

# Trabajo Fin de Grado

## Grado universitario en Ingeniería de la Energía

Dimensionamiento de una planta purificadora de tratamiento terciario de aguas residuales alimentada de energía undimotriz.

Autor: Andrés Luis Sevilla Jódar

Tutor: Maria de Lourdes García Rodríguez

**Dpto. De Ingeniería Energética**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Grado  
Grado universitario en Ingeniería de la Energía

# **Dimensionamiento de una planta purificadora de tratamiento terciario de aguas residuales alimentada de energía undimotriz.**

Autor:

Andrés Luis Sevilla Jódar

Tutor:

Maria de Lourdes García Rodríguez

Dpto. De Ingeniería Energética  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado: Dimensionamiento de una planta purificadora de tratamiento terciario de aguas residuales alimentada de energía undimotriz.

Autor: Andrés Luis Sevilla Jódar

Tutor: Maria de Lourdes García Rodríguez

El tribunal nombrado para juzgar el Trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2024

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

*Este trabajo y esta etapa formativa que con el cierro, no hubiera sido posible sin el apoyo incondicional de mis padres, de mi hermana Ana y prima Esperanza.*

*No puedo olvidarme de mis abuelos que he tenido la suerte de conocer y compartir mi vida con ellos, siendo un gran ejemplo de esfuerzo, sacrificio, trabajo y dedicación.*

*También recordar a mis amigos, que a lo largo de este viaje han sido un pilar de risas, buenos momentos que tan necesarios son.*

*Quisiera destacar también la labor de todo el profesorado que ha participado en la formación de toda esta etapa educativa.*

*Por supuesto agradecer a mi tutora Lourdes que ha estado siempre a mi disposición para cualquier duda y problema que me ha surgido a lo largo de este proyecto.*

*Andrés Luis Sevilla Jódar*

*Sevilla, 2024*



En este trabajo final de grado se presenta una posible solución a al consumo de energía eléctrica a través de fuentes de combustibles fosiles. Esta solución que planteamos es el uso de convertidores de energía undimotriz en energía eléctrica para ele autoconsumo de una instalación depuradora de aguacentrado solo en el consumos de la instalación de ósmosis inversa para satisfacer su producción de agua. También decir que nuestra instalación de ósmosis inversa se usará no para la desalación de agua, ya que, como expongo en los siguientes capítulos, al seleccionar la ubicación nos damos cuenta que nos interesa más que sea una instalación de tratamiento de aguas residuales.

Los cálculos energéticos de la producción de energía eléctrica se han realizado en todas las ubicaciones para tres convertidores del poryecto Reference Model Project, para los modelos RM3, RM5 y RM6. Luego en las ubicaciones con mayor producción de energía eléctrica se han realizado cálculos para escalarlos y que se adapte mejor a la zona.

Para la estimación de los consumo de la instalación de ósmosis inversa se ha usado el programa comercial de IMS Design de la empresa Hydranautics para poder realizar un prediseño de nuestra instalación.

Este estudio es un análisis energético para ver si se podría usar este tipo de convertidores para alimentar una instalación purificadora de agua de este estilo.



# Abstract

---

This Final Degree Project shows a possible solution to the consumption of electrical energy through fossil fuel sources. The solution that is proposed is the use of Wave Energy Converters (WEC) for the self-consumption of a water purification plant, focused only on the consumption of the reverse osmosis plant to satisfy its water production. Also it is important to specify that our reverse osmosis installation will be used not for water desalination, as we will see in the following chapters, when selecting the location we are more interested in it being a tertiary treatment of waste water.

The calculations of the electric energy production have been carried out at all locations for three converters of the Reference Model Project, for the RM3, RM5 and RM6 models. Then, in the locations with the highest energy production, we have made calculations to scale them up and make it better suited to this area already mentioned.

For the estimation of the consumption of the reverse osmosis installation, we have been used the commercial program of IMS Design of the company Hydranautics to make the calculation necessary to make a pre-design of our installation.

This study is an energy analysis to see if this type of converters could be used to power a water purifying installation of this kind.

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivos.</i>	1
1.2. <i>Estructura de la memoria.</i>	1
<b>2 Descripción de los WECs y obtención de la potencia producida</b>	<b>2</b>
2.1. <i>Tecnologías de aprovechamiento del potencial del mar</i>	2
2.2. <i>Método de obtención de datos.</i>	6
2.3. <i>Análisis de resultados</i>	7
<b>3 Tratamiento de agua mediante wecs</b>	<b>8</b>
3.1 <i>Sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa alimentados por WECs.</i>	8
3.2 <i>Obtención de agua ultrapura a partir de aguas de muy baja salinidad.</i>	11
3.3 <i>Otras aplicaciones de las membranas en el tratamiento de agua</i>	12
3.4. <i>Análisis de resultados</i>	13
<b>4 Cálculo energía.</b>	<b>14</b>
4.1 <i>Descripción de los equipos a estudiar.</i>	14
4.1.2 Modelo RM3	14
4.1.2 Modelo RM5	15
4.1.3 Modelo RM6	16
4.2 <i>Cálculo de la energía.</i>	17
4.2.1 Cabo de Gata.	18
4.2.2 Golfo de Cádiz	19
4.2.3 Gran Canaria.	21
4.2.4 Tenerife Sur	22
4.2.5 Bilbao-Vizcaya	23
4.2.6 Cabo de Peñas	24
4.2.7 Villano-Sisargas	26
4.2.8 Cabo Silleiro	27
4.3. <i>Análisis de resultados.</i>	28
<b>5 Selección de la Ubicación</b>	<b>29</b>
5.1 <i>Principio teórico del escalado</i>	29
5.2 <i>Escalados de los WECs estudiados</i>	29
5.3 <i>Análisis de resultados.</i>	32
<b>6 Prediseño instalación purificadora de agua</b>	<b>34</b>
6.1. <i>Diseño instalación.</i>	34
6.2. <i>Estimación de la producción de agua y energía</i>	43

6.2.1 Ejemplo de producción de agua en una población	44
6.3 <i>Análisis de resultados.</i>	45
<b>7 Conclusión</b>	<b>48</b>
<b>Referencias</b>	<b>49</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Características convertidores [18].	9
Tabla 2: Características convertidores [19].	10
Tabla 3: Resultados simulaciones.	11
Tabla 4: Escala de diferentes parámetros siguiendo la ley de escalamiento de Froude.	29
Tabla 5: Balance producción y demanda. Siendo el valor negativo de la tercera columna un déficit energético, por lo que habría que comprar energía.	44
Tabla 6: Doatación en función del tipo de actividad [32].	45
Tabla 7: Diferentes configuraciones en función del número de habitantes. Siendo $P_n$ la Potencia nominak del WEC, $P_{cons}$ la potencia consumida por la instalación de ósmosis inversa.	46

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Absorbedor puntual (Modelo Undigen W1) [2].	2
Figura 2: Atenuador puntual [3].	3
Figura 3: Terminador Wave dragon [4].	3
Figura 4: Esquema de columna de agua oscilante [5].	3
Figura 5: Absorbedor de efecto Arquímedes [6].	4
Figura 6: Absorbedor de cuerpo boyante con referencia fija [7].	4
Figura 7: Esquema Cuerpo boyante con referencia móvil [8].	4
Figura 8: Esquema convertidor por rebose [8].	5
Figura 9: Wave roller [9].	5
Figura 10: Modelo Penguin [10].	6
Figura 11: Puertos del estado, conjunto de puntos SIMAR (puntos verdes) y estaciones (puntos rojos) [13].	6
Figura 12: Datos descargados de Puertos del Estado.	7
Figura 13: Formato definitivo de los datos de Puerto del Estado.	7
Figura 14: configuración instalación [20].	10
Figura 15: Configuración experimento [21].	11
Figura 16: Características WECs a estudiar en el programa SAM.	14
Figura 17: Modelo RM3 [25].	15
Figura 18: Tabla de potencia para RM3 obtenida del SAM.	15
Figura 19: Modelo RM5 [26].	16
Figura 20: Tabla de potencia para RM5 obtenida del SAM.	16
Figura 21: Modelo RM6 [27].	17
Figura 22: Tabla de potencia para RM6 obtenida del SAM.	17
Figura 23: Recurso marino en Cabo de Gata.	18
Figura 24: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Cabo de Gata.	19
Figura 25: Recurso marino Golfo de Cádiz.	20
Figura 26: Cnjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Golfo de Cádiz.	20
Figura 27: Recurso marino Gran Canaria.	21
Figura 28: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Gran Canaria.	21
Figura 29: Recurso marino Tenerife Sur:	22
Figura 30: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Tenerife Sur.	23
Figura 31: Recurso marino Bilbao-Vizcaya.	23

Figura 32: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Bilbao-Vizcaya.	24
Figura 33: Recurso marino Cabo de Peñas.	25
Figura 34: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Cabo de Peñas.	25
Figura 35: Recurso marino Villano-Sisargas.	26
Figura 36: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Villano Sisargas.	26
Figura 37: Recurso marino Cabo Silleiro.	27
Figura 38: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnología para la ubicación Cabo Silleiro.	27
Figura 39: Ley de escalamiento de Froude.	29
Figura 40: Energía producida a diferentes escalas de los tres convertidores en la ubicación Villano-Sisargas.	30
Figura 41: Energía producida entre la potencia nominal a diferentes escalas en la ubicación de Villano-Sisargas.	31
Figura 42: Energía producida a diferentes escalas de los tres convertidores en la ubicación Cabo Silleiro.	31
Figura 43: Energía producida entre la potencia nominal a diferentes escalas en la ubicación de Cabo Silleiro.	32
Figura 44: Esquema de un tubo de presión [28].	34
Figura 45: Composición del agua a tratar ya introducida en el programa IMS Design.	34
Figura 46: Esquema de nuestro sistema en IMS Design.	35
Figura 47 Opciones de membranas para este caso del programa IMS Design.	35
Figura 48: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 15°C.	36
Figura 49: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C.	36
Figura 50: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado.	37
Figura 51: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado en función del consumo específico, siendo de izquierda a derecha simulación con recuperación del 80%, 81% y 82% a 15°C.	37
Figura 52: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado en función del consumo específico, siendo de izquierda a derecha simulación con recuperación del 80%, 81% y 82% a 22°C.	37
Figura 53: Resultado de la simulación, tabla de arriba a 15°C y tabla de abajo a 22°C.	38
Figura 54: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 15°C para el segundo caso.	38
Figura 55: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C para el segundo caso.	39
Figura 56: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del segundo caso para 15°C.	39
Figura 57: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del segundo caso para 22°C.	39
Figura 58: Comparativa consumo específico para distintos tanto por ciento de recuperación para el caso dos a 15°C y 22°C.	40
Figura 59: Resultado de la simulación, tabla de arriba a 15°C y tabla de abajo a 22°C para el segundo caso.	40
Figura 60: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 15°C para el tercer caso.	41
Figura 61: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C para el tercer caso.	41

- Figura 62: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del tercer caso para 15°C. 41
- Figura 63: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del tercer caso para 22°C. 42
- Figura 64: Comparativa consumo específico para distintos tanto por ciento de recuperación para el caso tres a 15°C y 22°C. 42
- Figura 65: Resultado de la simulación, tabla de arriba a 15°C y tabla de abajo a 22°C para el tercer caso. 43
- Figura 66: Distancia Villano-Sisargas y Carballo extraido de Google Maps. 44



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Este capítulo trata de explicar los objetivos por los cuales se ha llevado a cabo este Trabajo Fin de Grado. Además explicaremos la estructura de la memoria de este documento para poder así entenderlo más fácilmente.

## 1.1. Objetivos.

El objetivo principal de este trabajo es dimensionar una planta de tratamiento de agua sostenible. Se pretende lograr que podamos hacer que la energía eléctrica utilizada en procesos de desalación, o en el caso de este trabajo una instalación purificadora de agua a partir de aguas residuales pretratadas, sea renovable. Se analiza en este trabajo el tratamiento terciario de las aguas residuales mediante ósmosis inversa mediante una fuente de energía renovable, la energía de las olas.

Para poder llevar a cabo el objetivo principal, primero deberemos seleccionar unos convertidores de energía undimotriz. Luego, para calcular la energía producida deberemos buscar datos ambientales de diferentes ubicaciones de España. Por tanto otro objetivo de este trabajo es encontrar una zona en España que tenga condiciones ambientales para que pueda funcionar de manera correcta los convertidores o en caso de que las condiciones ambientales no sean las óptimas, mediante el escalado de los convertidores hacer que adapte a alguna zona con mejores condiciones ambientales.

También deberemos hacer el prediseño de la instalación purificadora de agua salobre, brackish water (BW). Este prediseño lo debemos hacer lo más eficiente energéticamente. Así que otro objetivo es probar diferentes configuraciones para ver cual es la más eficiente energéticamente. Así con esto podemos estimar los consumos de una instalación que purifique el agua con este sistema de ósmosis inversa.

Una vez con la energía producida y el consumo de nuestra instalación purificadora debemos unir el consumo con la producción energética y estima cuantos convertidores necesitamos para suministrar la energía suficiente a nuestra instalación o viceversa ver cuantas instalaciones podemos alimentar con un solo convertidor.

Para concluir en este trabajo hemos realizado análisis energéticos para ver la viabilidad de poder alimentar este tipo de instalaciones de energía eléctrica producida por la energía de las olas.

## 1.2. Estructura de la memoria.

La memoria se encuentra formada por siete capítulos, siendo el primero en el que nos encontramos siendo la introducción donde hemos hecho una breve explicación de los objetivos y ahora estamos explicando la estructura de nuestro trabajo. El segundo consiste en una explicación de la tecnología que convierte la energía de las olas en energía eléctrica y como hemos obtenido los datos ambientales. El tercer capítulo consiste en una revisión bibliográfica de diferentes temas relacionados con el tratamiento de agua mediante ósmosis inversa. El cuarto consiste en todos los cálculos energéticos en diferentes ubicaciones de España y se presenta las tecnologías de los WEC a estudiar en este trabajo. En el quinto capítulo es el capítulo en el que seleccionamos la ubicación donde se va a realizar el estudio entre todas las estudiadas. El sexto capítulo consiste en el prediseño de la instalación purificadora de agua y el acoplamiento de la producción con la demanda. Y por último el capítulo siete es el capítulo en el cual se presentan las conclusiones.

# 2 DESCRIPCIÓN DE LOS WECs Y OBTENCIÓN DE LA POTENCIA PRODUCIDA

---

## 2.1. Tecnologías de aprovechamiento del potencial del mar

La energía undimotriz es aquella que se extrae del oleaje. Las olas se forman por la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, una parte sirve para un calentamiento desigual de la misma. El suceso provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar [1].

En el mar hay varios tipos de oscilaciones, la manera que se distinguen las olas es que son oscilaciones de periodo entre 3 y 30 segundos.

Los equipos que se usan para convertir esta energía se pueden clasificar según la orientación al frente de ola y también en función de su principio de captación.

Según su orientación respecto al frente de ola:

- Absorbedores puntuales: consiste en estructuras flotantes pequeñas, suelen ser cilíndricas y por esto van a poder generar energía independientemente de por dónde incida la ola [11]. Una empresa española se dedica a fabricar convertidores de este tipo es Wedge Global que dispone de varios modelos, como el que se observa en la Figura 1.



*Figura 1. Absorbedor puntual (Modelo Undigen W1) [2].*

- Atenuadores: se colocan paralelos a la dirección de las olas, suelen ser estructuras largas que van extrayendo energía de modo progresivo [11]. En este caso, se disponen segmentos flotantes interconectados perpendicularmente a las olas que llegan. El oleaje produce un movimiento de flexión que activa las bombas hidráulicas que generan la electricidad. Un modelo comercial de esta tecnología es Pelamis Wave Power. En la Figura 2 se observa un atenuador puntual.



*Figura 2: Atenuador puntual [3].*

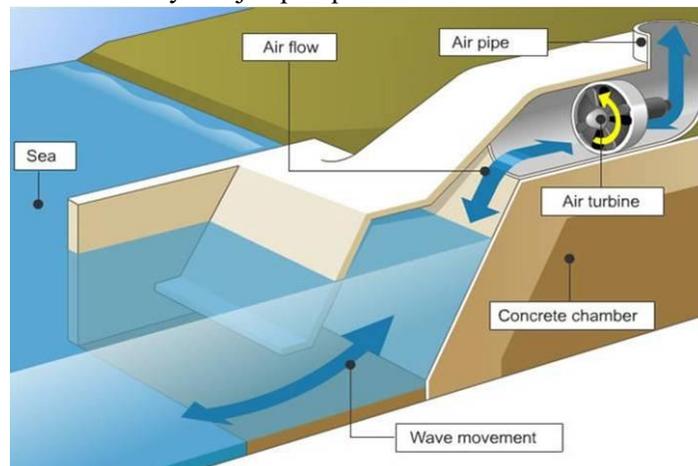
- Terminadores: son también suelen ser de gran tamaño están situados perpendicularmente de avance de ola e intentan captar la energía de una sola vez [11]. Un modelo comercial de este tipo es Wave dragon, se puede observar en la Figura 3.



*Figura 3: Terminador Wave dragon [4].*

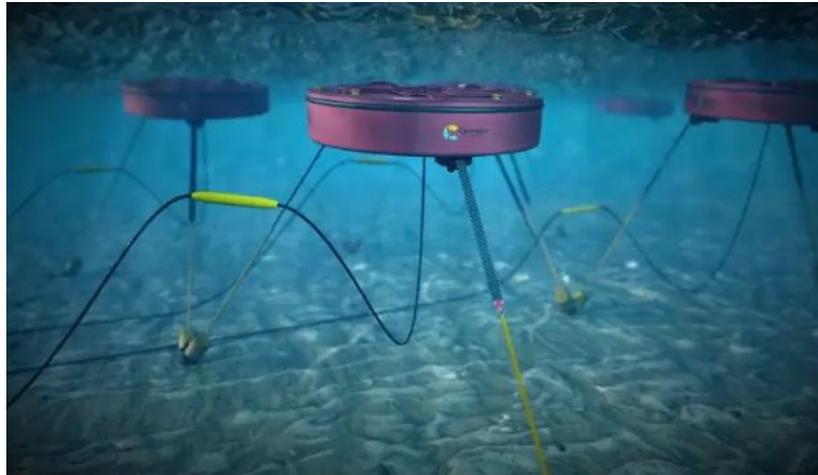
Según el principio de captación:

- Columna de agua oscilante (OWC): aprovechando la oscilación del oleaje, generan sobrepresiones y vacío en una cámara de aire causando un flujo que es utilizado para mover una turbina. Pueden usarse en tierra firme o ser flotantes [11]. En la Figura 4 se puede observar el funcionamiento de un convertidor de este tipo. La turbina que se use tiene que ser bidireccional. Un modelo comercial es OE buoy de ocean energy, siendo este flotante y un ejemplo que este en tierra es la central de Mutriku.



*Figura 4: Esquema de columna de agua oscilante [5].*

- Efecto Arquímedes: Basan su funcionamiento en la fluctuación de la presión dinámica originada por la oscilación del nivel de la columna agua al paso de las olas [11]. Estos dispositivos suelen colocarse cerca de la costa. Un modelo en uso es el CETO III de la empresa REH o el Archimedes wave swing, este modelo se puede observar en la Figura 5.



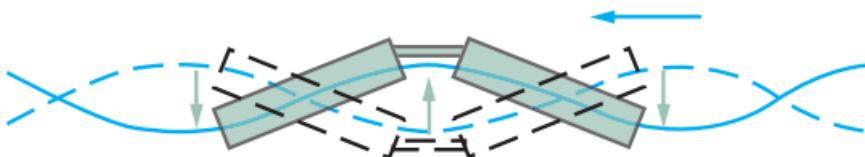
*Figura 5: Absorbedor de efecto Arquímedes [6].*

- Cuerpo boyante con referencia fija: Boyas que flotan libremente con un elemento de amarre que incorpora el sistema de extracción de energía [11]. La empresa Corpower Ocean tiene un proyecto de una planta de energía con esta tecnología, este se puede observar en la Figura 6.



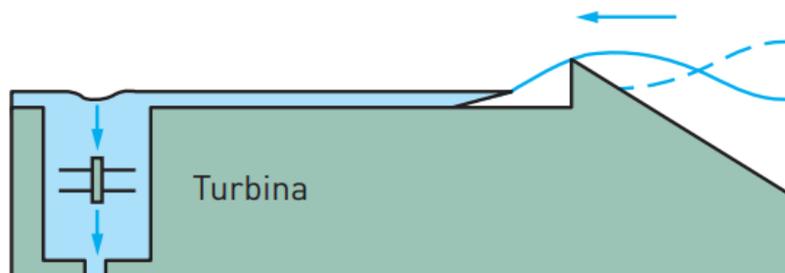
*Figura 6: Absorbedor de cuerpo boyante con referencia fija [7].*

- Cuerpo boyante con referencia móvil: sistema flotante donde la energía se extrae por el movimiento relativo de las diferentes partes de la estructura [11]. Un modelo comercial es el que tiene la empresa Pelamis Wave Power con el modelo P1 y el P2. El funcionamiento de este tipo de convertidores se puede observar en la Figura 7.



*Figura 7: Esquema Cuerpo boyante con referencia móvil [8].*

- Rebose: Pueden ser flotantes o fijos al fondo, almacenan el agua del oleaje que incide para accionar una turbina. Aprovechan, por lo tanto, la energía potencial [11]. Actualmente existe el modelo comercial wave dragon mencionando anteriormente. El funcionamiento de este convertidor se observa en la Figura 8.



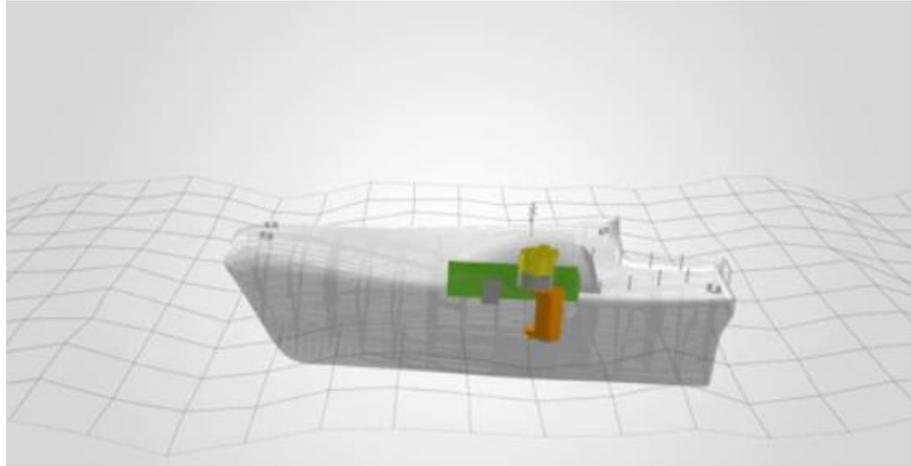
*Figura 8: Esquema convertidor por rebose [8].*

- Impacto o pendulares: Aprovechan la energía horizontal de las olas para mover un pistón que a su vez acciona la turbina. Aprovechan una cantidad pequeña de la energía contenida en la ola [11]. Actualmente la empresa AW Energy está desarrollando el modelo Wave Roller, este modelo se observa en la Figura 9.



*Figura 9: Wave roller [9].*

- Masa rotacional: Sistemas flotantes que aprovechan el balanceo y el cabeceo para mover una masa excéntrica [11]. La empresa Wello está desarrollando el modelo Penguin, se puede observar en la Figura 10.



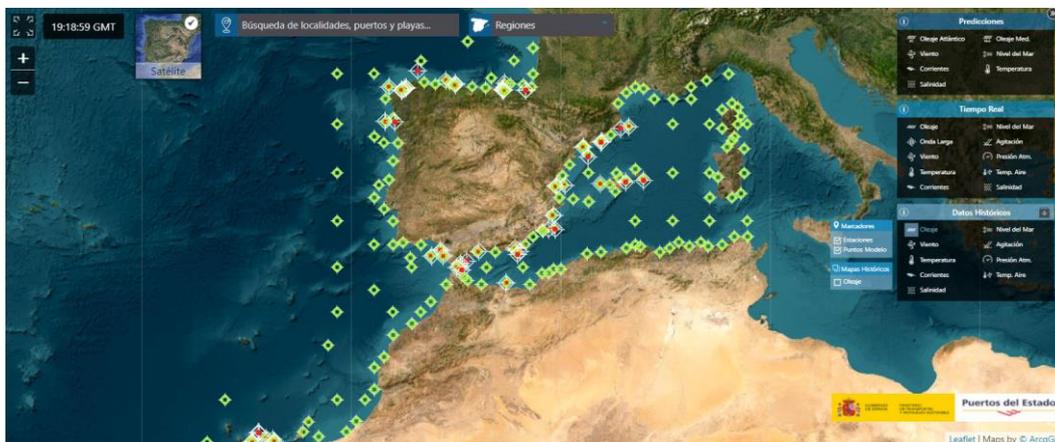
**Figura 10: Modelo Penguin [10].**

## 2.2. Método de obtención de datos.

En este trabajo estudiaremos el potencial del mar para producir energía eléctrica que alimente a una instalación de ósmosis inversa en 8 ubicaciones distintas españolas.

