1; % Utilizado en el caso de realizar un trabajo iterativo.
Tiemposim=700; %Se selecciona el tiempo que queremos simular cada boya
ss=1; %Se selecciona el estado de mar a utilizar.
mpo=357.95 ; %Se selecciona distancia primera última boya.
[Array_X_Y] = xyidoneodifangless(Buoys,Angbo, mpo) %Función que genera las
posiciones de las boyas en el plano.

%while ss<=20 %Para iterar con los estados de mar.
Hs_vect = [0.89 1.48 1.49 1.3 1.32 1.5 2.16 2 2 2 2.72 2.9 2.5 2.5 2.5 3.39 3
3.19 3 3.73]; %Vector alturas de ola 20 estados de mar.
Te_vect = [10.51 7.36 9.44 12 13.39 11 11 12 13 14 7.49 9.53 12 13 14 11 12
13 14.1 12.19]; %Vector periodo de ola 20 estados de mar.
Hs=Hs_vect(ss)
Te=Te_vect(ss)
n_waves = 100; %Numero de olas
smooth_time = 40.0; %Rampa temporal
[Array_Desfase,Array_Dist, Arrayoff] = cBIMEPangles( Te, Incidence_Angle
,Array_X_Y, Tiemposim) %Función que calcula la distancias entre boyas, el
tiempo en que se han de activar y desactivar.

%%Se cargan los parámetros necesarios para el modelo simulink
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

p_at = 101325.0;           % Pa, Kg/m*s^2
gamma = 1.4;              % -
d_0 = 1.5;                % m diámetro boya
h_0 = 5.0;                % m altura boya
V_0 = pi * d_0^2 / 4.0 * h_0; % m^3 volumen boya
rho_w = 1025.0;           % kg/m^3 densidad boya(nose)
rho_at = 1.2041;          % kg/m^3 densidad aire
g98 = 9.8;                % m/s^2 aceleración gravedad
I = 200.0;                % kg m^2 momento de inercia
kappa_0 = 0.5 * I * 30.0^2; % kg m^2/s^2 Energía cinética Inicial con una
velocidad de 30 m/s
Pg_max = 600E3;           % W potencia máxima extraible

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
c_at2 = gamma * p_at / rho_at; % Speed on sound under atmospheric conditions
(Kg/m*s^2)/kg/m^3 =m/s2
GM1_G = ( gamma - 1.0 ) / gamma;
p_star2psi = p_at / ( rho_at * d_0^2 ); % Se usa en el cálculo del PSI
d3_0 = d_0^3;

%Coeficientes leyes de control
a = 0.01940;
b = 3.46732;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load 'BuoyData/SS_77.mat';
load 'BuoyData/SS_78.mat';
load 'BuoyData/SS_87.mat';
load 'BuoyData/SS_88.mat';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
[ r, c ] = size( SS_77.Ass ); %Toma r el número de filas y c el número de
columnas
[ r78, c78 ] = size( SS_78.Ass );
[ r87, c87 ] = size( SS_87.Ass );
[ r88, c88 ] = size( SS_88.Ass );

assert( r == r78 && r == r87 && r == r88 );%Genera error cuando las
condiciones de que todas las r (filas) sean iguales
sizes = simsizes; %Se generan funciones con el número de estados continuos
discretos, que se indican a continuación.

sizes.NumContStates = 6 + 4*r;
sizes.NumDiscStates = 0;
sizes.NumOutputs = 5;
sizes.NumInputs = 3;
sizes.DirFeedthrough = 1;
sizes.NumSampleTimes = 1;

%data.sizes = sizes;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Z2x1 = zeros( 2, 1 );
Zpx1 = zeros( r, 1 );
Z1xp = zeros( 1, r );
Zpxp = zeros( r, r );

I6x6 = eye( 6 );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A11r = SS_77.Ass;
A12r = SS_78.Ass;
A21r = SS_87.Ass;

```

```

A22r = SS_88.Ass;

B11r = SS_77.Bss;
B12r = SS_78.Bss;
B21r = SS_87.Bss;
B22r = SS_88.Bss;

C11r = SS_77.Css;
C12r = SS_78.Css;
C21r = SS_87.Css;
C22r = SS_88.Css;

Ai11 = SS_77.Ainf;
Ai12 = SS_78.Ainf;
Ai21 = SS_87.Ainf;
Ai22 = SS_88.Ainf;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
M1 = SS_77.m1 + Ai11; %masa del cuerpo 1
M2 = SS_88.m2 + Ai22; %masa del cuerpo 2