Los datos los obtendremos a través de la página web de Puertos del Estado (Ministerio de Fomento) [12], que es una institución que coordina y controla la eficiencia del sistema portuario español y además toma mediciones del medio marino para poder proporcionar los datos del océano y meteorológicos para el correcto funcionamiento del sistema. Para nuestro estudio solo usaremos los datos del oleaje.

Una vez ya dentro de la web entraremos al apartado de “Oceanografía”, dentro de este entramos al apartado de “Previsión, tiempo real y clima” y seleccionaremos la opción de datos históricos del oleaje, nos aparecerá lo que se observa en la Figura 11.



**Figura 11: Puertos del estado, conjunto de puntos SIMAR (puntos verdes) y estaciones (puntos rojos) [13].**

A la hora de tomar datos nos interesa las estaciones, ya que allí se encuentran boyas de tipo Wavescan y SeaWatch que sirven para medir tanto datos del oleaje como datos atmosféricos y oceanográficos [14]. Mientras que los puntos SIMAR está formado por series temporales de parámetros de viento y oleaje procedentes de modelado numérico, por tanto son, datos simulados y no proceden de medidas directas de la naturaleza [15].

Para nuestro estudio usaremos los datos de la boya del Golfo de Cádiz (latitud 36.49° N y longitud 6.96° O), boya de Cabo de Gata (latitud 36.57° N y longitud 2.34° O), Boya de Gran Canaria (latitud 28.20° N y longitud 15.80° O), Boya de Tenerife Sur (latitud 28.00° N y longitud 16.61° O), Boya de Cabo Silleiro (latitud 42.12° N y longitud 9.43° O), Boya de Villano-Sisargas (latitud 43,50° N y longitud 9.21° O), Boya de Cabo de Peñas (latitud 43.75° N y longitud 6.18° O), Boya de Bilbao-Vizcaya (latitud 43.64° N y longitud 3.04° O).

Para poder obtener los datos debemos solicitarlos a la institución, para ello debemos clicar sobre cada boya y

añadir los datos a descargas; posteriormente clicaremos al símbolo de descarga de datos históricos y rellenaremos un cuestionario para que Puertos del Estado acepte nuestra solicitud. Una vez aceptada nos los mandarán al correo para descargárnoslo.

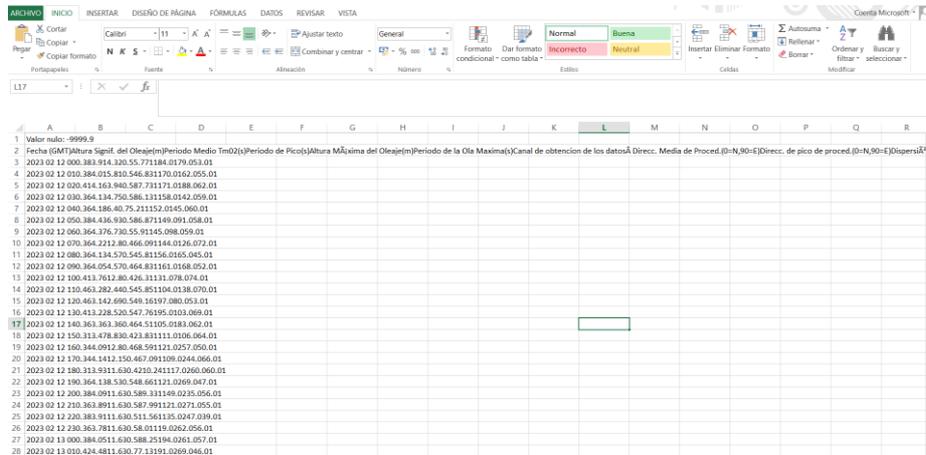


Figura 12: Datos descargados de Puertos del Estado.

El formato que nos lo envía es el que se observa en la Figura 12, deberemos dentro de la pestaña de “Datos” pulsaremos “Texto a columnas” y así podremos tenerlo como se observa en la Ilustración 13.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Valor nulo:	9999.9									
2	Fecha (GMT)	Altura Signif. del Oleaje(m)	Periodo Medio (s)	Altura Máxima del Oleaje(m)	Periodo de la Ola Máxima (s)	Canal de obtención de datos	Direc. Media de Procedencia	Direcc. de pico de procedencia	Dispersión angular en el pico de energía	Canal de obtención de datos	
3	2023-02-12 00:00:00	2.68	5.41	6.73	3.86	6.6	84	88	22	1	
4	2023-02-12 01:00:00	2.73	5.48	6.92	4.33	6.6	84	87	20	1	
5	2023-02-12 02:00:00	2.93	5.71	6.89	3.86	6.5	83	89	21	1	
6	2023-02-12 03:00:00	2.82	5.43	7.52	4.49	7.25	81	82	21	1	
7	2023-02-12 04:00:00	2.67	5.31	7.12	4.72	6.93	82	87	24	1	
8	2023-02-12 05:00:00	2.85	5.48	7.29	5.07	6.82	80	82	24	1	
9	2023-02-12 06:00:00	2.89	5.61	7.78	4.41	7.42	81	84	26	1	
10	2023-02-12 07:00:00	2.92	5.54	7.51	3.94	5.46	85	84	25	1	
11	2023-02-12 08:00:00	2.74	5.49	7.76	3.71	6.1	86	88	28	1	
12	2023-02-12 09:00:00	2.54	5.32	7.52	3.63	7.14	88	88	29	1	
13	2023-02-12 10:00:00	2.48	5.29	7.11	3.71	6.2	94	96	31	1	
14	2023-02-12 11:00:00	2.59	5.42	7.3	4.02	6.89	94	103	29	1	
15	2023-02-12 12:00:00	2.7	5.42	6.92	4.88	7.23	92	101	21	1	
16	2023-02-12 13:00:00	2.61	5.38	6.93	4.17	7.27	89	98	27	1	
17	2023-02-12 14:00:00	2.98	5.35	6.73	4.33	6.89	87	95	21	1	
18	2023-02-12 15:00:00	2.43	5.18	6.71	3.28	6.54	82	85	26	1	
19	2023-02-12 16:00:00	2.43	4.71	6.75	3.75	6.73	89	86	29	1	
20	2023-02-12 17:00:00	2.21	4.92	6.4	3.69	6.43	85	84	27	1	
21	2023-02-12 18:00:00	2.25	5	6.96	3.32	6.16	85	89	26	1	
22	2023-02-12 19:00:00	2.32	4.13	6.73	3.47	6.76	93	107	25	1	
23	2023-02-12 20:00:00	2.29	5.23	6.73	3.28	6.52	104	110	31	1	
24	2023-02-12 21:00:00	2.3	5.25	6.97	3.2	6.69	101	109	26	1	
25	2023-02-12 22:00:00	1.93	4.88	6.4	2.73	6.18	102	104	25	1	
26	2023-02-12 23:00:00	1.97	5.07	6.95	2.86	6.18	104	108	26	1	
27	2023-02-13 00:00:00	1.85	4.97	6.64	2.89	6.02	104	108	28	1	
28	2023-02-13 01:00:00	1.85	5	6.73	2.85	6.28	104	108	36	1	
29	2023-02-13 02:00:00	2.08	5.86	6.4	3.16	6.38	102	101	29	1	
30	2023-02-13 03:00:00	2.18	4.92	6.25	3.04	6.37	101	99	26	1	
31	2023-02-13 04:00:00	2.2	4.98	6.96	3.83	6.1	102	108	25	1	
32	2023-02-13 05:00:00	2.18	5.08	6.95	3.47	6.18	104	107	28	1	
33	2023-02-13 06:00:00	2.08	4.88	6.71	3.12	6.8	104	108	30	1	
34	2023-02-13 07:00:00	1.98	4.95	6.73	3.2	6.63	101	103	33	1	
35	2023-02-13 08:00:00	1.98	5.18	6.95	3.51	7.12	102	109	42	1	
36	2023-02-13 09:00:00	1.89	5.26	6.96	2.86	6.76	105	108	36	1	
37	2023-02-13 10:00:00	1.84	5.29	6.91	3.29	6.38	107	109	40	1	
38	2023-02-13 11:00:00	1.79	5.32	6.93	3.04	6.22	120	132	37	1	
39	2023-02-13 12:00:00	2.11	6.92	6.92	3.35	6.95	107	108	35	1	
40	2023-02-13 13:00:00	2.07	5.41	6.71	2.86	6.18	109	102	31	1	
41	2023-02-13 14:00:00	2.13	5.23	6.73	3.75	6.63	109	102	30	1	
42	2023-02-13 15:00:00	2.02	4.85	6.73	3	6.14	104	107	30	1	
43	2023-02-13 16:00:00	1.99	4.91	6.25	3.88	5.82	106	103	33	1	
44	2023-02-13 17:00:00	2.08	4.91	6.23	2.73	5.62	103	108	38	1	
45	2023-02-13 18:00:00	2.02	4.81	6.25	3.24	6.18	101	109	35	1	
46	2023-02-13 19:00:00	2.02	4.91	6.24	3	6.1	105	106	32	1	
47	2023-02-13 20:00:00	2.09	5.04	6.94	3.14	6.93	102	104	34	1	
48	2023-02-13 21:00:00	1.95	5.02	6.95	2.85	6.13	109	103	35	1	
49	2023-02-13 22:00:00	1.91	5.22	6.91	3.42	6.43	104	103	34	1	

Figura 13: Formato definitivo de los datos de Puerto del Estado.

Como resultado obtendremos los datos horarios de altura significativa del Oleaje (m), periodo medio (s), periodo pico (s), altura máxima del oleaje (m), periodo de la ola máxima (s), dirección media de procedencia, dirección pico de procedencia, dispersión angular en el pico de energía espectral (grados) y los canales mediante los que se han obtenido de las cuatro ubicaciones en el último año.

### 2.3. Análisis de resultados

En este capítulo ha tratado de explicar los distintos tipos de tecnologías que pueden aprovechar las olas para producir energía eléctrica y también se explica como se han obtenidos los datos ambientales de las ocho ubicaciones, en las cuales se realizarán los estudios energéticos que se realizarán.

Los datos obtenidos en las diferentes ubicaciones son datos medidos durante el periodo aproximado de un año, así que todos los cálculos que haremos más adelante serán para cálculo de energía durante un año. Este periodo, donde se ha tenido lugar la recogida de datos, empieza en todas las ubicaciones a principio del año 2023 y acaba en principios del año de 2024.

# 3 TRATAMIENTO DE AGUA MEDIANTE WECS

---

Las desaladoras no sirven únicamente para la extracción de agua potable sino para generación de agua salobre para usos industriales. Una industria que se usa es en la energía termoeléctrica para enfriar los generadores de energía eléctrica o también el caso de la industria petroquímica como es el caso del campo petrolífero en el municipio central colombiano de Puerto Gaitán [16].

En este apartado veremos ciertos estudios actuales sobre el tratamiento de agua mediante ósmosis inversa, desde distintos puntos de vista. Los primeros que veremos será relacionado con la producción de agua potable a partir de distintas fuentes de energía renovables, a continuación hablaremos de que estos convertidores no solo sirven para la producción de agua a partir de ósmosis inversa, sino que se pueden utilizar otras técnicas y el último apartado, trataremos de ver otros usos de estas membranas, ya que no solamente sirven para desalar.

## 3.1 Sistemas de desalación de agua de mar por ósmosis inversa alimentados por WECS.

En los últimos años se ha llevado a cabo una serie de estudios para que la energía eléctrica necesaria por una desaladora para poder producir agua potable, u otros productos, se obtengan mediante fuentes de energías renovables. En este apartado veremos algunos estudios actuales de como aprovechar la energía de las olas para alimentar a las desaladoras.

Un estudio reciente sobre este tema es el estudio de pequeñas plantas flotantes desaladoras en Egipto, debido a que las grandes plantas desaladoras terrestres necesitan amplias redes de distribución y suministro además que son muy costosas, mientras que las plantas desalinizadoras flotantes móviles (FDP), pueden solucionar estos problemas en lugares lejanos de la red. Nuestra plataforma flotante será cilíndrica.

Nuestra FDP está compuesto de una planta desalinizadora (sistema de osmosis inversa), tanques de almacenamiento e instalación fotovoltaica. La capacidad total es de  $10000m^3/día$ , distribuidos en seis módulos. Su funcionamiento se basa en alimentación cofres marinos, pasando por unos filtros para después almacenarlos en los tanques de agua sin desalinizar, después se le elimina los microfloculaciones, a continuación se realiza la osmosis, se elimina los residuos de esta y finalmente se envía a la costa.

La ubicación de nuestro estudio es Ras Ghareb, teniendo esa zona una altura de ola de 2.15 m y un periodo de 5.08 s. El estudio se basará en un modelo a escala 1:1000 y el objetivo es ver cómo se comporta nuestra plataforma con el movimiento de las olas, se realizara en un tanque donde se simulará el oleaje en la zona descrita.

El experimento se basó en a diferentes capacidades de carga del modelo hacerle pruebas para ver su oscilación y pruebas de deterioro. Los estados de carga serán plataforma ligera, lastre y carga completa.

La simulación nos arroja que los movimientos de elevación y cabeceo, para las diferentes cargas, no afecta mucho a la frecuencia de respuesta, mientras que para las frecuencias naturales amortiguadas varía un 9% respecto el caso de carga completa con respecto el de plataforma ligera, lo misma ocurre en la comparación de la frecuencia máxima del movimiento de cabeceo es casi la misma, pero el movimiento de balanceo se desplaza aproximadamente un 12% en el caso de carga completa con respecto al caso del barco ligero.

Se probaron tres alturas de ola diferentes 2,15 m, 5,18 m y 7,92 m para la carga completa y las condiciones de lastre, mientras que las alturas de ola de 1 m, 2,15 m y 3 m se probaron para la condición de plataforma ligero debido al calado limitado. Los resultados de la simulación nos muestran que el efecto de la altura de la ola en las respuestas de inclinación y cabeceo es muy evidente a frecuencia natural. Sin embargo, para los rangos de frecuencia restantes, las respuestas de movimiento no son significativamente diferentes.

A la hora de comparar los resultados de nuestra simulación con los datos de Ras Ghareb, se puede observar que el movimiento de inclinación y cabeceo comparado con la bandas de onda de Ras Ghareb, la FDP no se encuentra en el rango, mientras que el sistema cilíndrico flotante de almacenamiento y descarga de producción (FPSO) si está en el rango [17].

Otro estudio muy interesante trata de diseñar una desalinizadora ubicada en Gran Canaria analizando dos escenarios posibles, el primero que toda la energía que necesite se extraiga de las olas y la segunda usar la energía de las olas y además fotovoltaica. Para ello seguiremos 6 pasos.

1. Selección del emplazamiento, las condiciones se basa en el elevado recurso energético de las olas, no tiene ninguna clase de restricciones y además se ha tenido en cuenta la batimetría etc. Se ha seleccionado un emplazamiento en el norte de la isla de Gran Canaria, porque cumple los requisitos descritos anteriormente, tiene un área de  $7.82km^2$ .
2. Definición de los dos escenarios descrito antes, si cubren la demanda, en el segundo escenario se ha estimado que la fotovoltaica solo cubre el 20% de la energía.
3. Análisis de datos de los recursos undimotriz y solar, el undimotriz se obtiene los datos a partir de un punto SIMAR cercano y se introducen en programas con modelo estadísticos y los solares se extraen del programa PVGIS.
4. Selección convertidores de la energía de las olas, se estudiarán los cuatro que se observa en la imagen

Main parameters of the selected WEC technologies.

	Company	Type <sup>a</sup>	Location	Depth (m)	Capacity (MW)	Start	TRL
WaveDragon [56]	Wave Dragon Ltd	O	Offshore	>30	1.5; 4; 7 and 12	2003	7
Wavepiston [57]	WavePiston	A	Nearshore	20-100	0.1-0.4	2006	6/7
Weptos [58,59]	Weptos A/S	A	Nearshore	40-80	4-6	2007	5
UndigenW200 [60]	Wedge Global	PA	Nearshore/Offshore	>40	0.2	2008	6

<sup>a</sup> PA: Point Absorber, O: Overtopping, A: Attenuator

**Tabla 1: Características convertidores [18].**

5. Configuración de los diferentes convertidores, ya que, tienen efectos los convertidores sobre el resto.
  - Wave dragon:  $W = 2D$  y  $L = 130$  m, donde D es la distancia entre las puntas de los reflectores. Siendo la W la distancia entre colectores de la misma hilera y L entre hileras en paralelo.
  - Wavepiston: se podrían instalar 50 colectores de energía. La superficie de cada colector de energía es de  $36 m^2$  (9 m de largo y 4 m de ancho). La longitud de la cadena será de 370 m y la distancia entre los colectores de energía será de 7 m y distancia entre cadenas de 60m.
  - Weptos: se ha estimado que necesitamos un 50/1 con un generador de 6MW.
  - Undigen W200: la distancia mínima estimada para recuperar la energía es de 600 m por lo que es la que se usara tanto longitudinal como lateral.
6. Comparar los resultados de la simulación de los dos escenarios y definir cuál es el mejor.
  - Escenario 1: después de analizar los 4 colectores de energía se define que el que mejor se adapta a la demanda es el wave dragons de 1,5 MW pero el que produce energía más estable el weptos (a pesar de no llegar a cubrir la demanda) y en términos de densidad energética los que más tienen son los dos wave dragon (de 1,5 MW y de 4 MW), seguidos de wavepiston y weptos. La tecnología undigen solo cubre un 11,2 % de la energía demandada.
  - Escenario 2: un sistema híbrido no mejora en todos los casos la adaptación entre producción y demanda teniendo que hacer un seguimiento hora a hora de cada caso [18].

Otro estudio interesante, es el que trata de diseñar una desalinizadora ubicada en Gran Canaria analizando dos escenarios posibles, el primero que toda la energía que necesite se extraiga de las olas y la segunda usar la energía de las olas y además fotovoltaica. Para ello seguiremos 6 pasos.

1. Selección del emplazamiento, las condiciones se basa en el elevado recurso energético de las olas, no tiene ninguna clase de restricciones y además se ha tenido en cuenta la batimetría etc. Se ha seleccionado un emplazamiento en el norte de la isla de Gran Canaria, porque cumple los requisitos descritos anteriormente, tiene un área de  $7.82km^2$ .
2. Definición de los dos escenarios descrito antes, si cubren la demanda, en el segundo escenario se ha estimado que la fotovoltaica solo cubre el 20% de la energía.
3. Análisis de datos de los recursos undimotriz y solar, el undimotriz se obtiene los datos a partir de un punto SIMAR cercano y se introducen en programas con modelo estadísticos y los solares se extraen del programa PVGIS.
4. Selección convertidores de la energía de las olas, se estudiarán los cuatro que se observa en la imagen

Main parameters of the selected WEC technologies.

	Company	Type <sup>a</sup>	Location	Depth (m)	Capacity (MW)	Start	TRL
WaveDragon [56]	Wave Dragon Ltd	O	Offshore	>30	1.5; 4; 7 and 12	2003	7
Wavepiston [57]	WavePiston	A	Nearshore	20-100	0.1-0.4	2006	6/7
Weptos [58,59]	Weptos A/S	A	Nearshore	40-80	4-6	2007	5
UndigenW200 [60]	Wedge Global	PA	Nearshore/Offshore	>40	0.2	2008	6

<sup>a</sup> PA: Point Absorber, O: Overtopping, A: Attenuator

Tabla 2: Características convertidores [19].

5. Configuración de los diferentes convertidores, ya que, tienen efectos los convertidores sobre el resto.
  - Wave dragon:  $W = 2D$  y  $L = 130$  m, donde D es la distancia entre las puntas de los reflectores. Siendo la W la distancia entre colectores de la misma hilera y L entre hileras en paralelo.
  - Wavepiston: se podrían instalar 50 colectores de energía. La superficie de cada colector de energía es de 36 m<sup>2</sup> (9 m de largo y 4 m de ancho). La longitud de la cadena será de 370 m y la distancia entre los colectores de energía será de 7 m y distancia entre cadenas de 60m.
  - Weptos: se ha estimado que necesitamos un 50/1 con un generador de 6MW.
  - Undigen W200: la distancia mínima estimada para recuperar la energía es de 600 m por lo que es la que se usara tanto longitudinal como lateral.
6. Comparar los resultados de la simulación de los dos escenarios y definir cuál es el mejor.
  - Escenario 1: después de analizar los 4 colectores de energía se define que el que mejor se adapta a la demanda es el wave dragons de 1,5 MW pero el que produce energía más estable el weptos (a pesar de no llegar a cubrir la demanda) y en términos de densidad energética los que más tienen son los dos wave dragon (de 1,5 MW y de 4 MW), seguidos de wavepiston y weptos. La tecnología undigen solo cubre un 11,2 % de la energía demandada.
  - Escenario 2: un sistema híbrido no mejora en todos los casos la adaptación entre producción y demanda teniendo que hacer un seguimiento hora a hora de cada caso [19].

El último estudio trata del problema que tiene el uso de energía renovable para proporcionar la energía demandada por una planta desaladora de osmosis inversa, es que este tipo de fuentes de energía no proporciona un suministro contante, provocando fluctuaciones de presión en la membrana, haciendo que disminuya la vida útil del sistema, aumente el ensuciamiento, disminuya el agua tratada, etc. La solución que plantea este estudio es el uso de convertidores de energía de las olas para proporcionar energía a pequeñas centrales desaladoras situadas en lugares remotos sin necesidad de estar conectadas a la red. Estudiaremos un caso para Kilifi, Kenia.

El estudio de nuestro caso se basará en datos de oleaje y solares obtenidos en la ubicación en 2015, la energía producida variará en función del convertidor que elijamos, el experimento será a pequeña escala, los cálculos, estimaciones y experimentos se combinan para estimar la producción potencial de agua dulce durante 2015, a partir de una energía undimotriz y/o sistema híbrido que incluye un sistema fotovoltaico.

Se usa un sistema pequeño de desalación portátil, al proveedor Raiman Desalination, con membranas de osmosis inversa de la marca Lenntech. La configuración de la planta se ve en la Imagen II.

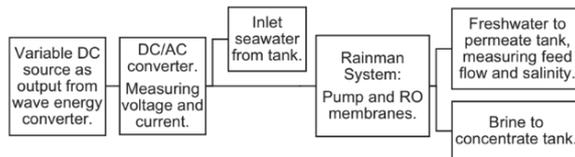


Figura 14: configuración instalación [20].

Los valores de potencia nominal son de 2 kW de pico y 1,6 kW de forma continua desde una fuente de corriente alterna, generando aproximadamente 2.3 l/min.

Los resultados de producción de agua potable, según las distintas configuraciones, para el día 31 de Diciembre

de 2015, se ven en la Tabla II.

Estimated total freshwater production from different system configurations for powering of a small-scale SWRO desalination system in Kilifi, Kenya.		
System description for powering the RO desalination in Kilifi	Time	Estimated freshwater production [liter]
One WEC system	About one day, 31 Dec. 2015	536
One PV system	31 Dec. 2015	106
One WEC and one PV system	About one day, 31 Dec. 2015	2009
One WEC system	Dec. 2015	11,811
One WEC system	About one year, 2015, (8755 h)	780,560
Two WEC systems	About one year, 2015, (8755 h)	1,273,600
Three WEC systems	About one year, 2015, (8755 h)	1,454,100

**Tabla 3: Resultados simulaciones.**

Los diferentes estados de operación de la planta son: suministro nominal, suministro bajo, excedentes y parada. Este último se puede dar por diferentes motivos y se soluciona almacenando energía o teniendo un sistema híbrido, que además como hemos visto en la Tabla II es el que más agua produce. También una solución para aportar estabilidad de suministro es poner varios convertidores, pero esto hace que aumente el coste y los excedentes de energía.

Estas estrategias también sirve para el caso de suministro bajo y en el caso de excedentes se pueden vender a la red o tener otros usos.

Para concluir el uso de convertidores de la energía de las olas para alimentar una planta desaladora por osmosis inversa, es factible, pero como este recurso es irregular se podría solucionar con técnicas mencionadas anteriormente como almacenamiento o sistemas híbridos ya que las diferentes energías tiene diferente escalas de tiempo [20].

### 3.2 Obtención de agua ultrapura a partir de aguas de muy baja salinidad.

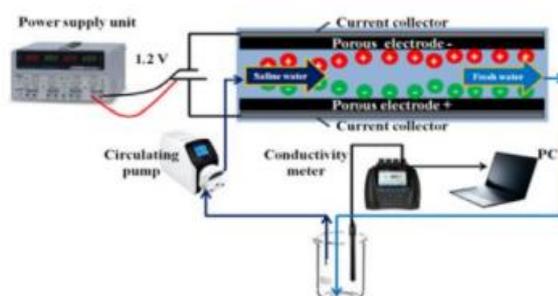
El primer estudio consiste en la evolución del rendimiento de la desionización capacitiva (CDI) relacionando el efecto del tamaño de los iones con la influencia del tamaño de los poros de las membranas. El CDI sirve para la desmineralización electroquímica del agua (EDL).