K1 = SS_77.rgS1; %
K2 = SS_88.rgS2; %exponente politrópico

S2 = K2 / ( rho_w * g98 );
Sp2 = p_at * S2;

if n_waves > 1
    [ A1_s, w1_s, f1_s ] = PM_UnitaryForce( Te, n_waves, SS_77.w, SS_77.F,
SS_77.phi );
    [ A2_s, w2_s, f2_s ] = PM_UnitaryForce( Te, n_waves, SS_88.w, SS_88.F,
SS_88.phi );
else
    [ A1_s, w1_s, f1_s ] = Wave_UnitaryForce( Te, SS_77.w, SS_77.F, SS_77.phi
);
    [ A2_s, w2_s, f2_s ] = Wave_UnitaryForce( Te, SS_88.w, SS_88.F, SS_88.phi
);
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mu = 1.0 / ( M1 * M2 - Ai12 * Ai21 );

G1I = mu * [ M2, -Ai12;
            -Ai21, M1 ];

G2 = [ 0.0, 0.0, -K1, 0.0, Sp2, 0.0;
       0.0, 0.0, 0.0, -K2, -Sp2, 0.0];

G3 = [ 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
       0.0, 1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
       0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0;
       0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0];

G4 = blkdiag( I6x6 );

A_s = [ G1I*G2; G3 ];

B_s = [ G1I, zeros(2,3);...
        zeros(2,2), -G1I, Z2x1;...
        zeros(2,5) ];

```

```

C_s = [ G4 ];

D_s = zeros(1,5);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
x0(1) = 0.0;
x0(2) = 0.0;

x0(3) = 0.0;
x0(4) = 0.0;

x0(5) = 0.0;
x0(6) = kappa_0;

% Se utilizan en el calculo de las características de la turbina
psi_tbl = [ 0.0000000, 0.1334170, 0.1424258, 0.1923021, ...
            0.3682013, 0.6054627, 0.9131146, 1.2731740, ...
            2.1735695, 3.2598935, 4.5262669, 7.7932272 ];

eta_tbl = [ 0.0000000, 0.5700820, 0.6444267, 0.7809905, ...
            0.8101185, 0.7715908, 0.6971182, 0.6296793, ...
            0.5186951, 0.4499433, 0.4006613, 0.3169260 ];

phi_tbl = [ 0.0000000, 0.0532761, 0.0568298, 0.0710365, ...
            0.1065549, 0.1420736, 0.1775946, 0.2131104, ...
            0.2841470, 0.3551846, 0.4262207, 0.5682959 ];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Parámetros de simulink cargados%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

while i<=1 %Número de puntos que se quieren investigar.
Matmin(1,i+1)=mpo; %Se usa primera fila de la matriz para indicar separación
primera-ultima boya.
Matmin(ss+1,1)=ss; %Se usa primera columna de la matriz para el estado de
mar.
sim 'SparBuoy_V07c.mdl'; % Simulación simulink de la potencia generada.
pot(i)=sum(Pgtotalcd1); %Se guarda la potencia generada en esta simulación.
sumderidis(i,1)=mpo;
sumderidis(i,2)=sum(abs(deridis1));
Matmin(ss+1,i+1)=sumderidis(i,2); %Se guarda la fluctuación potencia en el
estado de mar y separación indicados.
i=i+1;
figure (5)
[media] = myfuncd(Pgtotalcd1,Tiemposim); %Función que devuelve media en base
a tiempo de simulación.
end
%ss=ss+1;
%i=1
%end

```

## b) Xyidoneodifangless

```

function [matcon] = xyidoneodifangless(Buoys, Incidence_Anglea, mpo)
%% Configuración del parque.
syms x y a p
dist=25
matcon=zeros(Buoys,2);
figure (1)
hold on

Incidence_Rad=Incidence_Anglea*2*pi/360; % Ángulo de incidencia de la ola.

% Se van colocando las boyas iniciales como puntos en la %perpendicular
(concéntricos en el ángulo pasado como %Incidence_Anglea, que a su vez en el

```

```

main corresponde con Angbo. Con %este algoritmo se consigue que sean
concéntricos con el centro del %área de fondeo.

xpot=0-cos(Incidence_Rad)*(mpo/2);
ypot=0-sin(Incidence_Rad)*(mpo/2);
perpen= Incidence_Rad+pi/2; %Se genera la perpendicular al ángulo.
pend=tan(perpen); %Se genera la pendiente de la recta perpendicular.
for j=1:Buoyos