El estudio desarrolla un método cuantitativo para evaluar la influencia del tamaño de los poros en el rendimiento de desalinización del material de los electrodos.

Para estudiar el efecto de los tamaños de poros no se tendrá en cuenta el tamaño de los iones, esto se estudiará a partir de la capacidad específica de desalación ( $\Gamma_m$ ) y estudió en detalle el efecto de diferentes concentraciones de electrolitos, desde uno muy diluido (500 ppm) hasta el nivel del agua del mar (30000ppm), dándonos como resultado que el proceso CDI tendrá mayor rendimiento a mayor salinidad, por lo tanto, en el caso de material de tamaño de poro pequeño, cuanto mayor sea la salinidad, menos sufrirá la superposición de EDL y mejor será la capacidad de desalinización.

Ahora para estudiar el efecto de los tamaños de poros si se tendrá en cuenta el tamaño de los iones debido a que el volumen aumenta, debido al efecto del tamaño de los iones, la eficiencia energética de todos los casos cae significativamente en comparación con el caso anterior. Una estructura de poros muy pequeña puede hacer que el gasto energético del proceso de desalinización sea demasiado elevado.

La configuración de nuestro experimento se observa en la Imagen III. A la hora de simular se hizo con dos materiales de electrodos, carbón activado (ACB) y aerogel de carbón comercial (CAG).



**Figura 15: Configuración experimento [21].**

El rendimiento del CDI sin tener en cuenta el tamaño de los iones fue generalmente mejor que el teniéndolo. Para mejorar el proceso CDI usaremos diferentes medios para disminuir el tamaño efectivo de los iones un ejemplo es utilizar ondas electromagnéticas para romper la hidratación de los iones [21].

Otro estudio que hemos visto, se centra en nuevos mecanismos de separación iónica que pueden mejorar el transporte iónico de procesos de electro membrana a través de una corriente excesiva (OLC), ya que los procesos que usan una electro membrana, como puede ser la electrodiálisis (ED), están limitados por la difusión.

Para diseñar y operar procesos de electro membrana necesitamos conocer difusión limitada (DLC). Generalmente se estima representando la densidad de corriente en función de la diferencia de potencial, y generalmente hay tres regiones en estas gráficas (Primer tramo la corriente aumenta linealmente con el voltaje, segundo tramo aumento gradual de la corriente con el voltaje, formando una meseta y último tramo, aumenta el voltaje provocando un drástico crecimiento de la corriente en el régimen de corriente excesiva). Normalmente se opera en el primero de este para evitar la disociación del agua, a pesar que hay estudios que aplicando OLC mejora la eliminación de contaminantes diluidos.

La OLC se produce por tres mecanismos: recciones de disociación del agua, convección inducida de la corriente y fuga de cationes. Usando OLC se puede mejorar la transferencia de corriente a través de electromembranas. Algunas técnicas que se pueden usar:

- El transporte de iones en sistemas de micro/nanofluidos: este método consiste en que se construyen canales a nivel microscopio aplicándole una diferencia de potencial para así poder tener una corriente excesiva.
- Ondas de choque de desionización: consiste en cargar las celdas del medio poroso de la electro membrana, aumentando así el transporte de iones.
- Electrodiálisis de choque (ED choque): se refiere a un proceso de separaciones que se basa en choques de desionización en medios porosos. En el shock ED, un electrolito se transporta al material poroso débilmente cargada con poros de tamaño micrométrico que se coloca entre las membranas de intercambio iónico y los electrodos. Teniendo un buen rendimiento de desalinización.
- "Puentes iónicos" para la desionización profunda en sistemas de electro desionización (EDI): es la última forma de superar el DLC expuesta en este estudio y consiste que introducir medios conductores dentro de una celda de electro membrana, es posible lograr una desionización continua o eliminación iónica en una solución diluida que tiene una alta resistencia eléctrica [22].

### 3.3 Otras aplicaciones de las membranas en el tratamiento de agua

En este aparatdo veremos un estudio que se basa en el desarrollado la tecnología de separación mediante membranas para muchas aplicaciones en la industria. En este estudio nos centraremos en su uso para el tratamiento de efluentes.

Las membranas son un sistema de barrera semipermeable que separa selectivamente las moléculas en función de su tamaño y forma. Las características de la membrana son muy importante durante el proceso de separación. Se pueden clasificar según su morfología (densas homogéneas, membranas porosas y membranas de película delgada) y según su uniformidad de composición (isotrópicas y anisotrópicas). También el módulo de la membrana influye en al rendimiento de la membrana, existe cuatro módulos (placa y módulo, tubulares, huecos y enrollados).

Los efluentes industriales de origen químico destacan por tener aceite, grasas, COD/BOD, metales pesados, compuestos organohalogenados y otros conceptos nocivos. En este tipo de industrias se puede usar para generar un producto como es el caso de la sosa caustica para la industria textil o para filtrar las aguas residuales como hay estudios para el petróleo, las aguas residuales de una desalinizadora, para el tratamiento terciario a partir de osmosis inversa entre otros.

Los efluentes de la industria alimentarios y lácteos consisten en una alta concentración de sólidos, BOD, COD, aceites, grasas, azúcares, colorantes, conservantes, microbios y otros nutrientes. Se propuso que el proceso recuperara el 95% de las aguas residuales, y el agua recuperada podría utilizarse para la limpieza de tinajas y calderas, aunque se puede mejorar el proceso de osmosis inversa y mejoraría el nivel de agua potable. Esto haría

que a nivel económico fuera muy rentable.

Los efluentes de destilerías y bebidas efluentes consisten en productos de desecho altamente recalcitrantes, flóculos biológicos, COD, BOD, furfural, colorantes, materias orgánicas y otros nutrientes. Se estudia la nanofiltración para la eliminación de COD y el color, también la microfiltración y la ultrafiltración para limpiar aguas residuales de las destilerías.

Los efluentes de galvanoplastia y circuitos impresos impulsados por la industria eléctrica y electrónica, el efluente generado de estas industrias contiene compuestos de cianuro tóxicos, alta COD/BOD, color, turbidez, sólidos suspendidos, sólidos disueltos y metales pesados. Se estudió la fabricación de membranas de fibra hueca de nanofiltración compuestas de película delgada para estudiar el rendimiento de la membrana y además, se propone que las matrices de membranas de varias etapas es una buena opción para mejorar la eficiencia de eliminación.

Los efluentes industriales de papel y celulosa consisten en sólidos totales, haluros orgánicos absorbibles, alto contenido de COD/BOD, compuestos clorados, colorantes y compuestos orgánicos. Se realizaron estudios de la membrana de canasta giratoria, concluyendo que la ultrafiltración con membrana de cesta giratoria exhibía un bajo consumo de energía.

Los efluentes medicinales contienen desechos sucios, desechos sólidos, desechos líquidos, cenizas de incineración, productos químicos, desechos biotecnológicos, microbios y materias orgánicas. Existen varios estudios, como desarrollo una membrana de nanofiltración sensible al pH con polisulfona/ácido poliacrílico, un sistema de biorreactor de membrana sumergida tipo Ludzack-Ettinger.

Los efluentes industriales de textiles y tintes son los altos sólidos en suspensión, las enzimas, los metales pesados, la COD, el color, la acidez y otras sustancias solubles. Existen también varios estudios, como por ejemplo fabricaron una membrana de nanofiltración híbrida cargada positivamente con nanotubos de carbono de paredes múltiples funcionalizados con trietilentetramina para el tratamiento de aguas residuales de tintes, entre otros.

Para concluir podemos ver que esta tecnología es muy importante para poder reutilizar las aguas residuales de las industrias [23].

### 3.4. Análisis de resultados

En este capítulo hemos hecho una revisión bibliográfica de temas relacionados con nuestro trabajo, purificación de agua a través del uso de tecnología de ósmosis inversa. Nos hemos centrado en tres aspectos, el primero es el uso de WEC para la producción de energía eléctrica que alimente a un tratamiento de agua por ósmosis inversa, otro es la obtención de agua ultrapura a partir de aguas de baja salinidad y por último el uso de la tecnología de ósmosis inversa para el tratamiento de aguas.

Respecto al uso de convertidores para abastecer las necesidades eléctricas de estos procesos la literatura nos muestra que en el estudio de las plantas desalinizadoras flotantes móviles son una buena alternativa para abastecer a regiones alejadas de la red, pero el caso de la una estudiada en Ras Ghareb en Egipto no se adapta bien a las condiciones del mar. También se ha estudiado la instalación de una desaladora en Gran Canaria que se alimenta de energía de las olas o de la energía undimotriz y la energía producida por una instalación fotovoltaica, siendo la segunda configuración no en todos los casos estudiado, que depende del convertidor, el que mejor se acopla a la demanda. Y por último el último artículo estudiado nos muestra que el uso de WEC o de otras tecnologías renovables proporciona suministro insuficiente por los agujeros de la producción y recomienda el uso de sistemas híbridos.

Para el uso de ósmosis inversa para la producción de agua ultrapura los artículos estudiados nos muestra procesos de mejora de ciertos procesos como el caso del primero que consiste en la mejora del rendimiento de la desionización capacitiva, que sirve para la desmineralización electroquímica del agua. El otro artículo estudiado trata de nuevos mecanismos de separación iónica que pueden mejorar el transporte iónico de procesos de electro membrana a través de una corriente excesiva.

Por último el apartado de este capítulo sobre el uso de ósmosis inversa para el tratamiento de agua nos muestra que en distintos tipos de industrias producen efluentes con ciertos componentes que pueden ser tratados con ósmosis inversa y así purificar el agua.

# 4 CÁLCULO ENERGÍA.

## 4.1 Descripción de los equipos a estudiar.

A partir de los datos obtenidos anteriormente para nuestras cuatro ubicaciones tendremos que estudiar la potencia que puede generarse mediante diferentes tipos de convertidores. Para nuestro estudio analizaremos tres convertidores, que serán los que se encuentra en el programa System Advisor Model (SAM), que son los que se pueden observar en la Figura 14.

Name	Technology Type	PTO Type	Characteristic Diameter	Unballasted Structural Mass	Foundation Type	Mooring Type	Primary Structure Material
RM3	Heaving Buoy	Hydraulic Drivetrain	20	687	Floating	Slack Mooring	A36 Steel
RM5	Oscillating Surge Wave Converter	Hydraulic Drivetrain	25	800	Floating	Taut Mooring	Fiberglass and A36 Steel
RM6	Backward Bent Duct Buoy Floating Oscillating Water Column	Wells Air Turbine	27	1809	Floating	Slack Mooring	A36 Steel

*Figura 16: Características WECs a estudiar en el programa SAM.*

Estos tres formán parte de un estudio con el objetivo de comparar el rendimiento el coste normalizado de la energía (LCOE), de los diseños del software código abierto de los convertidores de energía undimotriz. El estudio es el Reference Model Project (RMP) llevado a cabo por Sandia National Laboratories (SNL), con la asociación del Department of Energy (DOE) y tres laboratorios nacionales, entre ellos el National Renewable Energy Laboratory (NREL), el Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) y el Oak Ridge National Laboratory (ORNL), el Applied Research Laboratory de la Penn State University y Re Vision Consulting [24].

El estudio mencionado estudia seis dispositivos aunque nosotros solo usaremos el RM3, RM5 y RM6.

### 4.1.2 Modelo RM3

El Reference Model 3 (RM3), es un convertidor de energía undimotriz que según nuestra clasificación previa es según su orientación respecto el frente de ola un absorbedor puntual y según su principio de captación cuerpo boyante con referencia fija. El diseño del dispositivo consiste en un flotador en la superficie que oscila con el movimiento de las olas, que se conecta a una placa de reacción subsuperficial. El emplazamiento para el que se diseñó para la costa de Eureka, en el condado de Humboldt, en California [25].

Este absorbedor puntual, con una potencia nominal de 286 kW, convierte la energía de las olas en energía eléctrica a partir de la oscilación del dispositivo por las olas incidentes como se ha mencionado anteriormente; el flotador está diseñado para oscilar arriba y abajo del eje vertical hasta 4 m. El fondo de la placa de reacción está a unos 35 m por debajo de la superficie del agua. El dispositivo está diseñado para desplegarse a profundidades de entre 40 y 100 m. El absorbedor puntual también está conectado a un sistema de amarre para mantener el dispositivo flotante en posición [25]. En la Figura 17, se puede ver una imagen de este convertidor.

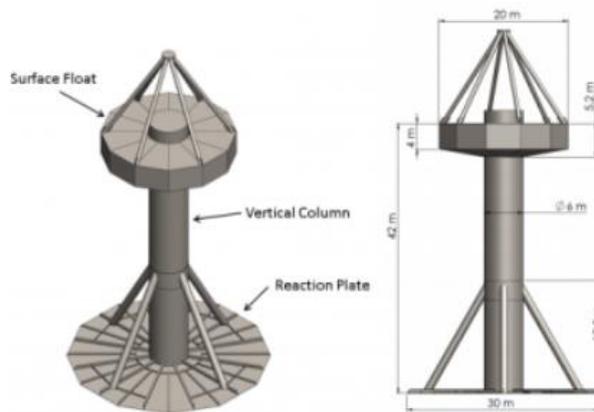


Figura 17: Modelo RM3 [25].

Los diferentes datos que necesitamos para el cálculo de la potencia producida lo cogemos del software mencionado anteriormente SAM. Estos datos es una tabla en la cual en función de la altura significativa (m) y el periodo de la ola (s) obtendremos la potencia, esta tabla se observa en la Figura 18.

Power Matrix (kW)

		Te = wave energy period (s)																					
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	
Hs = significant wave height (m)	0.25	0	0	0	0	0.4	0.6	0.8	1	1.1	1.1	1	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.3	0.2	0.2	0	
	0.75	0	0	0	0	3.2	5.3	7.4	9.1	9.8	9.5	8.6	7.4	6.2	5.1	4.1	3.4	2.8	2.3	1.9	1.6	0	
	1.25	0	0	0	0	9	14.8	20.5	25	26.8	25.9	23.3	20	16.8	13.8	11.3	9.2	7.6	6.3	5.2	4.3	0	
	1.75	0	0	0	0	17.6	28.9	39.9	48.3	51.6	49.7	44.7	38.4	32.2	26.5	21.7	17.8	14.6	12.1	10	8.4	0	
	2.25	0	0	0	0	29	47.5	65.4	78.8	83.8	80.6	72.4	62.3	52.2	43	35.3	28.9	23.8	19.7	16.3	13.7	0	
	2.75	0	0	0	0	43.2	70.7	97	116.3	123.1	118.1	106.1	91.3	76.5	63.2	51.9	42.5	35	28.9	24.1	20.1	0	
	3.25	0	0	0	0	60.2	98.3	134.5	160.5	169.3	162.1	145.5	125.2	105	86.8	71.3	58.5	48.2	39.9	33.2	27.8	0	
	3.75	0	0	0	0	79.9	130.4	177.8	211.2	222	212.2	190.4	164	137.6	113.8	93.6	76.9	63.3	52.5	43.7	36.6	0	
	4.25	0	0	0	0	102.4	166.7	226.7	268.3	281.1	268.2	240.5	207.2	174.1	144.1	118.5	97.4	80.3	66.6	55.5	46.5	0	
	4.75	0	0	0	0	127.6	207.4	281.2	336	356	336	299	255	214.3	177.5	146.1	120.2	99.2	82.2	68.6	57.6	0	
	5.25	0	0	0	0	155.4	252.4	336	396	426	406	366	316	268.2	214	176.3	145.1	119.8	99.4	83	69.7	0	
	5.75	0	0	0	0	186	296	396	466	496	476	426	366	316	268.2	214	176.3	145.1	119.8	99.4	83	69.7	0
	6.25	0	0	0	0	219.2	356	466	546	576	556	506	446	386	336	288	244.2	201.2	166.4	138.2	115.5	97.1	0
	6.75	0	0	0	0	255	416	546	636	666	646	596	536	476	426	378	334.4	292.4	259.7	213.5	173.3	142.3	0
	7.25	0	0	0	0	286	476	626	726	756	736	686	626	566	516	468	424.6	382.6	350.9	294.7	234.5	194.5	0
	7.75	0	0	0	0	326	536	706	816	846	826	776	716	656	606	558	514.6	472.6	440.9	374.7	304.5	244.5	0
8.25	0	0	0	0	366	606	796	916	946	926	876	816	756	706	658	614.6	572.6	540.9	464.7	384.5	314.5	0	
8.75	0	0	0	0	406	686	896	1026	1056	1036	986	926	866	816	768	724.6	682.6	650.9	564.7	474.5	404.5	0	
9.25	0	0	0	0	446	776	1006	1146	1176	1156	1106	1046	986	936	888	844.6	802.6	770.9	674.7	584.5	514.5	0	
9.75	0	0	0	0	486	876	1126	1276	1306	1286	1236	1176	1116	1066	1018	974.6	932.6	900.9	804.7	714.5	644.5	0	

Figura 18: Tabla de potencia para RM3 obtenida del SAM.

En este programa también nos ofrece otros datos interesantes como los costes. Uno de los costes que nos ofrece el programa es el coste del dispositivo teniendo en cuenta el coste del ensamblaje de la estructura, el coste del sistema de arranque y los costes del amarre, cimentación y subestructura siendo un total de 295.243.512 \$. Otro es el balance del sistema (BOS) que incluye el coste de desarrollo, el coste de la ingeniería, el coste de la infraestructura eléctrica, el coste de la puesta en marcha de la planta, los costes de acceso a la ubicación, los costes de la instalación y los costes de alguna estructura adicional, siendo un total de 68.823.486 \$. También nos muestra el coste financiero, que incluye presupuesto del proyecto, seguro durante la construcción, reserva y algún coste adicional, siendo este un total de 6.031.269 \$. Y por último el coste de operación y mantenimiento, que este se desglosa en los costes derivados de la operación y los derivados del mantenimiento siendo un total de 5.321.317 \$.

#### 4.1.2 Modelo RM5

El Reference Model 5 (RM5), es un convertidor de energía undimotriz que según nuestra clasificación previa es según su orientación respecto al frente de ola un terminador y según su principio de captación es de impacto o pendulares. Al igual del modelo RM3 fue diseñado para la costa de Eureka, en el condado de Humboldt, en California [26].

El diseño RM5 tiene una potencia nominal de 360 kW, utiliza una aleta de 25 m de ancho y 19 m de alto (16 m

de calado) y la distancia desde la parte superior de la aleta perforadora de la superficie del agua hasta la superficie media del agua es de 1.5 m. La aleta está conectada a un eje con un diámetro de 3 m que gira contra el bastidor de soporte. Se supone que el bastidor de soporte tiene un diámetro exterior de 2 m, y la longitud total de la estructura del dispositivo es de 45 m. Hay que tener en cuenta que fue diseñado para desplegarse en aguas profundas, a profundidades de entre 50 m y 100 m, y fue amarrado por tensión al lecho marino [26]. Se puede observar como ese n la Figura 19.

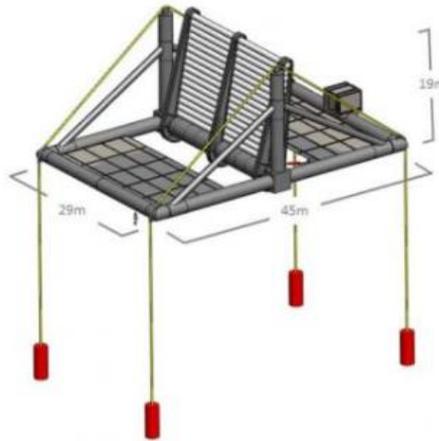


Figura 19: Modelo RM5 [26].

Al igual que para el RM3 para el cálculo de la potencia cogemos los datos de una tabla similar de potencia del programa SAM, esta se encuentra en la Figura 20.

Power Matrix (kW)

		Te = wave energy period (s)																					
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	
Hs = significant wave height (m)	0.25	0	0	0	0	4.8	6.7	7.9	9.3	10.2	10.1	9.7	9	8.8	7.6	7.3	6.4	5.6	5	4.5	4	0	
	0.75	0	0	0	0	12.3	16.5	18.8	21.2	22.9	22.2	20.9	19.4	18.7	16.5	16	14.2	12.8	11.5	10.4	9.4	0	
	1.25	0	0	0	0	31.8	40.7	44.6	48.5	51.7	48.8	45.1	41.8	40.1	36.2	35.1	31.9	29.2	26.5	24.3	22	0	
	1.75	0	0	0	0	58.3	72.3	77.1	81.7	86.5	80.8	74	69.7	66.7	59.7	57.6	52.7	48.7	44.5	41.1	37.6	0	
	2.25	0	0	0	0	91.3	110.4	115.7	119.3	126.5	117.3	107.9	102	97.1	86.4	82.6	75.6	70.5	64.7	60.3	55.3	0	
	2.75	0	0	0	0	130.5	154.9	160	162.7	171.7	158.5	145.4	137.5	130.4	115.6	109.7	101.4	94.6	86.6	80.8	74	0	
	3.25	0	0	0	0	174.9	204.4	208.9	210.4	220.5	202.7	185.4	175.4	165.9	148	140.3	129.7	120.5	110.1	102.2	93.4	0	
	3.75	0	0	0	0	223.9	258.5	261.9	261.6	272.4	249.5	227.7	215.3	204.5	183.2	173	159.8	147.9	134.8	124.8	113.7	0	
	4.25	0	0	0	0	277.2	316.8	318.5	316	327	298.4	271.6	257.2	245.5	220.2	207.3	191.5	177.1	161.8	149.7	136.8	0	
	4.75	0	0	0	0	334.5	360	360	360	360	349.4	317.2	302.2	288.2	258.7	243.1	225.4	208.6	190.3	176.1	160.7	0	
	5.25	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	348.9	332.4	298.6	280.1	261.3	241.4	220	203.3	185.2	0	
	5.75	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	339.7	319.1	298.4	275.5	250.8	231.5	210.7	0	
	6.25	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	340.8	314.3	285.8	263.5	239.7	0	
	6.75	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	358.6	325.8	300.1	272.6	0	
	7.25	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	341.8	310.1	0
	7.75	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	352.8	0
8.25	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	0	
8.75	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	0	
9.25	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	0	
9.75	0	0	0	0	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	360	0	

Figura 20: Tabla de potencia para RM5 obtenida del SAM.

Al igual que para el convertidor RM3 usaremos el programa SAM para ver los diferentes costes que tiene esta tecnología, el coste del dispositivo es de 370.356.599 \$, el balance del Sistema (BOS) es 90.545.448 \$, el coste financiero es de 40.390.367 \$ y por último el coste de operación y mantenimiento es de 6.526.909 \$. El desglose de los diferentes costes es igual que en la tecnología anterior.

#### 4.1.3 Modelo RM6

El Reference Model 6 (RM6), es un convertidor de energía undimotriz que según nuestra clasificación previa es según su orientación respecto el frente de ola un terminador y según su principio de captación es de columna de agua oscilante (OWC). El diseño al igual que los anteriores se penso para Eureka, California. Su potencia nominal a la que esta diseñado es de 350.5 kW.

El convertidor está diseñado para capturar la mayor cantidad de energía disponible de las ondas incidentes. Esto está dictado principalmente por la estructura física y los controles (implementados a través de la cadena de conversión de energía) utilizados para influir en la dinámica de la estructura física. La energía neumática se convierte luego en energía eléctrica mediante el uso de una turbina de aire conectada a un generador eléctrico. La electricidad producida se acondiciona antes de su inserción en la red eléctrica local [27].

A destacar es la turbina de aire usada, que es una turbina Wells que destaca por ser bidireccional y así poder aprovechar el flujo de aire tanto para los momentos de sobrepresión del dispositivo y los de depresión. Se puede observar este modelo de convertidor en la Figura 21.

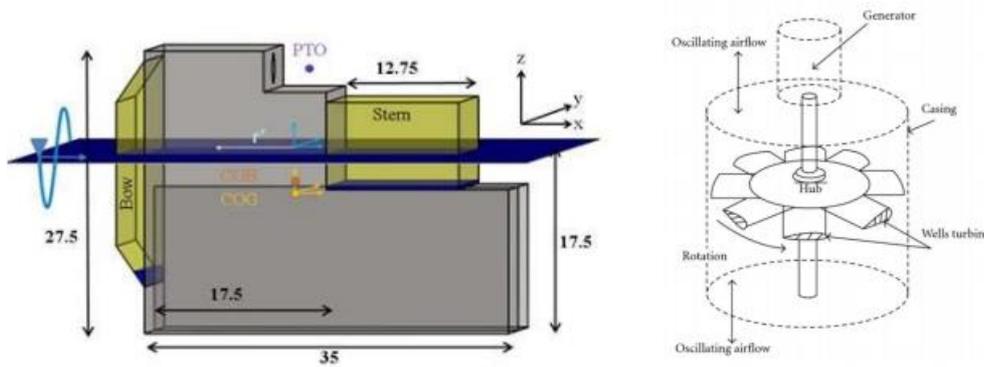


Figura 21: Modelo RM6 [27].

Al igual que los dos convertidores anteriores tenemos que usar el programa SAM para obtener la tabla para calcular la potencia, esta se encuentra en la Figura 22.

Power Matrix (kW)

		Te = wave energy period (s)																					
		0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	
Hs = significant wave height (m)	0.25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	0.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0	0
	1.25	0	0	0	0	0	0	0	4.3	14.7	19	21.3	18.8	16.2	13	10.1	7.6	5.7	4.2	3.1	0	0	
	1.75	0	0	0	0	0	0.2	35.2	68.4	75.1	70.9	64.1	55.3	46.6	38.3	30.8	24.1	18.9	14.8	11.6	0	0	
	2.25	0	0	0	0	0.1	26.6	128.3	145.6	142	132.2	120	106.1	91.4	76.1	61.2	48.8	39.2	31.4	25.1	0	0	
	2.75	0	0	0	1.6	0.6	121.3	215.7	229	219.9	202.5	182	159.3	137.2	117	98.4	81.5	65.3	52.4	42	0	0	
	3.25	0	0	0	19.8	36.5	212.4	288.1	321.7	305	278.8	250.2	220.9	188.3	159.8	133.6	110.3	93.2	77.3	64.1	0	0	
	3.75	0	0	0	46.3	120.2	212.4	288.1	338.7	350.5	348.8	319.8	278.8	237.8	202.8	170.4	140.7	119.9	101.5	86	0	0	
	4.25	0	0	0	84.7	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	330.3	337.8	284.8	233.4	186.4	149.2	129.5	112.8	98.3	0	0	
	4.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	349.9	289.4	241.1	196	160.2	137.8	118	101.1	0	0	
	5.25	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	309.3	261.9	206.1	172.1	146.6	123.5	104	0	0	
	5.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	216.8	184.8	156	129.2	107	0	0	
	6.25	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	205.4	189.1	169.8	153.4	145.6	0	0	
	6.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	205.9	193.4	181.1	171.3	166.9	0	0	
	7.25	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	207.9	198.3	189.8	183.5	180.7	0	0	
	7.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	209.9	202.5	196.3	191.9	190	0	0	
8.25	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	211.4	205.7	200.9	197.6	196.2	0	0		
8.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	212.5	207.8	204	201.4	200.3	0	0		
9.25	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	213.2	209.1	205.8	203.5	202.6	0	0		
9.75	0	0	0	114	142.3	212.4	288.1	338.7	350.5	344.8	339.7	350.1	276.1	217.7	213.4	209.6	206.5	204.4	203.5	0	0		

Figura 22: Tabla de potencia para RM6 obtenida del SAM.

Al igual que para los convertidores anteriores usaremos el programa SAM para ver los diferentes costes que tiene esta tecnología, el coste del dispositivo es de 606.056.832 \$, el balance del Sistema (BOS) es 95.442.048 \$, el coste financiero es de 61.475.072 \$ y por último el coste de operación y mantenimiento es de 6.386.259 \$. El desglose de los diferentes costes es igual que en las tecnologías anteriores.

## 4.2 Cálculo de la energía.

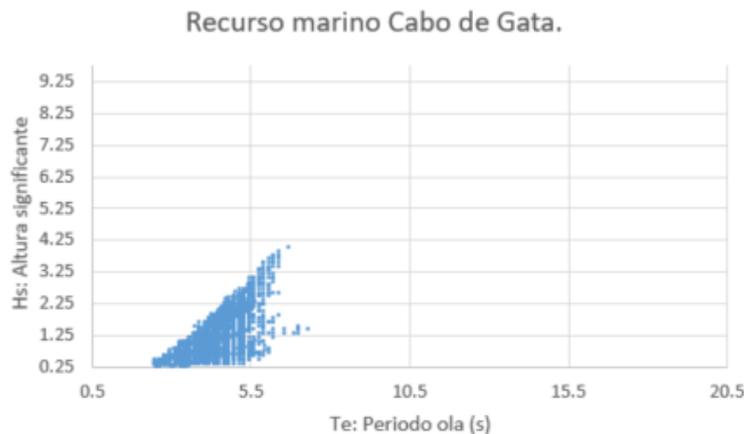
Para calcular la potencia lo haremos de igual manera para los tres convertidores, a partir de los datos obtenidos anteriormente mediante Puerto del Estado y las tablas de potencia mostrada en el apartado anterior.

De los datos oceánicos obtenidos solo usaremos dos; la altura significativa (m) y el periodo medio (s); que en nuestra tabla son la columna 2 y 3. Para sacar el valor de potencia, debemos buscar en las tablas de potencia el valor de la altura para las filas y en las columnas el valor del periodo y así obtener la energía que produciría ese convertidor en la hora determinada.

Para poder hacerlo para todas las horas del año usaremos el programa Excel, en este debemos usar la función “COINCIDIR”, para así poder buscar tanto en las filas como en las columnas un valor igual o inferior del valor de los datos de Puerto del Estado. Para el caso de buscar las filas, es decir, la altura significativa hay un problema, ya que en muchas franjas horarias esta altura es menor a 0.25, que es el valor mínimo que nos ofrece la tabla de potencia; así que para el caso de filas además hay que usar la función “SI” y así cuando la altura sea menor que 0.25 la potencia producida será 0. Y ya finalmente para poder sacar la potencia de la tabla usaremos la función “INDICE”, la cuál dando el número de fila y de columna nos da el valor que corresponde y así finalmente obtener la energía producida en esa hora.

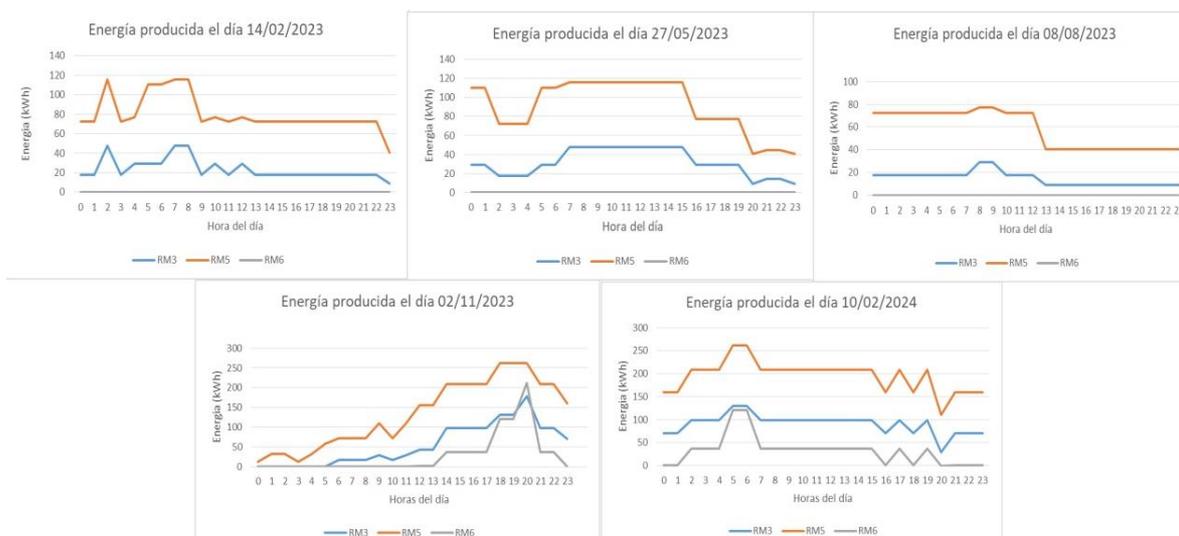
#### 4.2.1 Cabo de Gata.

A partir de los datos de altura significativa y periodo medio haremos una tabla de dispersion para así poder hacer un análisis previo del recurso que disponemos en esta zona. Elegimos este tipo de gráfico ya que nos muestra a simple vista la frecuencia en la cuál ocurre los sucesos.



*Figura 23: Recurso marino en Cabo de Gata.*

Como podemos ver comparando la Figura 23 con las tablas de potencia de los tres convertidores (Figura 18, Figura 20 y Figura 22), que la mayor parte del tiempo los datos oceánicos se encuentra lejos de las zonas, respecto la altura y el periodo, donde se produce energía a su potencia nominal. Para ningún convertidor operará prácticamente potencia nominal.



**Figura 24:** Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Cabo de Gata.

Lo primero a decir del resultado es que gran parte de los días la producción de los tres convertidores ha sido o prácticamente cero, como se puede ver al menos en el caso de RM6 en la Figura 24 en las gráficas de los días 14/02/2023, 27/05/2023 y 08/08/2023. Se ve también a simple vista que el convertidor RM5 es el que más energía produce y el más constante, esto se puede ver en la Figura 18, ya que con una frecuencia igual o mayor a 4.5 segundos, con muy poca altura significativa puede producir valores similares a la potencia nominal, al contrario que pasa con los convertidores RM3 y RM6 que necesitamos una frecuencia considerable para que con una altura relativamente baja pueda producir valores cercanos a los nominales. También decir que lo que sucede en la Figura 24 en el día 02/11/2023 que la producción del convertidor RM6 supere el valor de la producción del RM3 es posible ya que la potencia nominal de RM6 es mayor que RM3 pero para que ello suceda debe operar en condiciones nominales.

El convertidor RM3 no es una mala alternativa entre las tres opciones que tenemos ya que cuando produce lo hace de manera constante aunque los valores sean bastante alejados a los valores nominales. El convertidor RM5 es el que más produce de los tres de manera más constante así que sería la alternativa que cogería. Por último el convertidor RM6 prácticamente no produce nada y si es cierto que como he mencionado antes puede llegar a producir más que el RM3, pero en la ubicación en la que estamos no se dan la situación de operación nominal.

Para concluir entre los tres convertidores que hemos estudiado elegiría el RM5 por que prácticamente siempre produce aunque algunos días valores muy bajos y otros no produce. También quiero recalcar que ninguno prácticamente opera a valores nominales y considero que se debería de usar otras tecnologías que estuviesen especialmente diseñadas para las condiciones de la ubicación de la boya de Cabo de Gata.

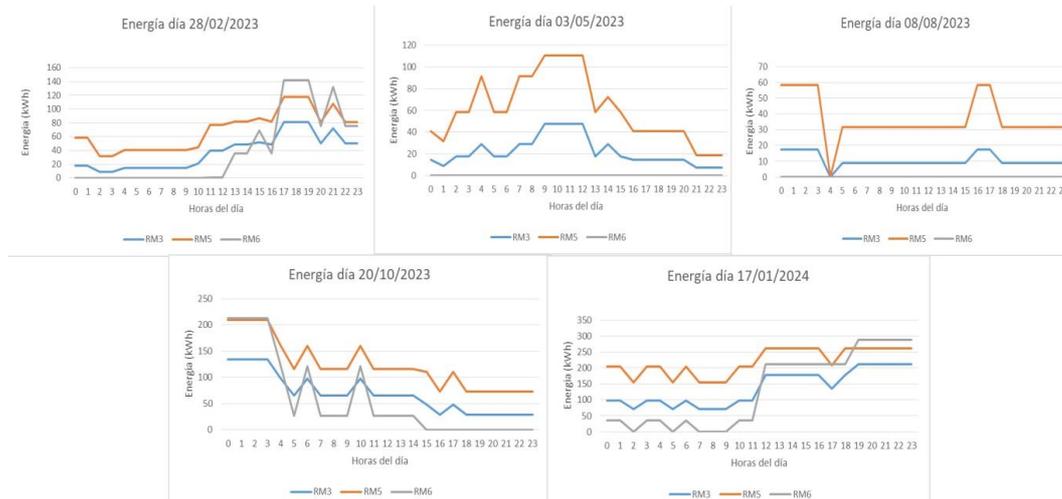
## 4.2.2 Golfo de Cádiz

Al igual que para el caso anterior debemos hacer un gráfico de dispersión con el recurso disponible que tenemos en la ubicación de la boya del Golfo de Cádiz, a partir de los datos de Puerto del Estado y así podemos hacernos una primera idea del recurso disponible. Esto lo observamos en la Figura 25.



**Figura 25: Recurso marino Golfo de Cádiz.**

Comparando la Figura 25 con las tablas de potencia de las tres tecnologías (Figura 18, Figura 20, Figura 22), podemos ver que la mayor parte del tiempo operará fuera de la zona de operación en condiciones de la potencia nominal, a pesar de esto en comparación con el recurso marino del Cabo de Gata, hay más recurso en la zona de operación nominal.



**Figura 26: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Golfo de Cádiz.**

Al igual que el caso de Cabo de Gata aquí también algunos días la producción de energía es nula o valores muy bajos a pesar de esto como hemos mencionado antes el Golfo de Cádiz se adapta mejor las condiciones oceanográficas a los valores nominales de los convertidores, pero no quita los valores nulos algunos días. El caso del convertidor RM6 es el que más produce, pero la mayor parte del tiempo su producción es nula, como podemos ver en la Figura 26 en las gráficas de los días 03/05/2023 y 08/08/2023; en el resto de días que están representado en la Figura 26 una gran parte del tiempo tiene producción nula o valores similares, a pesar de esto hay momentos que llega a ser respecto las otras tecnologías la que más produce. El convertidor RM5 es el que más produce de manera más constante en el tiempo, esto no quita que fuera de los días que están representado hay días que no produce, pero por lo general produce de manera constante pero casi siempre valores alejados a la potencia nominal. El convertidor RM3 como norma general sigue la tendencia del RM5 pero con menor potencia y además tiene más días que no produce nada de energía.

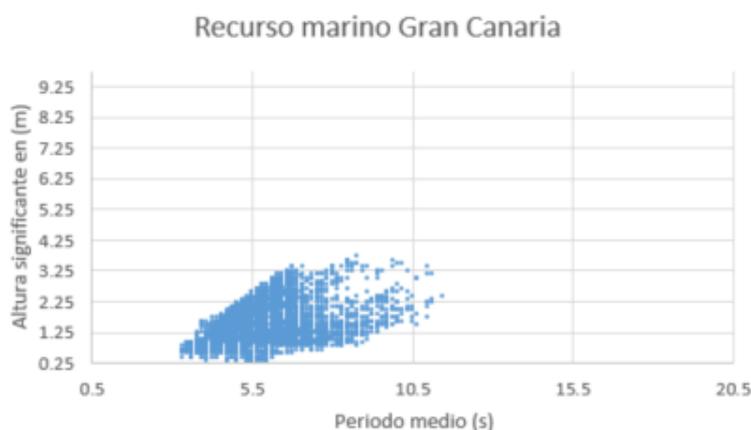
En resumen el convertidor RM3 tiene una producción más o menos constante con valores bastantes bajos, alejados de su potencia nominal de 286 kW y también muchos días que no produce. El convertidor RM5 es el que más produce y de manera constante es de destacar que incluso en algunos momentos que los otros dos convertidores no producen este produce muy poca energía, aunque también hay momentos donde no produce, también comentar que la mayor parte del tiempo este produce valores alejado a su potencia nominal de 360 kW.

El convertidor RM6 la mayor parte del tiempo como se ha mencionado antes la mayor parte del tiempo no produce así que este no lo elegiría.

Para terminar de analizar esta ubicación, elegiría el convertidor RM5 por lo dicho anteriormente, a pesar de esto este convertidor no se adapta del todo bien a nuestra ubicación porque opera la mayor parte del tiempo fuera del rango de potencia nominal, aunque en comparación con la zona del Cabo de Gata esta tecnología se adapta mejor al Golfo de Cádiz. Igualmente considero que se debería de instalar otro tipo de convertidor que se adapte mejor a la zona.

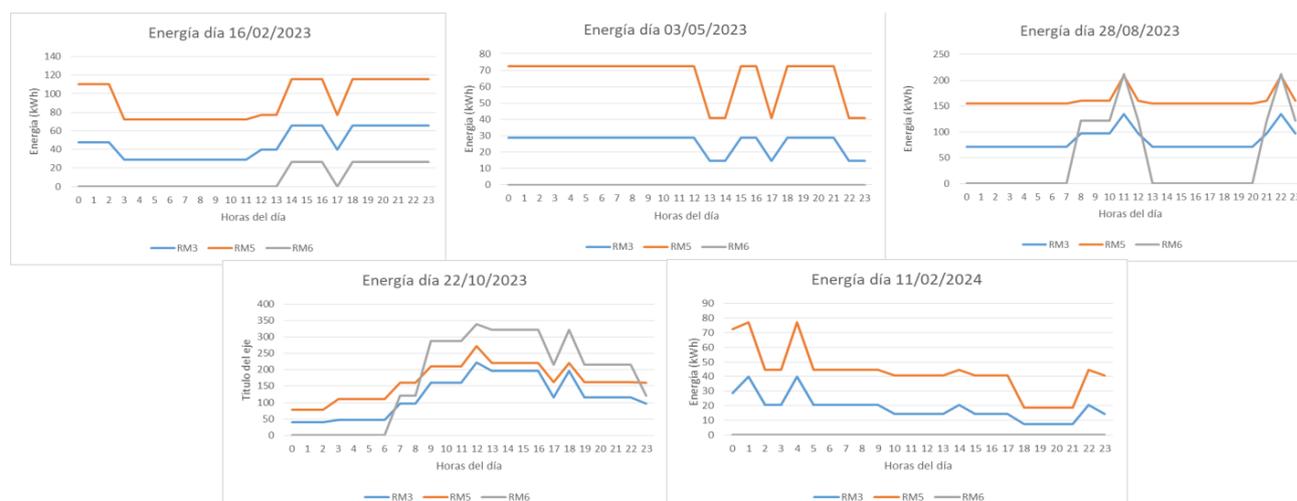
### 4.2.3 Gran Canaria.

Haremos primero nuestra gráfica de dispersión para así hacer un análisis previo del recurso marino, a partir de los datos obtenidos de Puertos del Estado, en la boya de Gran Canaria situado al norte de esta isla, se puede observar en la Gráfica 5.



**Figura 27: Recurso marino Gran Canaria.**

La comparación de la Figura 27 con tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), nos permite ver que el recurso energético disponible se encuentra fuera del rango de operación de la potencia nominal de los tres convertidores.



**Figura 28: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Gran Canaria.**

Lo primero que hay que mencionar es que para los convertidores RM3 y RM5 en esta ubicación, respecto las dos anteriores es la que menos tiempo no produce nada, aunque si que hay franjas de tiempo que no produce nada y cuando producen la mayor parte del tiempo opera en condiciones alejadas a las nominales haciendo que produzca menos energía que para lo que están diseñados estos convertidores. Un ejemplo en ambos casos mencionados, para el caso de producción de energía cercano a los valores nominales es en la Figura 28 el día 22/10/2023 y para el caso de producción alejado a los valores nominales en la misma gráfica los días 16/02/2023,

03/05/2023 y 11/02/2024.

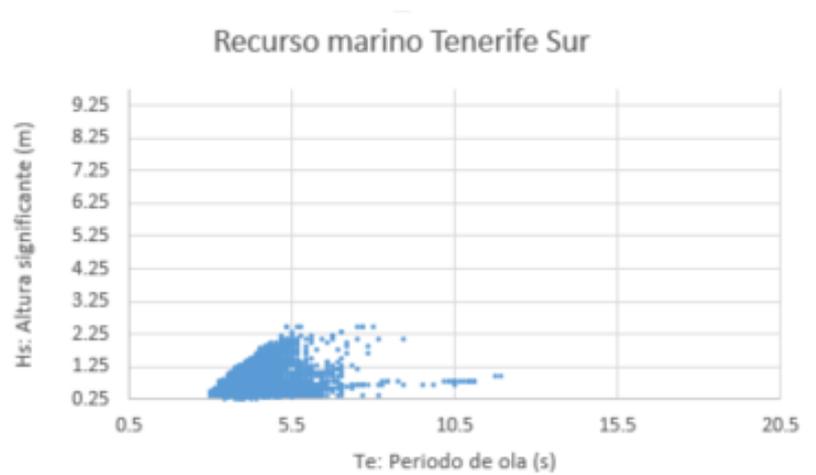
El convertidor RM6 es el que menos produciría ya que la mayor parte del tiempo su producción es cero como se puede ver en la Figura 28 los días 03/05/2023 o 11/02/2024. También comentar de este convertidor el suceso de la Figura 28 del día 22/10/2023, que supera con creces los valores de producción de los otros dos convertidores, esto se justifica analizando la tabla de la Figura 20 que prácticamente se llega a los valores de producción nominal a partir de una altura significativa de 3.25 m y un periodo superior de 7.5 segundos y viendo la Figura 27 se logra llegar, en muy pocas ocasiones sucede.

En resumen el convertidor RM3 tiene una producción más o menos constante pero con valores muy bajos. El RM5 es el que produce a mayor constancia y valores más altos. Y por último el RM6 produce muy poco y es en determinados picos con valores muy altos, pero esto sucede muy poco.

En esta ubicación elegiría el convertidor RM5 por lo dicho anteriormente, aunque en este caso digo lo mismo que en los casos anteriores que si pudiera tener una tecnología más apta en esta ubicación la usaría. Y por último decir que esta es la ubicación que más energía produce entre las cuatro que vamos a estudiar.

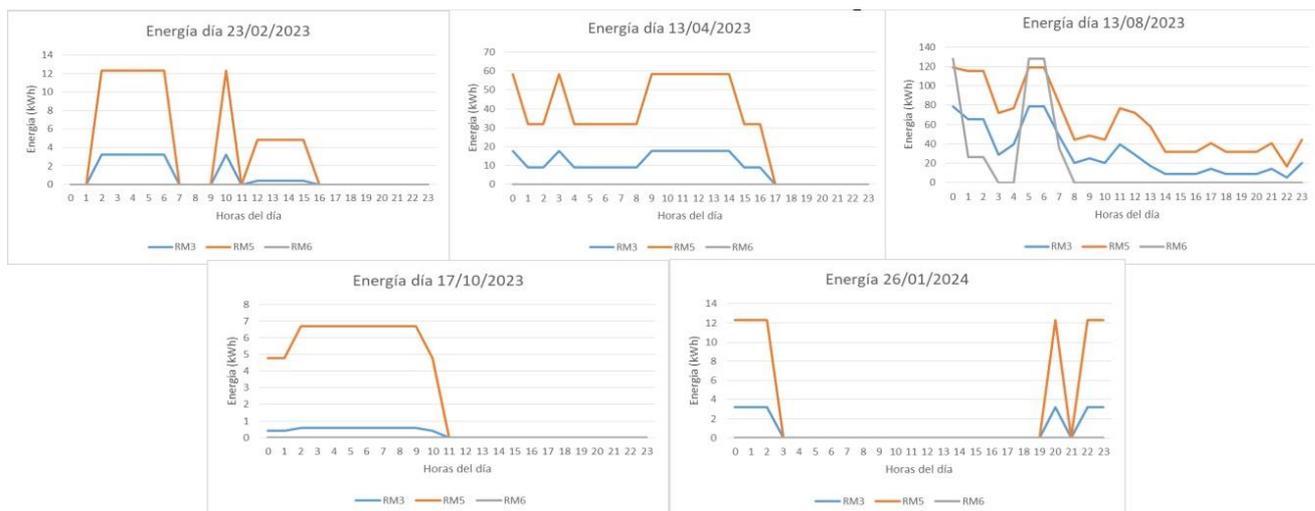
#### 4.2.4 Tenerife Sur

Para empezar haremos la gráfica de dispersión para así hacer un análisis previo del recurso marino, a partir de los datos obtenidos de Puertos del Estado, para la ubicación que de la boya de Tenerife situado al sur de esta isla, se puede observar en la Figura 29.



*Figura 29: Recurso marino Tenerife Sur:*

La comparación de la Figura 29 con tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), nos permite ver que el recurso energético disponible se encuentra muy lejos de los valores nominales, ya que para llegar a valores de potencia cercano al nominal necesitamos valores de frecuencia superiores a 4.5 segundos, que esto se cumple en la mayor parte de los casos y una altura más o menos superior a 4.25 metros dependiendo del convertidor, que este es el criterio que no se cumple.



**Figura 30: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Tenerife Sur.**

Lo primero hay que comentar lo que ya se ha mencionado anteriormente en esta ubicación la altura de ola significativa es muy pequeña por lo que la mayor parte del tiempo los tres convertidores no produce energía o valores muy alejado a los nominales como se puede ver en la Gráfica 8 en todos los días menos el día del 13/08/2023. El día de la Figura 30 a destacar es el día 13/08/2023 que muestra un día que el valor de la altura significativa es suficiente para generar valores altos de energía a pesar de que estos están alejados a los valores nominales, ya que el recurso marino en esta zona es insuficiente para que estos tres convertidores puedan aportar energía en sus valores nominales. El resto de días de la Figura 30 muestran valores nulos de producción o demasiado bajos.