    % Array_X_Y(j,:)= [xpot,ypot]; % hold on
    xpot=xpot+cos(Incidence_Rad)*(mpo/Buoyos);
    ypot=xpot*tan(Incidence_Rad);
    y=ypot;
    x=xpot;
    a(j)=y-x*pend;

    x=[-181 120];
    y=x*pend+a(j) %Ecuación recta perpendicular.
%line(x,y,'Color','red')% Se generan líneas perpendiculares a las %boyas para
ver posibles ubicaciones.
%str={j};
%text(xpot,ypot,str);% Enumera las boyas
matcon(j,2-1)=xpot
matcon(j,2)=ypot
    plot(matcon(j,2-1),matcon(j,2),'b*');
end

%% Modificación de los puntos para que cumplan con el espaciado.
%Entre boyas consecutivas.
for j=1: 25-1

if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+1,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+1,2))^2)<dist
%Si el espaciado es menor que la distancia %seleccionada se ha de calcular la
distancia en la que se deben de %desfasar sobre la recta perpendicular.

solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(1+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+1,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);
matcon(j+1,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+1,1);
matcon(j+1,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+1,2);

else
end .
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la siguiente a la %posterior.
for j=1: 25-2
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+2,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+2,2))^2)<dist
solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(2+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+2,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);

matcon(j+2,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+2,1);
matcon(j+2,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+2,2);

else
end
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la boya dos veces %posterior.

for j=1: 25-3
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+3,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+3,2))^2)<dist

```

```

solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(3+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+3,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);

matcon(j+3,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+3,1);
matcon(j+3,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+3,2);

else
end
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la boya tres veces %posterior.
for j=1: 25-4
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+4,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+4,2))^2)<dist
solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(4+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+4,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);
matcon(j+4,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+4,1);
matcon(j+4,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+4,2);

else
end
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la boya cuatro veces
%posterior.
for j=1: 25-5
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+5,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+5,2))^2)<dist
solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(5+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+5,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);

matcon(j+5,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+5,1);
matcon(j+5,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+5,2);

else
end
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la boya cinco veces %posterior.
for j=1: 25-6
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+6,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+6,2))^2)<dist
solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(6+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+6,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);

matcon(j+6,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+6,1);
matcon(j+6,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+6,2);

else
end
end

%Se comprueba si cumple distancia la boya con la boya seis veces %posterior.
for j=1: 25-7
if sqrt((matcon(j,1)-matcon(j+7,1))^2+(matcon(j,2)-matcon(j+7,2))^2)<dist
solu=solve(sqrt((matcon(j,1)-matcon(7+j,1)-cos(perpen)*p)^2+(matcon(j,2)-
matcon(j+7,2)-sin(perpen)*p)^2)==dist);
matcon(j+7,1)=cos(perpen)*solu(2)+matcon(j+7,1);
matcon(j+7,2)=sin(perpen)*solu(2)+matcon(j+7,2);
else
end
end

for j=1:25
plot(matcon(j,1),matcon(j,2),'b*') %Se representan los puntos finales %donde
se ubican las boyas.

```

```
end
end
```

### c) cBIMEPangles

```
function [Array_Desfase,Array_Dist, Arrayoff] = cBIMEPangles( Te,
Incidence_Angle ,Array_X_Y, Tiemposim)
%% Con esta función calculamos el desfase frente a la configuración elegida.

Incidence_Rad=Incidence_Angle*2*pi/360; % Ángulo de incidencia de la ola.
r=15/2; % Radio de la boya

prim=[ (750/2)*cos(Incidence_Rad)+275-20, (750/2)*sin(Incidence_Rad)+275-20];
% Indica la referencia
%calcula distancia desde el origen hasta la primera boya.

Pend=tan(Incidence_Rad); % Pendiente de incidencia de la ola.
Pend2=tan(Incidence_Rad-(pi/2)); % Pendiente perpendicular (90°).
prim2=[ (prim(1,2)+(-Pend2)*prim(1,1))/(Pend-Pend2), (Pend*(prim(1,2)+(-
Pend2)*prim(1,1))/(Pend-Pend2)];
for n = 1:25 % Matriz de dos columnas, (numero boya, distancia con respecto
al cero).
    Array_Dist(n,1)=n;
    b(n)= Array_X_Y(n,2)+(-Pend2)*Array_X_Y(n,1);
    p(n,:)=[ b(n)/(Pend-Pend2), Pend*(b(n)/(Pend-Pend2))]; % Punto con respecto
al que se tomará la distancia.
    Array_Dist(n,2)=sqrt(((prim2(1,1)-p(n,1))^2)+(prim2(1,2)-p(n,2))^2);
end

Array_Dist=sortrows(Array_Dist,2); % Ordena las filas en una matriz sobre
%la base de los valores en la primera columna.