El convertidor RM5 es el que más produce y más constantes, aunque la mayor parte del tiempo no genera nada de energía. El RM3 es el segundo que más energía produce y sigue una tendencia similar al RM5 con valores más bajos. El RM6 prácticamente no genera nada de energía a excepción de algunos días como el que se ve en la Figura 30 el día 13/08/2023 que incluso es el que más produce por la misma razón que se explico en la ubicación de Gran Canaria, a pesar de est la mayor parte del tiempo no produce nada.

Si tuviese que seleccionar un equipo para esta ubicación sería el convertidor RM5, aunque la verdad que para las características de esta zona no sería bueno usarlo, así que si pudiese usaría otro que se adaptase mejor a esta zona con una altura de ola más baja.

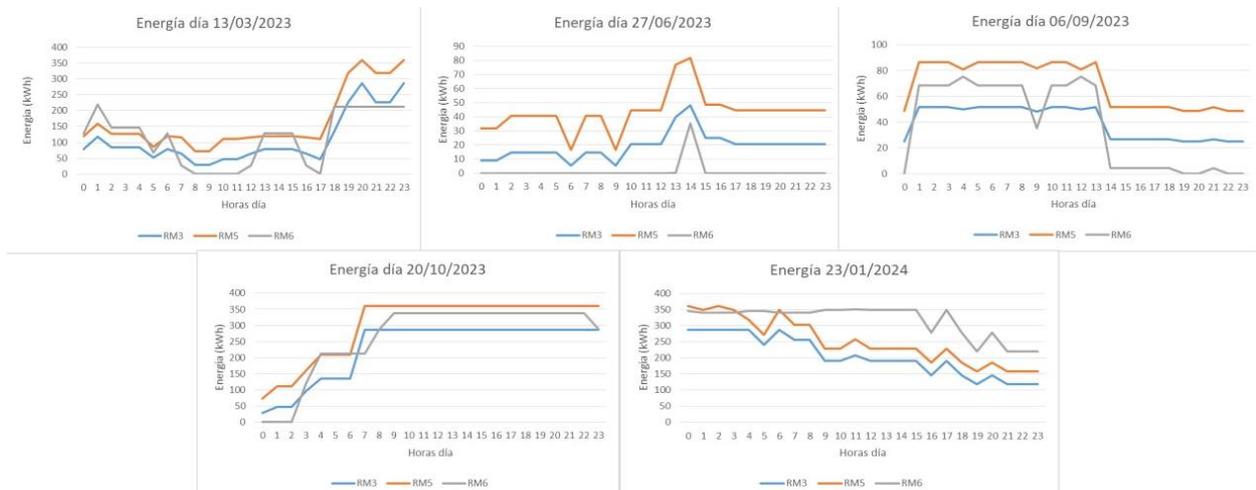
#### 4.2.5 Bilbao-Vizcaya

Lo primero a realizar al igual que en todos los casos es el gráfico de dispersión para el análisis preliminar del recurso marino, para esta ubicación. Se observa en la Figura 31.



**Figura 31: Recurso marino Bilbao-Vizcaya.**

A primera vista comparando la Figura 31 con tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), se ve que el recurso energético disponible se encuentra, a diferencia de los casos anteriores, en ciertos momentos en la franja de funcionamiento nominal. Aunque también se puede ver que hay momentos muy lejos de los valores nominales.



**Figura 32: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación de Bilbao-Vizcaya.**

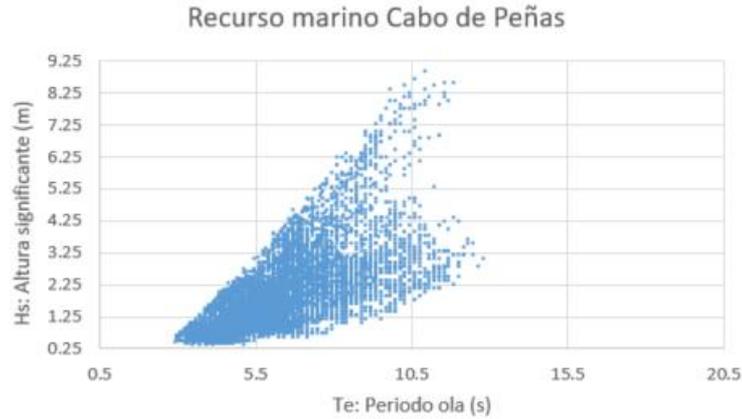
Lo primero a comentar de la Figura 32 que en esta ubicación si se llega en ciertos momentos a alcanzar valores nominales de funcionamiento de los tres convertidores, como se puede observar en lo día 13/03/2023, 20/10/2023 y 23/01/2024. También se ve en la Figura 32 lo mencionado anteriormente, que hay días que no se acerca los valores a los nominales del convertidor, como son los días 27/06/2023 y el 06/09/2023. Es importante mencionar que los meses más calidos, verano y primavera, son los meses que más se aleja la producción de energía de los WECs de los valores, mientras que los meses más frios, invierno y otoño, los valores de producción de energía se acerca más a los valores nominales. Esto se puede deber a las condiciones climáticas más adversas en invierno y otoño que produce mayor cantidad de viento que es la principal razón de producción del oleaje.

Analizando por separado los tres convertidores, se puede ver que el RM3 tiene una producción similar al RM5 pero de menor potencia, además a destacar que cuando se dan las condiciones para que se opere a valores nominales, es el que por diseño menos energía produce. El RM6, los valores nominales de producción de energía, tienen mayor valor que el modelo RM3, siendo este 286 kW y el RM6 338,7 kW, a pesar de esto las condiciones para que el RM6 produzca a valores nominales sucede muy poco. Finalmente el modelo RM5 es el que su potencia cuando funciona en condiciones nominales es mayor, 360 kW, siendo también el que produce energía de manera más constantes, de estos tres convertidores estudiados.

En resumen si tuviese que elegir alguno de los tres convertidores sería el RM5, pero las condiciones de la zona donde está la boya hacen que la mayor parte del año produzca valores alejados de los valores nominales, a pesar de esto, respecto las otras cuatro ubicaciones estudiadas es la primera que durante bastante tiempo alcanza los valores nominales de producción de energía y además los valores cuando producen fuera del rango nominal no son valores tan alejados de los nominales. Concluyendo yo usaría esta tecnología complementada con fotovoltaica u otra tipo de fuente renovable para cubrir los monetos donde produzca menos u otros convertidores que se adapten mejor a la zona.

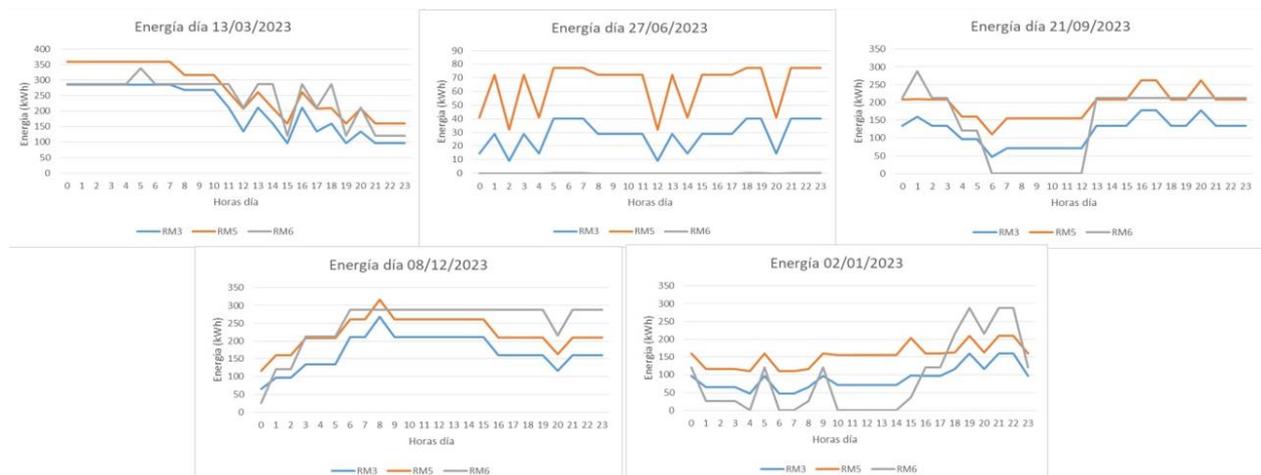
#### 4.2.6 Cabo de Peñas

Al igual que en todos los casos, realizaremos la tabla de dispersión de los datos de la altura significativa y el periodo de las olas, obtenidos de los datos de Puertos del Estado, para realizar un análisis preliminar. Esta gráfica se observa en la Figura 33.



**Figura 33: Recurso marino Cabo de Peñas.**

A simple vista podemos ver con la comparación de la Figura 33 con tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), se ve que el recurso energético, al igual que en la ubicación Bilbao-Vizcaya, se encuentra parte del recurso en la zona en la que los convertidores funciona en condiciones nominales. Al igual también del caso Bilbao-Vizcaya hay parte que funciona en zonas donde su producción se aleja bastante de los valores nominales.



**Figura 34: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Cabo de Peñas.**

En la Figura 34 podemos ver representados días característicos de esta ubicación. A destacar de esta figura es que hay día que produce los valores de energía para los que están diseñados los convertidores como es el caso de los días 13/03/2023, 21/09/2023, 08/12/2023 y 02/01/2024. También hay que decir que hay días que no llega a los valores nominales como es el caso del día 27/06/2023, además, los días representados que llegan a valores nominales, lo hace de manera puntual, es decir, que la producción de energía no es uniforme. Aquí también sucede que cuando las condiciones climáticas son más adversas es cuando más energía produce, al igual que la ubicación anterior, Bilbao-Vizcaya.

A la hora de analizar los tres convertidores por separado podemos ver que sucede lo mismo que en la ubicación de Bilbao-Vizcaya pero con una producción menor de energía además de una mayor irregularidad. En resumen el convertidor RM6 es el que menos produce ya que las condiciones a que funcione en sus valores nominales suceden muy poco, el convertidor RM5 es el que más produce y de manera más regular y por último el convertidor RM3 produce con la misma tendencia que el RM5 pero con menor potencia.

Para concluir si tuviera que elegir un convertidor sería el convertidor RM5, pero si en la ubicación anterior mencionaba que a pesar de producir momentos energía en sus condiciones de diseño pero tenía huecos de producción, en esta ubicación los huecos de producción son más grande. Así que considero que habría que

buscar otra tecnología que se adaptase mejor a esta zona o usar esta tecnología con otras fuentes de energía para cubrir estos huecos de producción.

#### 4.2.7 Villano-Sisargas

Lo primero a realizar es la tabla de dispersion, para analizar los datos de Puertos del Estado, estos datos son la altura significativa y el periodo de las olas. Esta gráfica se observa en la Figura 35.



Figura 35: Recurso marino Villano-Sisargas.

Lo primero que podemos decir de la comparación de la Figura 35 con las tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), se ve que el recurso energético, al igual que en las ubicaciones Bilbao-Vizcaya y Cabo de Peñas, se encuentra parte del recurso en la zona en la que los convertidores funcionan en condiciones nominales y también hay otra parte que funciona en zonas donde su producción se aleja bastante de los valores nominales.

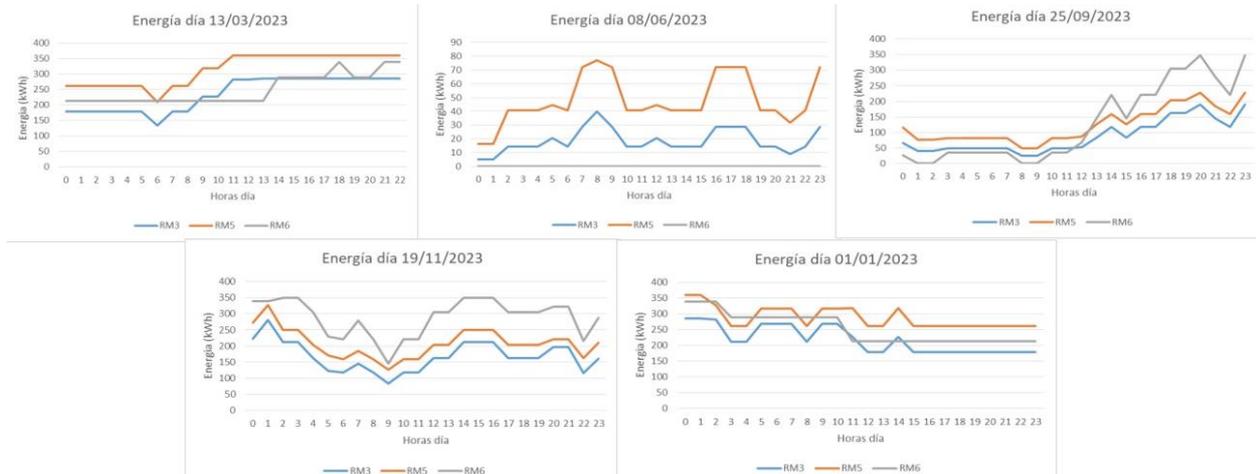


Figura 36: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Villano Sisargas.

En la Figura 36 podemos ver la posible producción de energía de las tres tecnologías en distintos días. Lo primero a destacar que los días que menos energía son los días donde las condiciones climáticas son más favorables, debido a que hay menos viento, esto sucede principalmente en verano, se puede ver en el caso del día 08/06/2023, que produce energía con valores alejados de los valores nominales, también hay que destacar que los valores de producción alejados a los nominales son mucho mayores que en los casos de las ubicaciones con el Golfo de Cádiz, Cabo de Gata, Gran Canaria y Tenerife Sur. En los días con condiciones climáticas más desfavorables es cuando más produce, se puede ver en la Figura 36 en los días 13/03/2023, la tarde del día 25/09/2023, el día 19/11/2023 y el 01/01/2023.

Al analizar los tres convertidores por separado podemos ver que sucede lo mismo que en las ubicaciones de Bilbao-Vizcaya y Cabo de Peñas, pero con mayor producción de energía además de tener menos huecos en su producción. En resumen el convertidor RM6 es el que menos produce ya que las condiciones a que funciona en

sus valores nominales suceden muy poco, el convertidor RM5 es el que más produce y de manera más regular y por último el convertidor RM3 produce con la misma tendencia que el RM5 pero con menor potencia.

A la hora de seleccionar un convertidor para esta ubicación elegiría el RM5, ya que es el que mejor se adapta a las condiciones climáticas de la zona. A pesar de esto existe momento donde produce mucho menos de lo esperado, siendo en esta ubicación donde menos huecos de producción hay, pero considero que se debería complementar con otra fuente de energía renovable.

#### 4.2.8 Cabo Silleiro

Al igual que en todos los casos anteriores debemos realizar es la tabla de dispersion, para analizar los datos obtenidos de Puertos del Estado, en esta ubicación. Esta gráfica se observa en la Figura 37.



Figura 37: Recurso marino Cabo Silleiro.

La comparación de la Figura 37 con las tablas de potencia de los convertidores (Figura 18, Figura 20, Figura 22), se ve que el recurso energético, al igual que en las ubicaciones Bilbao-Vizcaya, Cabo de Peñas y Villano-Sisargas. Se encuentra parte del recurso en la zona en la que los convertidores funcionan en condiciones nominales y también hay otra parte que funciona en zonas donde su producción se aleja bastante de estos valores.

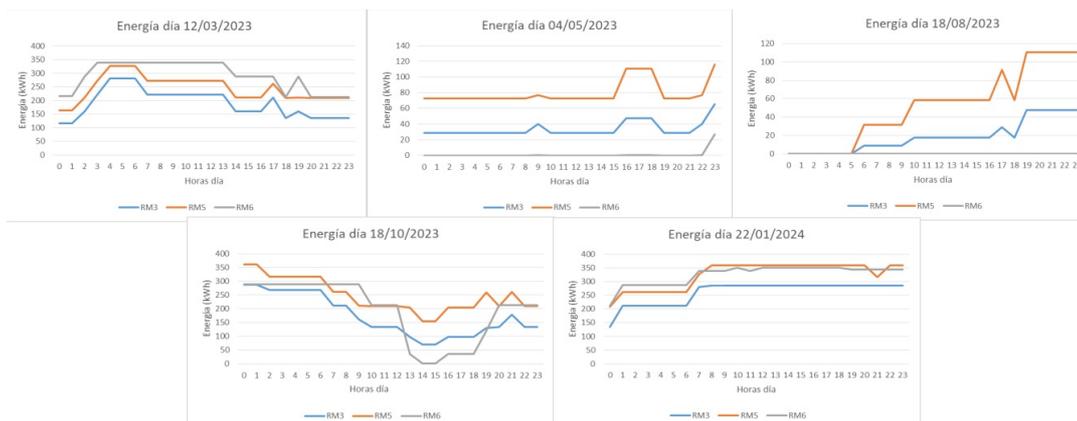


Figura 38: Conjunto de gráficas que representan la producción de energía en cinco días para las tres tecnologías para la ubicación Cabo Silleiro.

Viendo la Figura 38 podemos observar lo mismo que hemos visto en las ubicaciones de Bilbao-Vizcaya, Cabo de Peñas y Villano-Sisargas, hay días que produce energía en su rango nominal como es el caso del día 12/03/2023, 18/10/2023 y el día 22/01/2024, o como los días 04/05/2023 y 18/08/2023 que produce energía con valores alejados a los valores nominales.

La tendencia de los tres convertidores es la misma que tienen en las ubicaciones Bilbao-Vizcaya, Cabo de Peñas y Villano-Sisargas. A destacar de estas últimas cuatro ubicaciones que las que más producen y con menos huecos de producción son Villano-Sisargas y Cabo Silleiro.

A la hora de seleccionar uno de los tres convertidores estudiados sería el convertidor RM5, porque es el que mejor se adapta a las condiciones de la zona, pero aquí también vuelvo a mencionar que se debería usar otra fuente de energía para compensar los huecos.

### **4.3. Análisis de resultados.**

En este capítulo una vez explicado el funcionamiento de nuestros tres convertidores a estudiar que son el modelo RM3, el modelo RM5 y el modelo RM6, se han usado las tablas de producción de potencia de estos convertidores y se ha establecido la producción de energía anual en distintas ubicaciones.

Las ubicaciones donde hemos realizado los estudios de producción energética son boyas donde se hacen mediciones ambientales y las ubicaciones son Cabo de Gata, Golfo de Cádiz, Gran Canaria, Tenerife Sur, Bilbao-Vizcaya, Cabo de Peñas, Villano-Sisargas y Cabo Silleiro.

En todas ellas mediante el uso de la hoja de cálculo excell, como se explica en los apartados anteriores de este capítulo, calcularemos la energía producida anualmente a partir de los datos de altura significativa de ola y periodo obtenidos en el capítulo 2.

Como norma general estos convertidores estudiados no se adaptan bien a las ubicaciones funcionando siempre por debajo de su potencia nominal la mayor parte del tiempo, destacando principalmente el convertidor RM5, que en todas las ubicaciones es el que más energía produce y más se acerca al funcionamiento en potencia nominal en comparación con los otros dos WEC. A destacar las ubicaciones de la boya de Villano-Sisargas y la boya de Cabo Silleiro, ya que de las ocho estudiadas son las que más energía produce. Por tanto lo que haremos en los apartados siguientes será estudiar como adaptar estos convertidores estudiados a estas dos ubicaciones y ver cual de estas dos nos interesa más.

# 5 SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN

## 5.1 Principio teórico del escalado

Para escalar un convertidor usaremos la ley de Froude, que se puede ver desarrollada en la Figura 39.

$$Fr = \sqrt{\frac{\text{Inertia forces}}{\text{gravity forces}}} = \frac{U}{\sqrt{gL}}$$

$$\frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{U_f}{\sqrt{gL_f}} \Rightarrow U_f = U_m \sqrt{S}$$

where:

- $S = L_f/L_m =$  scaling ratio, requiring geometrical similarity (-)
- $U =$  velocity (m/s)
- $g =$  gravitational acceleration (m/s<sup>2</sup>)
- $L =$  dimension (m)
- Subscripts m and f stand for model and full-scale

*Figura 39: Ley de escalamiento de Froude.*

Los resultados de aplicar esta ley en los convertidores se puede observar en Tabla 4.

Parameter	Unit	Scaling ratio	Example of scaling by 1:20
Length	m	S	1 → 20
Area	m <sup>2</sup>	S <sup>2</sup>	1 → 400
Volume	m <sup>3</sup>	S <sup>3</sup>	1 → 8000
Time	s	S <sup>0.5</sup>	1 → √20
Velocity	m/s	S <sup>0.5</sup>	1 → √20
Force	N	S <sup>3</sup>	1 → 8000
Power	W	S <sup>3.5</sup>	1 → 35777

*Tabla 4: Escala de diferentes parámetros siguiendo la ley de escalamiento de Froude.*

Hay que tener en cuenta al escalar de otros parámetros, que no dominan la inercia, depende de otros parámetros específicos leyes de escalado, lo que significa que, por ejemplo, las dimensiones no se escalan de la misma manera como compresibilidad o como fricción. Esto hace que sea particularmente difícil escalar estos sistemas.

## 5.2 Escalados de los WECs estudiados

En esta parte lo que haremos será estudiar diferentes escalas de los convertidores, para poder ver así como se adapta a las diferentes zonas.

Lo primero que haremos será descartar las zonas donde menos recurso marino hay y estudiar este escalado en las dos zonas donde más potencial energético hay. Por esto las zonas que estudiaremos en esta parte son la zona donde está la boya de Villano-Sisargas y la boya de Cabo Silleiro.

Ahora deberemos adaptar la matriz de potencia según la ley de escalamiento de Froude descrita en la Tabla 1. La altura significativa la escalaremos como el parámetro “Length” de la Tabla 1, el periodo de la ola lo haremos como el parámetro “Time” de la misma tabla también y como último la potencia lo haremos como el parámetro “Power” de la misma tabla.

Realizaremos esto con los tres convertidores en estas dos zonas para ver si escalándolo se adapta mejor a la zona uno u otro. El resultado de la producción total de energía en la ubicación de Villano-Sisargas, se puede observar en la Figura 40.

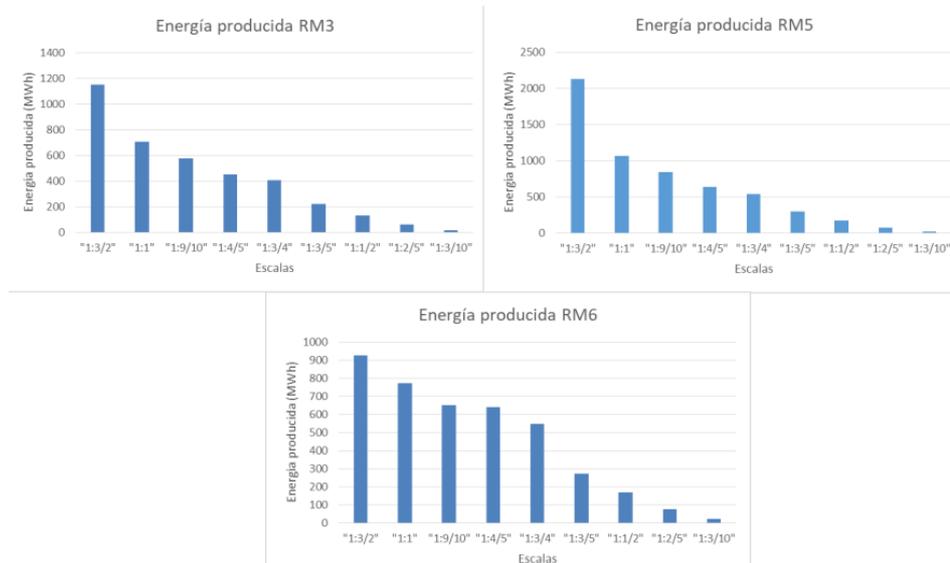
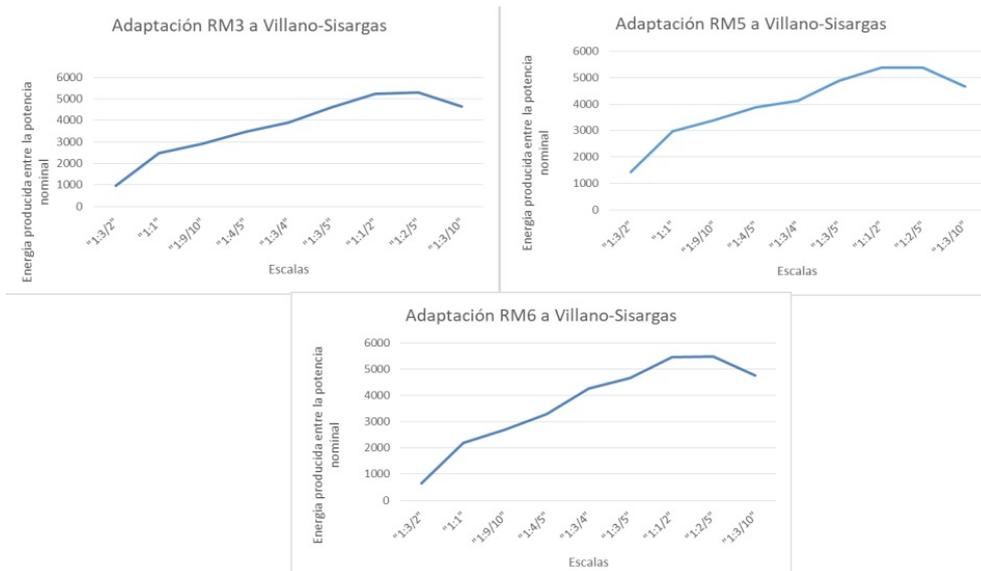


Figura 40: Energía producida a diferentes escalas de los tres convertidores en la ubicación Villano-Sisargas.