%% Calculo del tiempo en que tarda la ola en llegar hasta cada boya.

v=(9.8*Te)/(2*pi); % Velocidad de la ola [m/s]

for n = 1:25
    Array_Desfase(n,1)=Array_Dist(n,1); % Primera columna número de boya
    Array_Desfase(n,2)=Array_Dist(n,2)./v; % Segunda fila tiempo en el
% que llega la ola hasta la boya
end

refr=Array_Desfase(1,2); %Se genera la primera boya como referencia
%temporal.
for n = 1:25 %
    Array_Desfase(n,2)= Array_Desfase(n,2)- refr
end

Arrayoff=Array_Desfase(:,2)+Tiemposim %Se genera el tiempo de apagado %de
cada boya

%% Representar
figure(1); %Comando que permite crear una nueva figura.
tita = (0:0.01:2.01*pi);
x =r*cos(tita); % Representación de la boya.
y =r*sin(tita);
xf =(r+5)*cos(tita); % Representación del límite entre boya y boya .
yf =(r+5)*sin(tita);
hold on % Comando para graficar en las misma figura.
```

```

for i = 1:(length(Array_X_Y))
    str={i};
    plot(x+Array_X_Y(i,1),y+Array_X_Y(i,2),'-b'); % Dibujar boyas.
    plot(xf+Array_X_Y(i,1),yf+Array_X_Y(i,2),'-g'); % Dibujar los límites
entre boyas.
text (Array_X_Y(i,1), Array_X_Y(i,2),str); %Indicar el número de boya en la
figura.
end

title('Campo de boyas');xlabel('X Posición [m]');
ylabel('Y Posición [m]');
% Comando para títulos e índices.

% Superficie del campo de boyas.
R = 750/2; % Radio del círculo correspondiente al espacio disponible.
tita = (0:0.01:2.01*pi);
x = +R*cos(tita); % Centro del círculo (0,0).
y = +R*sin(tita);
hold on;
grid on;
plot(x,y, 'r--'); % Representación del círculo
end

```

## d) myfuncd

```

%% Representación de potencias y cálculo de la derivada de la potencia.
function [media] = myfuncd(Pgtotalcd1,Tiemposim)
pg(:)=Pgtotalcd1(1,1,:);% Se extrae de la matriz obtenida del simulink %la
parte correspondiente a la potencia.
tpg=(0:1000);% Vector correspondiente al tiempo con las dimensiones del pg.

%%
%tderi=(1:101); % Vector correspondiente al tiempo con las dimensiones %del
vector de deri, correspondiente a la derivada.
% figure(2); % Comando que permite crear una nueva figura.
% hold on;
% title('Fluctuación');xlabel('Time - [s]');ylabel('Potencia - [w]');
% deri=diff(pg); % Realiza el cálculo de la derivada de la potencia total.
% sumderi=sum(abs(deri)); % Realiza el cálculo de la variación de la
potencia,
%
%                               %valor que es devuelto al programa principal.
% %plot(tderi,dpg); % Representa la derivada de la potencia total en %función
del tiempo.
figure(2);
media=sum(abs(pg(:)))/Tiemposim; %Se hace la media de potencias con respecto
a los valores simulados
grid on; hold on;
plot(tpg,pg, 'LineWidth',2)% Representa la potencia total en función
% del tiempo

x1=0;    y1=media;
x2=1000; y2=media;
X=[x1 x2];
Y=[y1 y2];
line(X,Y, 'LineWidth',1) % Representa la potencia media.
grid on;

```

```
title('Potencia Total');xlabel('Tiempo - [s]');ylabel('Potencia - [w]');  
hold off  
end
```

# Anexo III: Tabla Estado de Mar BIMEP

<i>Estado de Mar</i>	<b>Altura Nominal [ m ]</b>	<b>Periodo [ s ]</b>	<b>Frecuencia*</b>
1	0,89	10,51	14,4
2	1,48	7,36	10,03
3	1,49	9,44	8,91
4	1,3	12	7,91
5	1,32	13,39	5,56
6	1,5	11	4,48
7	2,16	11	3,49
8	2	12	3,24
9	2	13	2,3
10	2	14	1,72
11	2,72	7,49	1,8
12	2,9	9,53	2,3
13	2,5	12	1,87
14	2,5	13	1,41
15	2,5	14	1,38
16	3,39	11	1,42
17	3	12	1,13
18	3,19	13	1,32
19	3	14,1	1,11
20	3,73	12,19	1,1

**TABLA 5, ESTADOS DE MAR, FUENTE: BIMEP.**