La hipótesis original consistía en reducir la escala para que más cantidad de oleaje entre en el rango de funcionamiento nominal, ya que el principal problema de esta ubicación es que operaba principalmente alejado del punto de funcionamiento nominal. Pero como se observa en la Figura 2 conforme más disminuimos la escala menos energía produce, esto se debe que a pesar de que cada vez opere durante más tiempo en condiciones nominales, la energía a la hora de escalarla se reduce de manera exponencial en orden del valor de la escala elevado a 3.5.

En resumen la única manera de que escalar los convertidores produzca más energía es haciéndolo más grande, como es el caso de la escala 1: 3/2, que se observa en la Figura 2. Pero esto ocasiona un problema que en los rangos de olas de nuestra ubicación, operarán conforme se vaya aumentando la escala menos tiempo en el rango nominal.

A continuación veremos que escala se adapta mejor a la zona de Villano-Sisargas. Para esto lo que haremos será dividir la producción de energía entre la potencia nominal en las diferentes escalas, haciendo que las horas que produzcan a potencia nominal este valor sea 1, y las horas que operen por debajo del rango nominal valdrán menos. Así sumando todas las horas del año veremos que en la escala que esta suma sea mayor es la que mejor se adapta a esta zona. Todo esto se verá en la Figura 41.



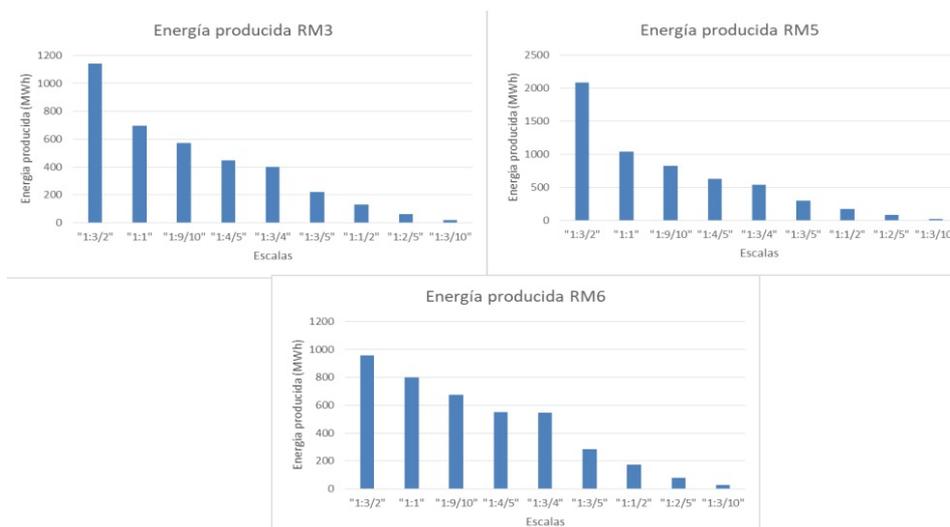
**Figura 41: Energía producida entre la potencia nominal a diferentes escalas en la ubicación de Villano-Sisargas.**

Como resultado de lo descrito anteriormente obtenemos, que para esta ubicación el modelo RM3 la escala que mejor se adapta es 1: 2/5 con una potencia nominal de 11.58 kW, para el modelo RM5 la escala 1: 1/2 con una potencia nominal de 31.82 kW y por último para el modelo RM6 la escala 1: 2/5 con una potencia nominal de 14.19 kW.

El modelo que elegiría en esta zona sería el RM5, por dos razones, en todas las escalas es el que más produce y también porque la escala en la que se adapta es mayor teniendo una potencia nominal mayor que el resto.

La potencia nominal del convertidor escalado es muy pequeña, la manera en la que se puede solucionar para poder generar energía suficiente para alimentar una instalación sería poniendo múltiples unidades de este.

A continuación haremos lo mismo para la boya de Cabo Silleiro y al igual que el caso anterior lo haremos con los tres convertidores. El resultado de la producción total de energía en esta ubicación se encuentra en la Figura 42.

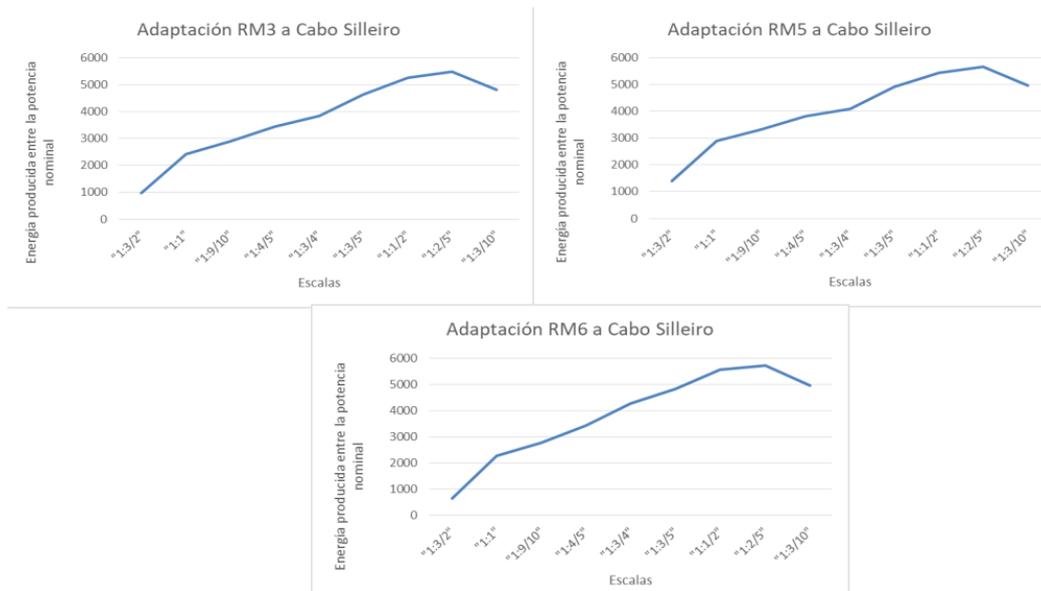


**Figura 42: Energía producida a diferentes escalas de los tres convertidores en la ubicación Cabo Silleiro.**

Al igual que en la ubicación anterior tenemos el problema que conforme mayor sea su escala mayor energía produce pero peor se adapta a la ubicación. También se puede observar en la Figura 42 que en esta ubicación al igual que en la anterior independientemente de su escala el convertidor que más energía produce es el modelo RM5.

Ahora, igual que en el caso de la ubicación anterior veremos que escala se adapta mejor con las condiciones de periodo medio y altura significante en esta ubicación. Lo haremos de igual manera dividiendo la potencia

producida en una hora entre la potencia nominal de cada escala. Esto se puede observar en la Figura 43.



**Figura 43:** Energía producida entre la potencia nominal a diferentes escalas en la ubicación de Cabo Silleiro.

El resultado de este cálculo, es que para esta ubicación los tres modelos la escala que mejor se adapta es la 1: 2/5, con potencia nominal del convertidor RM3 de 11.58 kW, el modelo RM5 de 14.57 kW y el RM6 14.19 kW.

En esta ubicación elegiría el modelo RM5, ya que, es el que más energía produce, a pesar de que en la escala que mejor se adapta tiene una potencia nominal muy baja y para solucionarlo tendría que poner más convertidores.

Para concluir entre estas dos ubicaciones elegiría la de Villano-Sisargas, debido que el modelo RM5 la escala que se adapta en esta ubicación es mayor que en Cabo Silleiro por lo que necesitaría menor cantidad de convertidores para poder suministrar energía a la instalación de ósmosis inversa.

### 5.3 Análisis de resultados.

En este capítulo se ha buscado una ubicación entre las dos que más energía generaban, que eran la ubicación de Cabo Silleiro y la ubicación de Villano Sisargas, sabemos que son las que más energía producen por los cálculos energéticos realizados en el capítulo 4.

Lo primero que hacemos en este capítulo es estudiar como se escala las magnitudes del escalado, estas se pueden ver en la Tabla 4. Las magnitudes a escalar son la altura significativa que su unidad son metros, el periodo de ola que su unidad es segundo y la potencia que la unidad es kilovatio. Para la altura para escalarlo necesitamos multiplicar nuestra magnitud por el factor de escalado, para el periodo necesitamos elevar el factor de escalado a 0.5, es decir hacerle la raíz cuadrada y multiplicarlo por la magnitud a escalar y finalmente la potencia el factor de escalado lo elevamos a 3.5 y lo multiplicamos por la magnitud. Así las tablas de potencia de los tres convertidores, que se pueden ver en la Figura 18, Figura 20 y la Figura 22, las podemos tener en diferentes escalas.

A continuación lo descrito anteriormente lo hemos realizado en distintas escalas que son 1:3/2, 1:9/10, 1:4/5, 1:3/4, 1:3/5, 1:1/2, 1:2/5 y 1:3/10, para los tres modelos de convertidores, RM3, RM5 y RM6. Una vez obtenidas las tablas de potencias de los convertidores es calcular la energía producida anualmente en las dos ubicaciones seleccionadas, y podemos ver que conforme mayor sea la escala más será la energía producida, pero eso no significa que sea la mejor se ha adaptado a la ubicación.

Para ver cual escala se adapta lo que tenemos que hacer es dividir la energía producida cada hora entre la potencia nominal escalada, por lo que si es uno es que funciona a potencia nominal que es lo que queremos, así cuanto mayor sea la suma de esta división mayor será la adaptación de este convertidor a la ubicación.

Los convertidores RM3 y RM6 son los que menos energía produce en las dos ubicaciones, además de no adaptarse igual de bien que lo hace el convertidor modelo RM5, así que para ambas ubicaciones debemos elegirlo. En la ubicación Villano-Sisargas, la escala que mejor se adapta es 1:1/2, con una potencia nominal de 31.82 kW y en la ubicación Cabo Silleiro 1:2/5 con una potencia nominal de 14.57 kW.

La ubicación que elegiremos será Villano-Sisargas, debido que la escala que se adapta mejor a esta ubicación tiene una potencia nominal mayor que en la ubicación de Cabo Silleiro y además la producción de energía es un poco mayor en Villano-Sisargas.

# 6 PREDISEÑO INSTALACIÓN PURIFICADORA DE AGUA

## 6.1. Diseño instalación.

En este apartado nos encargaremos de diseñar con el programa comercial IMS Design, de la empresa Hydranautics, el tubo de presión de nuestra desaladora. Nuestra instalación desalinizadora al encontrarse en la ubicación de la boya de Villano-Sisargas, en Galicia, no tiene mucho sentido que sirva para desalinizar agua del mar para producir agua potable, así que se encargará de filtrar el agua de salida de un proceso terciario de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Los tubos de presión o membranas de ósmosis inversa son membranas semipermeables que separa dos soluciones con distinta concentración en la cual, al aplicar una presión superior a la presión osmótica en el lado de mayor concentración se produce un flujo de agua que va desde la solución con mayor salinidad hasta otra de menor salinidad. Se puede observar en la Figura 44.

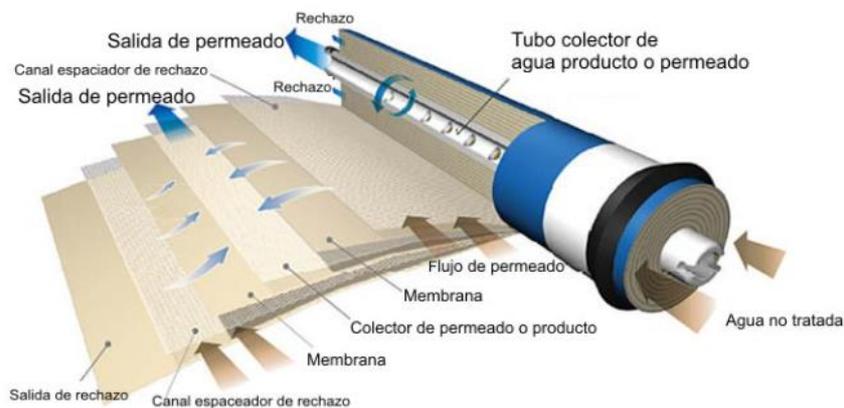


Figura 44: Esquema de un tubo de presión [28].

Como hemos dicho antes, el agua que se va a tratar no es agua de mar sino aguas residuales con la composición que se puede ver en la Figura 45. Esta composición es la típica de este tipo de corrientes de agua que se ha extraído de un estudio dedicado a la composición a este tipo de aguas [29].

Cations			Anions		
	mg/l	mg/l CaCO3		mg/l	mg/l CaCO3
Ca	65,00	162,50	HCO3	0,00	0,00
Mg	7,00	28,69	SO4	217,00	226,04
Na	207,74	451,61	Cl	256,00	361,07
K	62,00	79,29	F	0,00	0,00
NH4	0,00	0,00	NO3	91,00	73,39
Ba	0,000	0,00	PO4	39,00	61,59
Sr	0,000	0,00	SiO2	0,00	
			B	0,00	
Total, meq/l		14,44	Total, meq/l		14,44

Figura 45: Composición del agua a tratar ya introducida en el programa IMS Design.

El tipo de agua que seleccionaremos en el programa es “Waste MF/UF” debido que “MF” significa microfiltración y “UF” significa ultrafiltración ambos son sistemas de pretratamiento que permite la separación mecánica de sólidos suspendidos o disueltos mediante un tamiz. La principal diferencia entre ambos procesos es el tamaño de poro de la membrana, siendo el de “MF” entre 0.1  $\mu\text{m}$  – 10  $\mu\text{m}$  y el de “UF” entre 0,04-0,1  $\mu\text{m}$ . Las razones por la que usaremos este tipo será porque aumenta la protección de las membranas, mejora la calidad de agua en la alimentación y reduce los costs operativos [30].

El esquema de nuestra instalación usaremos “High salinity brackish RO Two stages with interstage booster pump at 28°C” del libro Wilf del apéndice A, que se puede ver en la Figura 46 ya introducido en el programa. Para poder dibujarlo en el programa debemos darle a la opción de “ERD”, ya que en el dibujo del libro también tiene recuperador de energía, además debemos poner dos etapas.

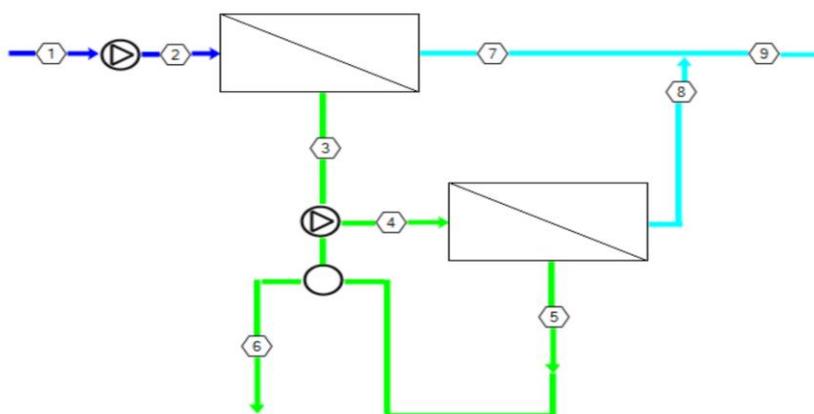


Figura 46: Esquema de nuestro sistema en IMS Design.

En la zona en la que nos encontramos las temperaturas de la corriente variarán de 15°C a 22°C, así que haremos el estudio para estos límites. Además el diseño debe estar hecho para que los límites de concentración y de flux ( $\text{l/m}^2/\text{h}$ ), que es una medida de la cantidad de agua que pasa a través de una superficie de membrana en un período de tiempo determinado que indica el modo de funcionamiento de la membrana, no sean superados para un correcto funcionamiento de la instalación. Para esto deberemos variar el de tanto por ciento de recuperación y el caudal del permeado, que es el agua que ha pasado a través de la membrana y ha sido desalinizada.

Para seleccionar la membrana entraremos en la pestaña “Element type” y seleccionaremos la ESPA2-LD MAX, ya que es la única que su área es de 440 ft, ya que este tipo son las más modernas del mercado. Las opciones de membranas para este caso se pueden observar en la Figura 47. Además decir que en las dos etapas debemos poner en “Elements/Vessel” 8, ya que es el número de membranas que debe tener cada tubo de presión y en “No Vessels” 1, porque en cada etapa solamente hay solamente un tubo de presión.

	Model	Nominal production (gpd)	Salt rejection, %	Element type	Size (in x in)	Area (sq.ft)	Spacer (mil)	Test pressure (psi)	Feed pressure (bar)	Permeate TDS (mg/l)
C	<input type="checkbox"/> ESPA2-LD	10000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	400	34	150		
C	<input checked="" type="checkbox"/> ESPA2-LD MAX	12000	99,60	BWRO Low Pressure High ...	8 X 40	440	34	150		
C	<input type="checkbox"/> LFC3-LD	11000	99,70	BWRO Low Fouling High Re...	8 X 40	400	34	225		

Figura 47 Opciones de membranas para este caso del programa IMS Design.

Para realizar esto debemos saber que el rango de tanto por ciento de recuperación de este tipo de instalación debe estar entre un 80-90% y el flux máximo debe ser 27,2  $\text{l/m}^2/\text{h}$  y el promedio estar en torno a 23,8  $\text{l/m}^2/\text{h}$  esta variable dependerá del caudal de permeado que pongamos. Así que lo primero es con la suposición de un 85% de recuperación ver cual caudal de permeado no nos supera el flux máximo.



Figura 48: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 15°C.

En la Figura 48 podemos ver dos simulaciones del programa ambas con una reuperación del 85% y la temperatura de 15°C. La primera con un caudal de permeado de  $13.6 \text{ m}^3/\text{h}$  cumpliendo el flux máximo y el segundo  $13.7 \text{ m}^3/\text{h}$  no cumpliendo el flux máximo, así que el caudal de permeado a esta temperatura sería de  $13.6 \text{ m}^3/\text{h}$ . Hay que comentar también de la foto que el otro error que aparece es por la concentración que lo solucionaremos con otro tanto por ciento de recuperación.



Figura 49: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C.

En la Figura 49 podemos ver dos simulaciones del programa ambas con una reuperación del 85% y la temperatura de 22°C. La primera con un caudal de permeado de  $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$  cumpliendo el flux máximo y el segundo  $12.6 \text{ m}^3/\text{h}$  no cumpliendo el flux máximo, así que el caudal de permeado a esta temperatura sería de  $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ . Por esto el caudal de permeado de nuestra instalación debe ser de  $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , ya que con 15 °C sigue dentro de los rangos permitidos de flux. A continuación veremos que tanto por ciento de recuperación debemos usar.

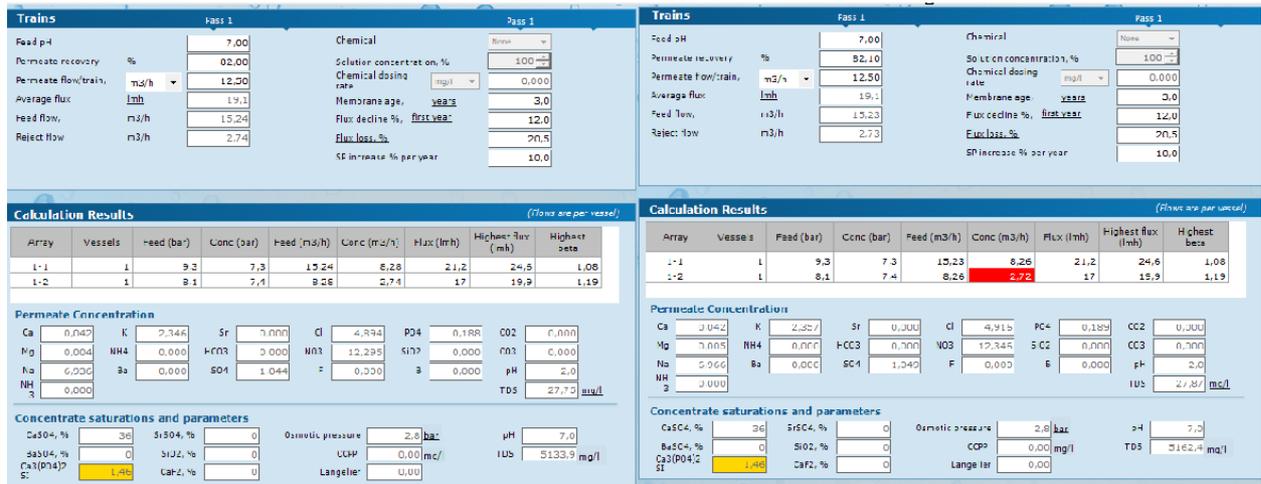


Figura 50: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado.

Simulando el sistema con ambas temperaturas y con caudal de permeado de  $12.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , nos da como resultado que el rango de tanto por ciento de recuperado tiene que estar entre 80% y 82%, como se puede ver en la Figura 50. A pesar de esto podemos ver que seguimos teniendo un fallo que es “Anti Scalant Required”, esto que se refiere que deberíamos añadir un anticrustante para evitar que se incruste elementos químicos en la membrana como el  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$  en nuestro caso.

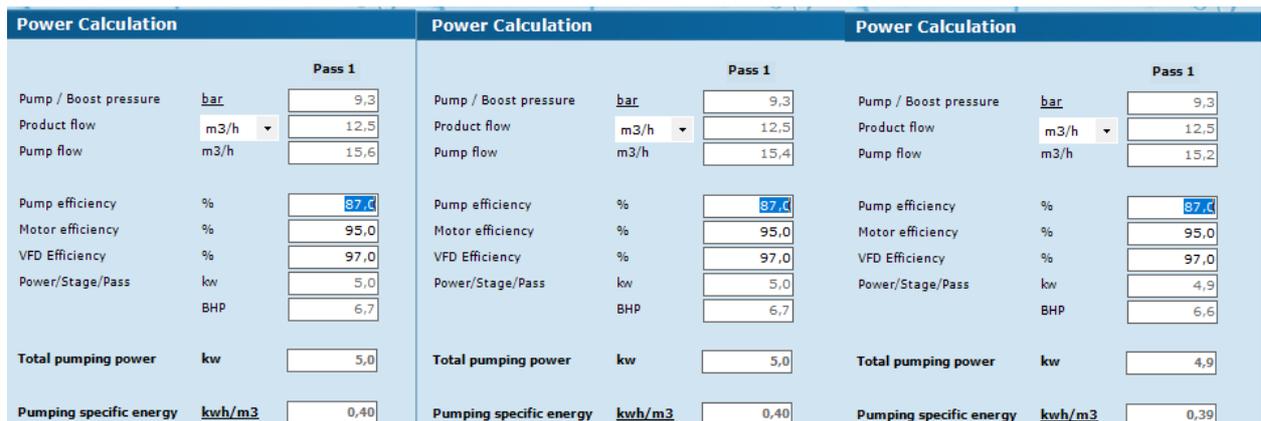


Figura 51: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado en función del consumo específico, siendo de izquierda a derecha simulación con recuperación del 80%, 81% y 82% a 15°C.

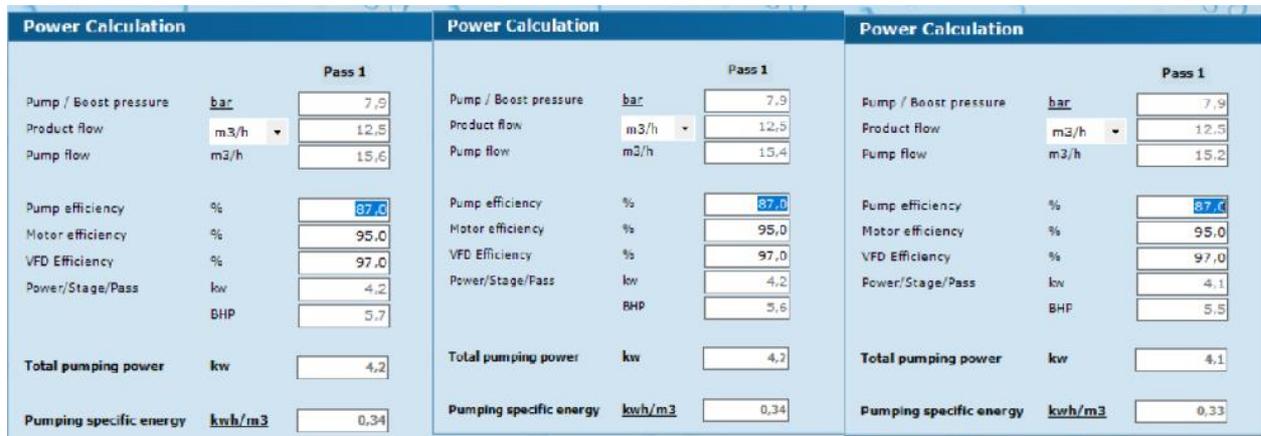


Figura 52: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado en función del consumo específico, siendo de izquierda a derecha simulación con recuperación del 80%, 81% y 82% a 22°C.

Como podemos ver en la Figura 51 y 52 del rango de tanto por ciento de permeado entre 80 y 82% con forma más alta sea el permeado menor será el consumo específico, a pesar que no hay mucha diferencia entre los valores. Cogemos que nuestro tubo de presión opere con un tanto por ciento de recuperación del 82%, con

un consumo específico de  $0,39 \text{ kWh/m}^3$  cuando esté a  $15^\circ\text{C}$  y  $0,33 \text{ kWh/m}^3$  cuando opere a  $22^\circ\text{C}$ .

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	15,2	15,2	8,28	8,28	2,74	2,74	6,96	5,55	12,5
Pressure (bar)	0	9,34	7,28	8,06	7,37	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	1729	1729	5134	5134	11,5	48,1	27,7
pH	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	2,00	2,00	2,00
Econd ( $\mu\text{s/cm}$ )	1849	1849	3156	3156	8481	8481	3509	3571	3537

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	15,2	15,2	7,95	7,95	2,73	2,73	7,29	5,22	12,5
Pressure (bar)	0	7,87	5,86	6,45	5,80	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	1797	1797	5106	5106	14,1	66,7	36,1
pH	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	2,00	2,00	2,00
Econd ( $\mu\text{s/cm}$ )	1849	1849	3269	3269	8448	8448	3514	3602	3551

Figura 53: Resultado de la simulación, tabla de arriba a  $15^\circ\text{C}$  y tabla de abajo a  $22^\circ\text{C}$ .

Como podemos ver en la Figura 53 podemos ver el resultado de composición de TDS de cada parte del sistema de membranas, para este flujo de aguas residuales. Cada número representa una posición del diagrama que se puede ver en la Figura 46.

A continuación estudiaremos otro tipo de configuraciones, siendo el esquema principal el de la Figura 46, con el mismo tipo de membrana pero variando el número de tubos de presión que se encuentra en la primera etapa. Ya que para este tipo de aguas con poco nivel de partículas disueltas es lo normal, como se puede ver en el apéndice A del libro Wilf. Estudiaremos primero el caso de en la primera etapa dos tubos de presión con 8 membranas cada uno y uno en la segunda etapa con el mismo número de membranas y el otro caso extra que estudiaremos será teniendo en la primera etapa tres tubos de presión con 8 membranas cada uno y uno en la segunda etapa con el mismo número de membranas.

Para el caso de dos tubos en la primera etapa deberemos seguir los mismos pasos que hemos seguido para el caso ya estudiado. Lo primero será con la suposición de un tanto por ciento de permeado del 85% ver que caudal de permeado nos cumple los límites de flux para este tipo de agua.

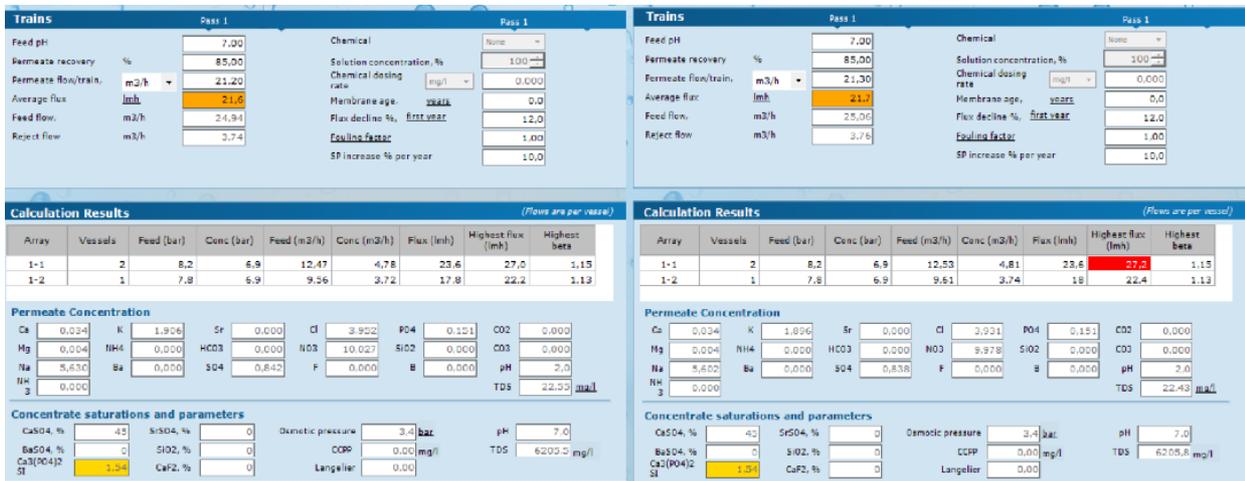


Figura 54: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a  $15^\circ\text{C}$  para el segundo caso.



Figura 55: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C para el segundo caso.

Cómo se puede observar en la Figura 54 para el caso de 15°C no es tan restrictivo, siendo un caudal de 21.2 m<sup>3</sup>/h. Mientras para el caso de temperatura máxima de 22°C que se puede observar en la Figura 55 si es este más restrictivo teniendo un valor de 19.5 m<sup>3</sup>/h, así que al ser este el más restrictivo es el que usamos.

Ahora a continuación que tanto por ciento de recuperado con este caudal es más eficiente, siendo los valores típicos entre 80%-90%, para esto igual que antes iremos probando para ver el límite superior del tanto por ciento para que no supere el límite de concentración.

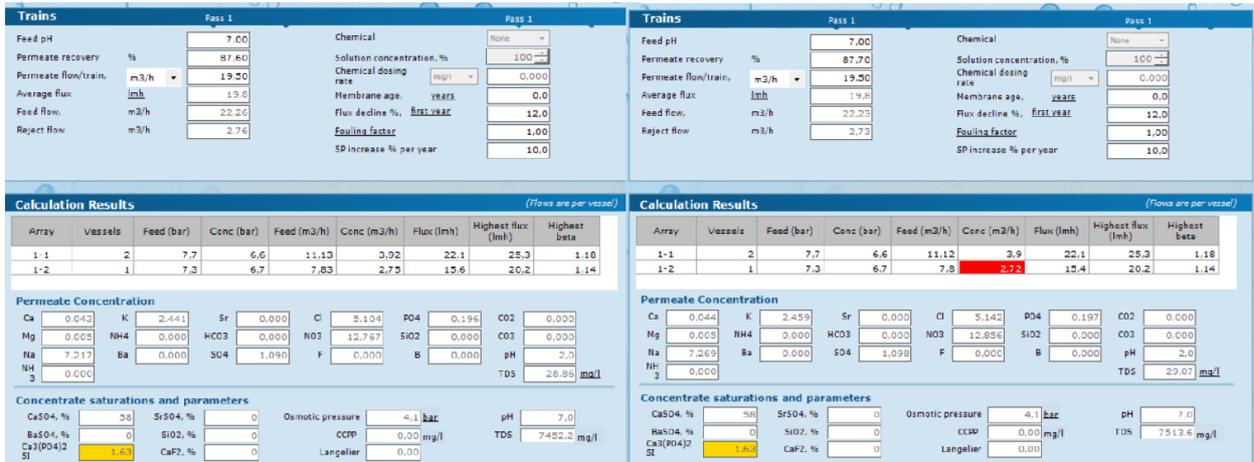


Figura 56: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del segundo caso para 15°C.

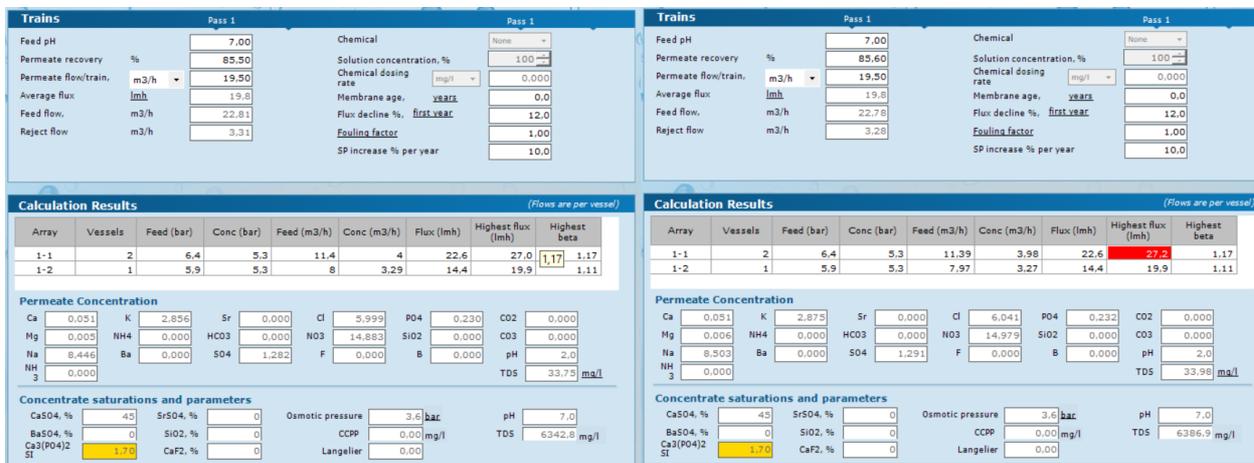


Figura 57: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del segundo caso para 22°C.

En las Figuras 56 podemos ver que el valor máximo del tanto por ciento del permeado que cumple que la concentración este dentro de los límites con 15°C es 87.6%. Para el caso de 22°C, se puede ver en la Figura 57

este valor es inferior es de 85,5% así que este será el valor máximo de nuestro rango que va desde el 80% hasta este 85.5%.

Ahora a diferencia del caso anterior que el rango era muy pequeño para ver bien el valor del recuperado que elegiremos no lo representaremos como en las Figura 51 y Figura 52, sino haremos una gráfica con los resultados.

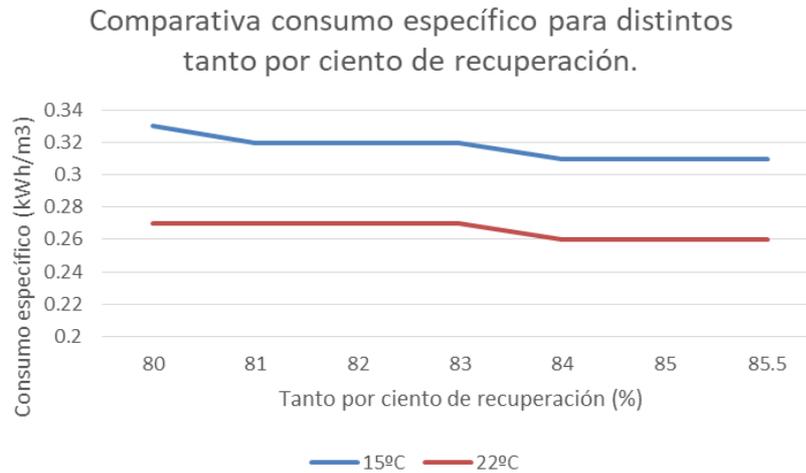


Figura 58: Comparativa consumo específico para distintos tanto por ciento de recuperación para el caso dos a 15°C y 22°C.

En la Figura 58 podemos ver que la tendencia del consumo específico para ambas temperaturas que es menor con forme mayor sea el tanto por ciento de permeado así que para este caso nuestra instalación funciona a con caudal de permeado de  $19.5 \text{ m}^3/\text{h}$  y un tanto por ciento de recuperado de 85.5 % ya que es el límite superior de nuestro rango y es por tanto el valor máximo. Siendo un valor para 15°C de  $0.31 \text{ kWh}/\text{m}^3$  con 22°C de  $0.26 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . A continuación en la Figura 59 podemos ver los resultados de composición de cada etapa para este caso al igual que se puede ver en la Figura 53 para el caso anterior.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	22,8	22,8	8,57	8,57	3,29	3,29	14,2	5,27	19,5
Pressure (bar)	0	7,62	6,45	7,26	6,52	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	2497	2497	6396	6396	11,0	64,0	25,3
pH	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	2,00	2,00	2,00
Econd (us/cm)	1849	1849	4391	4391	10376	10376	3508	3598	3533

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	22,8	22,8	8,00	8,00	3,29	3,29	14,8	4,71	19,5
Pressure (bar)	0	6,42	5,28	5,94	5,26	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	2667	2667	6343	6343	13,9	96,1	33,8
pH	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	2,00	2,00	2,00
Econd (us/cm)	1849	1849	4662	4662	10309	10309	3513	3652	3547

Figura 59: Resultado de la simulación, tabla de arriba a 15°C y tabla de abajo a 22°C para el segundo caso.

A continuación volveremo a repetir este proceso para el tercer caso que er con 3 tubos de presión en la primera etapa y uno en la segunda. El esquema sigue siendo el mismo que en la Figura 46 y con el mismo tipo de membrana. Empezaremos igual suponiendo un tanto por ciento de recuperado del 85% para así poder estimar el caudal del permeado.

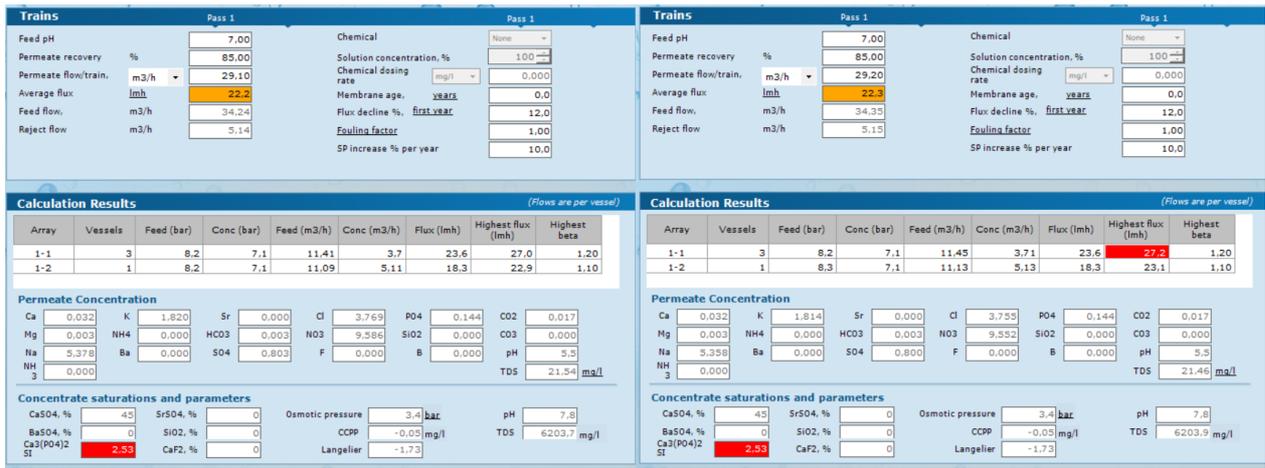


Figura 60: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 15°C para el tercer caso.

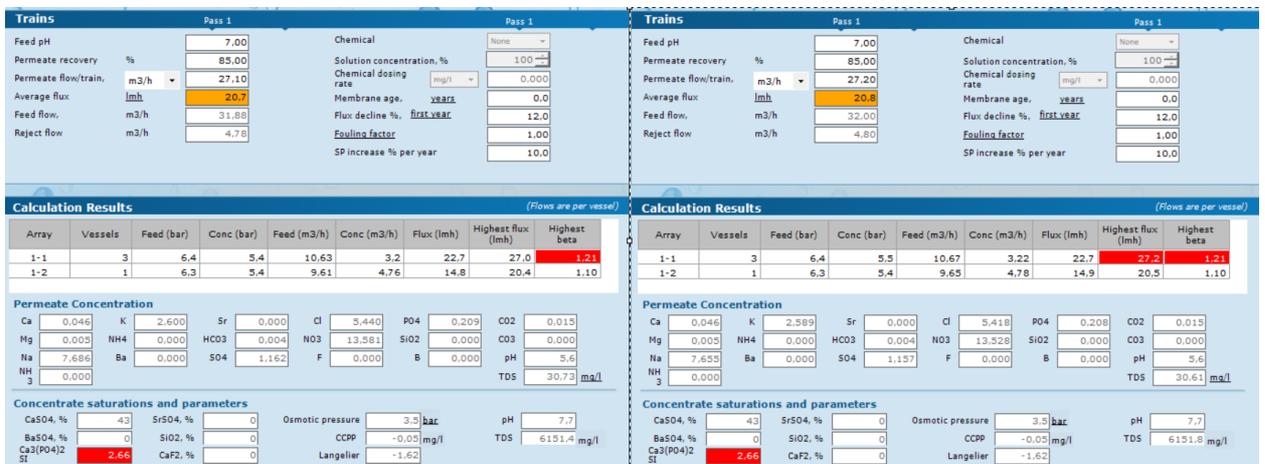


Figura 61: Simulación IMS Design para ver el caudal de permeado a 22°C para el tercer caso.

Al igual que el caso anterior se puede observar en la Figura 60 para el caso de 15°C no es tan restrictivo, siendo un caudal de 29.1 m<sup>3</sup>/h. Mientras para el caso de temperatura máxima de 22°C que se puede observar en la Figura 61 este si es más restrictivo siendo un valor de 27.1 m<sup>3</sup>/h, así que al ser este el más restrictivo es el que usamos.

También a comentar de la Figura 60 que el valor “Highest beta” esta dando error ya que no se ajustado aún el tanto por ciento de permeado. Ahora también decir de la Figura 60 y de la Figura 61 es que nos dice que el límite de saturación del compuesto Ca3(PO4)2 esta bastante por encima del valor límite, así que tendríamos que utilizar un anticrustante.

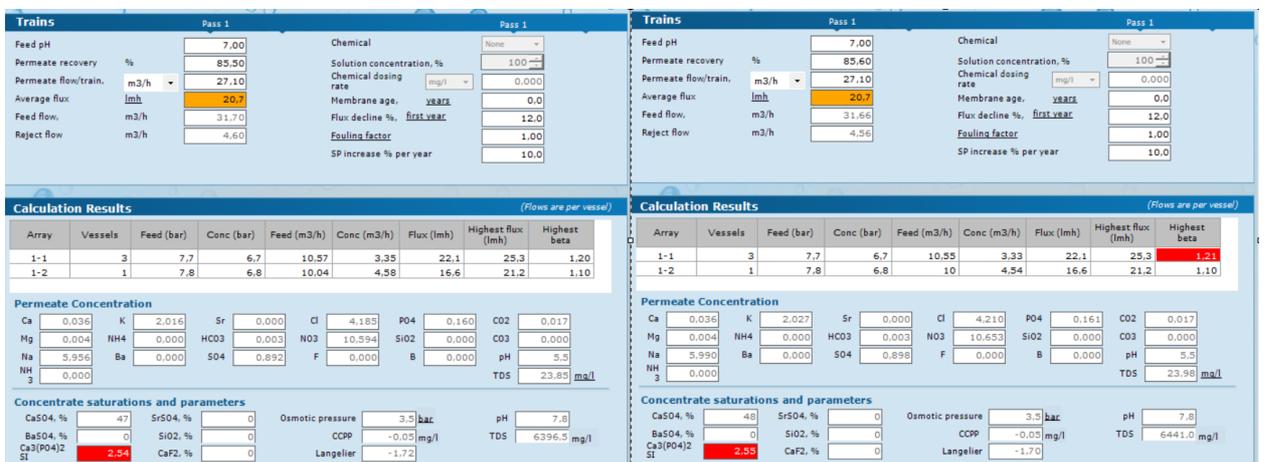


Figura 62: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del tercer caso para 15°C.

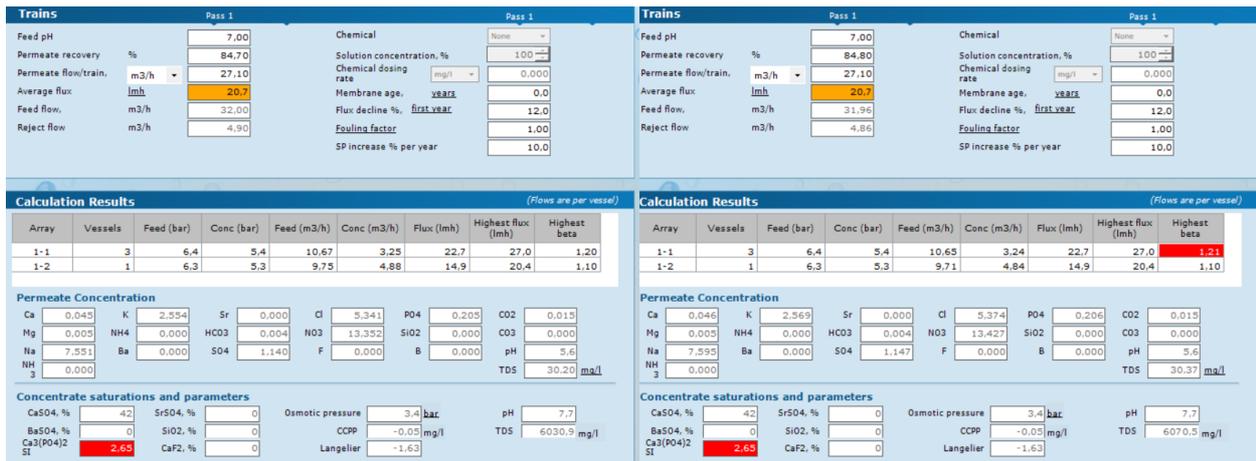


Figura 63: Simulación IMS Design para ver el tanto por ciento de recuperado del tercer caso para 22°C.

Al igual que en los casos anteriores debemos ver que tanto por ciento del rango entre el 80% y el 90% cumple para la concentración para el valor máximo y mínimo de temperatura. En la Figura 62 podemos ver que el valor máximo del tanto por ciento del permeado que cumple que la concentración este dentro de los límites con 15°C es 85.5%. Para el caso de 22°C, se puede ver en la Figura 63, este valor es inferior es de 84.7% así que este será el valor máximo de nuestro rango que va desde el 80% hasta este 84.7%. A continuación para ver la comparativa del consumo específico lo haremos igual que en el caso anterior.

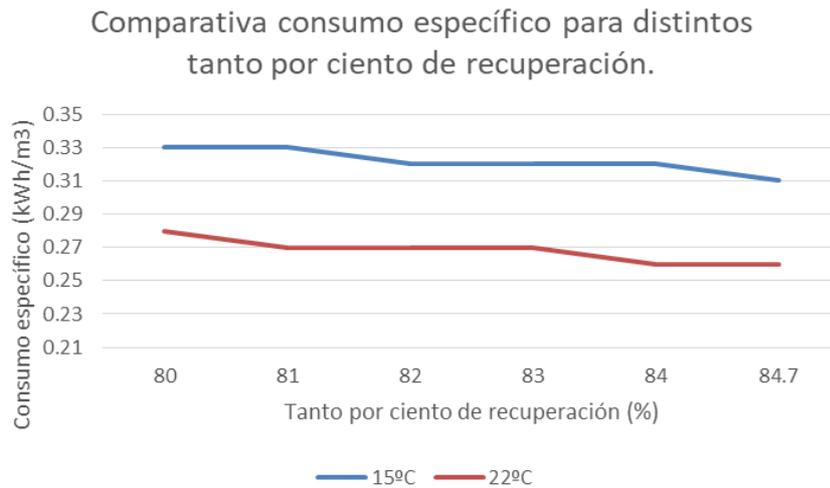


Figura 64: Comparativa consumo específico para distintos tanto por ciento de recuperación para el caso tres a 15°C y 22°C.

En la Figura 64 podemos ver que la tendencia del consumo específico para ambas temperaturas que es menor con forme mayor sea el tanto por ciento de permeado así que para este caso nuestra instalación funciona a con caudal de permeado de 27.1 m<sup>3</sup>/h y un tanto por ciento de recuperado de 84.7% ya que es el límite superior de nuestro rango y es por tanto el valor máximo. Siendo un valor para 15°C de 0.31 kWh/m<sup>3</sup> con 22°C de 0.26 kWh/m<sup>3</sup>. A continuación en la Figura 65 podemos ver los resultados de composición de cada etapa para este caso al igual que se puede ver en la Figura 53 y la Figura 59 para los casos anteriores.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	32,0	32,0	10,4	10,4	4,87	4,87	21,6	5,52	27,1
Pressure (bar)	0	7,66	6,65	7,77	6,69	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	2883	2883	6076	6076	11,9	65,7	22,9
pH	7,00	7,00	7,46	7,46	7,75	7,75	5,21	5,95	5,50
Econd (µs/cm)	1849	1849	5001	5001	9894	9894	22,0	111	39,5

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flow (m3/h)	32,0	32,0	9,75	9,75	4,88	4,88	22,2	4,88	27,1
Pressure (bar)	0	6,40	5,42	6,31	5,32	0,300	0	0	0
TDS (mg/l)	945	945	3064	3064	6031	6031	15,2	98,5	30,2
pH	7,00	7,00	7,48	7,48	7,75	7,75	5,32	6,13	5,62
Econd (µs/cm)	1849	1849	5288	5288	9837	9837	27,1	166	51,6

Figura 65: Resultado de la simulación, tabla de arriba a 15°C y tabla de abajo a 22°C para el tercer caso.

Para finalizar este apartado deberemos seleccionar un tipo de instalación en función su eficiencia, es decir, según su consumo específico. Comparando los tres casos el caso de un único tubo de presión en la primera etapa, el primer caso, es el que mayor consumo específico tiene para los dos valores límites de temperatura. Ahora bien el caso de dos tubos en la primera etapa, el segundo caso, y el de tres tubos en el primer paso, el tercero, tiene los mismos consumos específicos para ambos casos, así que deberemos elegir en función de otro factor. Este factor es el límite de  $Ca_3(PO_4)_2$ , ya que el tercer caso excede por demasiado los valores límites, así que necesitaríamos un tratamiento especial. En conclusión la mejor formación para nuestro sistema de aguas residuales es el segundo caso teniendo dos tubos de presión en la primera etapa y uno solo en la segunda etapa.

## 6.2. Estimación de la producción de agua y energía

Este apartado es el encargado de unir la producción de energía de nuestros convertidores adaptados a la ubicación de Villano-Sisargas con la demandada energética de nuestro prediseño con dos etapas, teniendo dos tubos de presión en la primera etapa y uno solo en la segunda etapa. Así que realizaremos a continuación los cálculos energéticos necesaria de manera unitaria, es decir cuantas veces necesitamos repetir la configuración de nuestro prediseño para un único convertidor de energía undimotriz.

La potencia nominal de nuestro convertidor, del modelo RM5 a escala 1:1/2, es de 31.82 kW así que como máximo la potencia consumida debe ser de este valor. Este cálculo lo debemos hacer para los dos consumos específicos que tenemos, para la temperatura máxima del agua a tratar de (22°C), teniendo un valor de 0.26 kWh/m<sup>3</sup> y para la temperatura mínima (15°C), siendo de 0.31 kWh/m<sup>3</sup>.

$$P_{nWEC} = 31.82 \text{ kW}$$

$$P_{nWEC} = P_{cons} = SEC * q_{perm} * N$$

$$31.82 \text{ (kW)} = 19.5 \left( \frac{m^3}{h} \right) * 0.26 \left( \frac{kWh}{m^3} \right) * N_{22^\circ C} \quad N_{22^\circ C} = 6.27 \approx 6$$

$$31.82 \text{ (kW)} = 19.5 \left( \frac{m^3}{h} \right) * 0.31 \left( \frac{kWh}{m^3} \right) * N_{15^\circ C} \quad N_{15^\circ C} = 5.26 \approx 5$$

Ecuación 1: Cálculo número de veces que se repite la configuración.

En la Ecuación 1 podemos ver el cálculo del número máximo de veces que se repite la configuración por convertidor, que es de 5 veces, ya que aunque para el caso de la temperatura máxima (22°C) es 6 este número, pero para el caso de la temperatura mínima pasaría que la potencia consumida sería mayor que la potencia nominal del WEC, así que el valor máximo debe ser de 5 veces la configuración.

A continuación debemos probar si con 5 veces repitiendo la configuración esta suficientemente distribuida por la producción anual producida por este convertidor. El convertidor de modelo RM5 en la ubicación Villano-Sisargas con escala 1:1/2 tiene una producción anual de 171.26 MWh. Para esto supondremos que durante 6 meses tiene un consumo energético como si funcionase siempre estuviese a 15°C y los otros 6 meses a 22°C, ya que son los valores límite. Esto se puede observar en la Tabla 5.

Número de configuraciones unitarias	Consumo (6 meses) (kWh)	Balance anual (kWh)
5	105646.125	-60347.29377
	125962.6875	
4	84516.9	-14025.53127
	100770.15	
3	63387.675	32296.23123
	75577.6125	

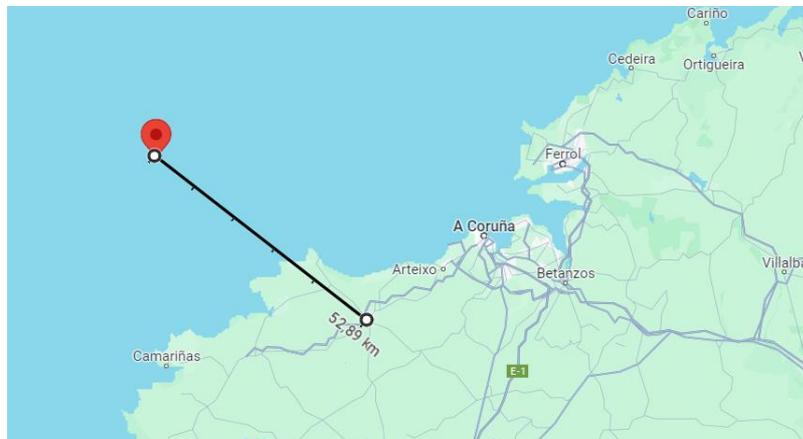
**Tabla 5: Balance producción y demanda. Siendo el valor negativo de la tercera columna un déficit energético, por lo que habría que comprar energía.**

Como podemos ver en la Tabla 5 solamente en el caso de que la configuración unitaria se repita tres veces por convertidor la producción del WEC es suficiente para poder alimentarlo durante todo el año, teniendo excedentes. Que se repita tres veces la configuración unitaria que en cada convertidor va a alimentar a tres unidades de ósmosis inversa diferente, cada una con dos etapas, teniendo en la primera dos tubos de presión y en la segunda solamente uno. Estos excedentes se podrán o bien vender a la red eléctrica o bien poder alimentar otras instalaciones dentro de nuestra instalación purificadora de agua.

Para concluir por convertidor de energía undimotriz debemos repetir tres veces la configuración unitaria estudiada en el apartado anterior teniendo un consumo constante para el caso de temperatura máxima (22°C) de 15.21 kWh y para el caso del límite inferior de temperatura (15°C) 18.135 kWh. Al conjunto se la acoplaría el correspondiente sistema de recuperación energética basada en cámara isobárica.

### 6.2.1 Ejemplo de producción de agua en una población

En este apartado veremos una población cercana a nuestra ubicación cuantas aguas residuales produce para así poder estimar el consumo de nuestra instalación y también de cuantos convertidores necesitaríamos para satisfacer la cantidad de aguas que debemos tratar.



**Figura 66: Distancia Villano-Sisargas y Carballo extraído de Google Maps.**

El municipio más cercano con una población considerable a nuestra ubicación es Carballo, que se encuentra en la comarca de Bergantiños en la provincia de La Coruña. Se encuentra a una distancia de aproximadamente de 52.89 km y tiene una población de 31416 habitantes [31].

Para poder calcular el caudal de aguas residuales producida por esta población debemos determinar la dotación que es la cantidad de agua asignada a cada habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas físicas que existen en cualquier sistema de distribución, su unidad es en l/hab/día [32].

Giros	Tipos	Dotación
Habitacional**	Doméstico	200 lts/hab/día
	Doméstico (Administraciones)	150 lts/hab/día
Oficinas	Cualquier género	6 lts/m2/día
Comercios	Comercios secos	
	Si cuentan con baño en cada local (cualquier superficie)	6 lts/m2/día
	Con superficie menor a 500m2	6 lts/m2/día
	De 501m2 a 1,000m2	3 lts/m2/día
	De 1,001m2 a 1,500m2	1.5 lts/m2/día
	De 1,501m2 o más	1 lts/m2/día
	Restaurante	12 lts/persona/día
	Cocina económica	12 lts/m2/día
	Lavado de autos	60 lts/auto
	Lavanderías	40 lts/Kg/ropa
	Mercados	100 lts/puesto/día
Baños públicos	300 lts/uso/reg/día	
Salud	Hospitales y clínicas con hospitalización	500-800 lts/cama/día
	Centros de Salud	350 lts/cama/día
	Orfanatos y asilos	150 lts/cama/día
Educación Cultural	Guarderías Incl. personal	60 lts/persona/día
	Educación elemental	20 lts/alumno/turno
	Personal docente	20 lts/personal/turno
	Media superior	25 lts/alumno/turno
	Exposición temporal	10 lts/asistente/día
Recreación	Alimentos y bebidas	12 lts/comida/día
	Entretenimiento	6 lts/asiento/día
	Recreación social	25 lts/asistente/día
	Deporte/Aire libre/Baños /Vestidor	150 lts/asiento/día
	Estadios, Circos y Ferias	10 lts/asiento/día
	Dotación animales	25 lts/animales/día

Tabla 6: Dotación en función del tipo de actividad [32].

En la Tabla 6 podemos ver distintas dotaciones en función del tipo de actividad. En nuestro caso vamos a hacer los cálculos para el caso doméstico es decir con una dotación de 200 l/hab/día que se puede ver en la Ecuación 2.

$$Q_{augas} = 31416(hab) * 200 \left( \frac{l}{hab} \right) = 6283200 \left( \frac{l}{día} \right) * \frac{1}{1000} \left( \frac{m^3}{l} \right) * \frac{1}{24} \left( \frac{día}{h} \right) = 261.8 m^3/h$$

Ecuación 2: Cálculo caudal aguas residuales.

Una vez ya calculado el caudal de aguas residuales tenemos que ver cuantos convertidores necesitamos, ya que por convertidor necesitamos un caudal de tres veces el que entra en el prediseño que es de  $22.8 m^3/h$  que se puede ver en la Figura 58+1, lo que sería un caudal por convertidor de  $68.4 m^3/h$ , este cálculo se encuentra en la Ecuación 3 que es la división del caudal de aguas residuales entre el caudal de entrada al convertidor.

$$N^{\circ}_{WEC} = \frac{261.8}{68.4} = 3.82 \approx 4$$

Ecuación 3: Cálculo de números de convertidores.

Entonces para esta población necesitaríamos 4 convertidores para cumplir con la cantidad de aguas residuales producidas, solamente mediante la población sin tener en cuenta comercios, hospitales, entre otras cosas. Así que la instalación para esta ciudad tendría una potencia nominal de 127.28 kW produciendo anualmente 856.3 MWh de energía, los consumos de la instalación cuando esté a a 22°C sería de 60.84 kWh y a 15°C de 72.54 kWh.

### 6.3 Análisis de resultados.

En este capítulo lo que hemos realizado varias tareas, lo primero es el análisis de diferentes configuraciones de nuestra instalación, simulandola en el programa commercial IMS Design. Las configuración ha sido cogido de libro Wilf del apendice A teniendo dos etapas y un economizador y hemos probado tres variaciones de esta, siendo una un tubo de presión en la primera etapa y otro solo en la segunda etapa, otra ha sido dos tubos de presión en la primera etapa y uno solo en la segunda y la última ha sido tres tubos de presión en la primera etapa

y uno solo en la segunda. La configuración elegida es la segunda, dos tubos de presión en la primera etapa y uno en la segunda, ya que respecto la primera configuración es el más eficiente energéticamente y respecto a la tercera configuración que tienen los mismos consumos que la segunda, la tercera supera por mucho el valor máximo del anticrustante. También decir que en todas las configuraciones hemos optimizado el caudal del permeado y el tanto por ciento de recuperado.

A continuación hemos realizado un conjunto de cálculos para estimar el número de veces que se tiene que repetirse la configuración seleccionada por convertidor de energía undimotriz. Para ello hemos igualado la potencia nominal del WEC con el consumo específico de la configuración por el caudal del producto y así obtenemos el valor máximo de configuraciones que podemos poner sin supercar el valor nominal de producción del WEC. Luego lo optimizamos comparandolo con la producción anual del capítulo 5, ya escalado para la ubicación elegida y vemos que el valor máximo de nuestra configuración que se puede repetir para un WEC es de tres.

Ahora ya sabiendo cuantas veces se repite la configuración hemos calculado un ejemplo de producción para la ubicación de Carballo, ya que es una ciudad con una población considerable cercana a la ubicación de nuestro WEC. Lo que obtenemos de estos cálculos es que tenemos un caudal de aguas negras de  $261.8 \text{ m}^3/\text{h}$ , un total de cuatro convertidores, una potencia nominal de los convertidores de  $127.28 \text{ kW}$  produciendo anualmente  $856.3 \text{ MWh}$  de energía y unos consumos de la instalación purificadora de agua cuando esté a  $22^\circ\text{C}$  de  $60.84 \text{ kWh}$  y a  $15^\circ\text{C}$  de  $72.54 \text{ kWh}$ .

Una vez ya realizado un ejemplo en una ubicación determinada, como se puede ver en el apartado anterior, a continuación en este apartado lo que haremos será realizar unas breves conclusiones. Para ello realizaremos cálculos como en el apartado anterior, pero para el caso con un solo convertidor de la energía de las olas.

Para empezar sabemos que en un solo convertidor el caudal de entrada es el mismo que tres veces el de la configuración estimada en el apartado 6.1, así que es de  $68.4 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ahora lo que debemos hacer es estimar el número de habitantes que necesitamos por convertidor, sabiendo que la dotación es de  $200 \text{ l/hab/día}$ .

$$Q_{\text{augas}} = 68.4 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = n_{\text{hab}} * 200 \left( \frac{\text{l}}{\text{hab}} \right) * \frac{1}{1000} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{l}} \right) * \frac{1}{24} \left( \frac{\text{día}}{\text{h}} \right) \quad n_{\text{hab}} = 8208 \text{ hab}$$

*Ecuación 4: Cálculo del número de habitantes, a partir del caudal aguas residuales.*

A partir de la Ecuación 4 podemos ver que por cada 8208 habitantes se necesita un convertidor, haciendo que nuestra instalación tenga una potencia nominal de  $31.82 \text{ kW}$ , que es la nominal de los WEC escalados para nuestra ubicación, teniendo consumos a temperatura máxima ( $22^\circ\text{C}$ ) de  $15.21 \text{ kWh}$  y para el caso del límite inferior de temperatura ( $15^\circ\text{C}$ )  $18.135 \text{ kWh}$ , estos consumos son para el periodo de una hora.

Por tanto por cada convertidor que queramos poner en esta ubicación debemos tener en cuenta la población, es decir cada 8208 habitantes que tenga una población debemos poner un WEC más, incrementando de misma manera la potencia y los consumos, como podemos ver en la Tabla 7.

Característica	Nº de convertidores			
	1	2	3	4
Nº habitantes (hab)	8208	16416	24624	32832
Pn WEC (kW)	31.82	63.64	95.46	127.28
Pcons (22°C) (kW)	15.21	30.42	45.63	60.84
Pcons (15°C) (kW)	18.135	36.27	54.405	72.54
Caudal (m <sup>3</sup> /h)	68.4	136.8	205.2	273.6

*Tabla 7: Diferentes configuraciones en función del número de habitantes. Siendo Pn la Potencia nominak del WEC, Pcons la potencia consumida por la instalación de ósmosis inversa.*

Para concluir nuestros convertidores alimentan a tres configuraciones, que en cada una entra un caudal de  $22.8 \text{ m}^3/h$ , tratando un total de convertidor de  $68.4 \text{ m}^3/h$ , de los cuales salen de cada configuración  $19.5 \text{ m}^3/h$ , un total por convertidor de  $58.5 \text{ m}^3/h$ . Cada una de las configuraciones tiene dos etapas, en la primera dos tubos de presión y en la segunda solo uno, cada tubo tiene ocho membranas. Cada convertidor sirve para tratar las aguas residuales de 8208 personas.

# 7 CONCLUSIÓN

---

En este Trabajo Fin de Grado se han analizado tres modelos de convertidores, del proyecto Reference Model Project, en diferentes ubicaciones de España, que mediante los datos ambientales aportados por Puertos del Estado, se ha podido determinar la producción de energía eléctrica en estas ubicaciones. Además se ha escalado estos convertidores para adaptar los convertidores a las dos ubicaciones con mayor producción energética (boya Villano-Sisargas y boya de Cabo Silleiro), seleccionando el escalado que mejor se adaptaba y también la ubicación definitiva, que en nuestro caso ha sido la boya de Villano-Sisargas. También en este trabajo se ha realizado un prediseño de una instalación purificadora de agua y se ha acoplado estos consumos de energéticos con la producción de nuestro convertidor undimotriz.

La ubicación seleccionada, como ya hemos dicho antes, es la boya de Villano-Sisargas, el convertidor seleccionado es el modelo RM5 con un escalado para que se adapte a esta ubicación de 1:1/2, siendo su potencia nominal de 31.82 kW, produciendo en un año en torno 171.26 MWh, dependiendo de las condiciones del año será más o menos.

La instalación de ósmosis inversa para el tratamiento terciario de aguas residuales tiene dos etapas. Se ha simulado una configuración unitaria para determinar la producción y el consumo energético. Posteriormente se escala en el número de unidades en función de la demanda de agua dulce. La configuración unitaria consta de: la primera con dos tubos de presión y la segunda con un solo tubo de presión los tres tubos con ocho membranas del modelo ESPA2-LD MAX, además tiene un recuperador de energía. Genera un caudal de permeado de  $19.5 \text{ m}^3/\text{h}$ , con un tanto por ciento de recuperado del 85.5% con consumo específico de  $0.26 \text{ kWh}/\text{m}^3$  cuando opera a  $22^\circ\text{C}$  y de  $0.31 \text{ kWh}/\text{m}^3$ . Para que el acoplamiento cumpla la producción de energía eléctrica del convertidor necesitamos repetir esta configuración unitaria tres veces por convertidor. También decir que la configuración de un convertidor sirve para tratar las aguas residuales de 8208 habitantes.

El dimensionado del sistema propuesto consiste en un WEC modelo RM5, con tres sistemas unitarios de ósmosis inversa conformado cada uno por dos etapas y el conjunto tiene un recuperador energético, teniendo en la configuración unitaria, la primera etapa dos tubos de presión y la segunda etapa solo un tubo de presión, todos los tubos de presión del sistema tendrán ocho membranas del tipo ya mencionado ESPA2-LD MAX.

Hay que destacar que en este estudio no se ha tenido en cuenta los aspectos económicos, cálculos de la instalación eléctrica o el pretratamiento del agua a la entrada de la instalación purificadora de agua entre otras cosas que tendríamos que hacer para que la instalación fuera real. Solo hemos realizado los cálculos energéticos de producción de energía en nuestra ubicación seleccionada, compararlo con los consumos de nuestra instalación de ósmosis inversa y ver como se puede acoplar con la producción de aguas negras de una población.

Para terminar, comentar que el uso de la energía de las olas para alimentar la instalación de ósmosis inversa con energía eléctrica, es muy interesante y bajo lo estudiado en este proyecto, es decir bajo el punto de vista energético, es rentable, pero habría que profundizar este estudio con otros tipos de análisis que no se han llevado a cabo en este trabajo para ver si realmente es interesante.

# REFERENCIAS

---

- [1] Pedro Fernández Díez, Libro energía del mar, publicado en internet, <http://es.pfernandezdiez.es/libro/?id=5>, fecha 20/01/2024.
- [2] Wedge, The W1, <https://wedgeglobal.com/>, fecha 07/02/2024.
- [3] Moris Arroes, Pelamis la serpiente energética, <https://www.morisarroes.es/pelamis-la-serpiente-energetica/>, fecha 07/02/2024.
- [4] Tethys, Wave Dragon Pre-Commercial Demonstration Project, <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/wave-dragon-pre-commercial-demonstration-project>, fecha 07/02/2024.
- [5] <https://www.dicyt.com/viewItem.php?itemId=28039>, fecha 07/02/2024.
- [6] Carneige clean energy, Ceto technology, <https://www.carnegiece.com/ceto-technology/>, fecha 07/02/2024.
- [7] Hydro review, CorPower Ocean unveils tech to build utility-scale wave farms, <https://www.hydroreview.com/hydro-industry-news/oceantidalstream-power/corpower-ocean-unveils-tech-to-build-utility-scale-wave-farms/#gref>, fecha 07/02/2024.
- [8] Plan de energías renovables 2011-20, publicado en internet [https://icaen.gencat.cat/web/ca/energia/renovables/biomassa/BiomassaCAT/.content/06\\_regulacio/03\\_planificacio/11227\\_PER\\_2011-2020\\_def.pdf](https://icaen.gencat.cat/web/ca/energia/renovables/biomassa/BiomassaCAT/.content/06_regulacio/03_planificacio/11227_PER_2011-2020_def.pdf), fecha 07/02/2024.
- [9] Wave roller by AW-Energy, Utility Scale, <https://aw-energy.com/utility-scale-power/>, fecha 07/02/2024.
- [10] Wello, The Penguin Wave Energy Converter, <https://wello.eu/the-penguin-2/>, fecha 07/02/2024.
- [11] Apuntes de la asignatura Energía hidráulica y marina del grado de ingeniería de la energía, de la ETSI, Universidad de Sevilla, del curso 2023-2024.
- [12] Puerto del Estado, Institucional, <https://www.puertos.es/es-es/portaldetransparencia#:~:text=Puertos%20del%20Estado%20es%20un,gestionados%20por%2028%20Autoridades%20Portuarias>, fecha 12/03/2024.
- [13] Puerto del Estado, Oceanografía, <https://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx>, fecha 20/02/2024.
- [14] Puertos del Estado, Conjunto de datos: REDEXT, [https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT\\_2.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_2.pdf), fecha 15/02/2024.
- [15] Puertos del Estado, Conjuntos de Datos SIMAR, [https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT\\_8.pdf](https://bancodatos.puertos.es/BD/informes/INT_8.pdf), fecha 15/02/2024.
- [16] Fluence, Agua salobre como recurso, <https://www.fluencecorp.com/es/que-es-agua-salobre/>, fecha 12/03/2024
- [17] Science Direct, Ocean Engineering, Experimental investigation on the motion response of a novel floating desalination plant for Egypt, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801820305461>, fecha 17/03/2024.
- [18] Science Direct, Applied Energy, Energy supply of a large size desalination plant using wave energy. Practical case: North of Gran Canaria,

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920311788>, fecha 17/03/2024.

[19] Science Direct, Desalination, Variable renewable energy sources for powering reverse osmosis desalination, with a case study of wave powered desalination for Kilifi, Kenya, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011916420313473>, fecha 17/03/2024.

[20] Science Direct, Electrochimica Acta, Quantitative insight into the effect of ions size and electrodes pores on capacitive deionization performance, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S001346861932047X>, fecha 17/03/2024.

[21] Science Direct, Advances in Colloid and Interface Science, Novel ionic separation mechanisms in electrically driven membrane processes, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0001868620305388>, fecha 17/03/2024.

[23] Science Direct, Biovalorisation of Wastes to Renewable Chemicals and Biofuels, Chapter 7: The intertwined facets of membrane technology for industrial effluents, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128179512000079>, fecha 17/03/2024.

[24] Tethys engineering, Reference Model, <https://tethys-engineering.pnnl.gov/signature-projects/reference-model>, fecha 20/02/2024.

[25] Tethys engineering, RM3: Wave Point Absorber, <https://tethys-engineering.pnnl.gov/signature-projects/rm3-wave-point-absorber>, fecha 20/02/2024.

[26] Tethys engineering, RM5: Oscillating Surge Flap, <https://tethys-engineering.pnnl.gov/signature-projects/rm5-oscillating-surge-flap>, fecha 22/02/2024.

[27] Tethys engineering, RM6: Oscillating Water Column, <https://tethys-engineering.pnnl.gov/signature-projects/rm6-oscillating-water-column>, fecha 22/02/2024.

[28] ACOUA Tecnología, Ósmosis inversa, <https://acquatecnologiaperu.com/works/osmosis-inversa-ro>, fecha 31/05/2024.

[29] Science Direct, Chemical Engineering Journal, Reverse osmosis concentrate: An essential link for closing loop of municipal wastewater reclamation towards urban sustainability, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894720338936>, fecha 31/05/2024.

[30] Asociación española de desalación y reutilización, Diferencias entre microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa, <https://aedyr.com/diferencias-microfiltracion-ultrafiltracion-nanofiltracion-osmosis-inversa/>, fecha 31/05/2024.

[31] INE, Cifras oficiales de población de los municipios españoles en aplicación de la Ley de Bases del Régimen Local (Art. 17), Coruña, A: Población por municipios y sexo. [https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2868#\\_tabs-grafico](https://www.ine.es/jaxiT3/Datos.htm?t=2868#_tabs-grafico), fecha 13/06/2024.

[32] Comisión estatal aguas Querétaro, Normas y Lineamientos Técnicos para las Instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Alcantarillado Sanitario y Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de las Zonas Urbanas del Estado de Querétaro, [https://www.ceaqueretaro.gob.mx/wp-content/uploads/2016/08/2\\_43\\_1481382027\\_agua.pdf](https://www.ceaqueretaro.gob.mx/wp-content/uploads/2016/08/2_43_1481382027_agua.pdf), fecha 14/06/2024.

