

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Desalación por ósmosis inversa mediante energías marinas: aplicación a Cabo Verde

Autor: Bella Santana Álvarez

Tutores: Lourdes García Rodríguez
y Abel Rianza Frutos

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

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de la Energía

Desalación por ósmosis inversa mediante energías marinas: aplicación a Cabo Verde

Autor:

Bella Santana Álvarez

Tutor:

Dra. Lourdes García Rodríguez, Catedrática de Universidad

Dr. Abel Riaza Frutos, Abengoa Water

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

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Desalación por ósmosis inversa mediante energías marinas: aplicación a Cabo Verde

Autor: Bella Santana Álvarez

Tutor: Lourdes García Rodríguez

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia y amigos
A mis maestros

Agradecimientos

A todos mis profesores, sobre todo a aquellos que amaban su profesión y me enseñaron a amar la ciencia.

A mi tutora, Lourdes, por ser mi guía en la elaboración y composición de este Trabajo.

A mi familia; en especial a mi madre, mi padre y mi hermana, por su apoyo y amor incondicional.

A mis amigos, los de aquí y los de allí.

A mis GIEs, por el camino recorrido juntos.

A Borja, por ser un pilar fundamental.

Bella Santana Álvarez

Sevilla, 2018

El agua dulce es un recurso natural único y escaso pero esencial para la vida y las actividades productivas. La desalación de agua de mar surge como una solución a considerar en zonas de escasez de agua dulce, dada su tecnología fiable y económicamente sostenible, siendo en muchos lugares la única alternativa posible.

En este sentido, el proyecto piloto *Wave₂OTM Cabo Verde* se enfrenta a generar una solución de abastecimiento de agua potable de uso racional y permanente, a partir de un procedimiento alternativo como es la ósmosis inversa y cuya fuente de energía es de carácter renovable en su totalidad: la energía undimotriz que proporcionan las abundantes olas de su costa. Esta solución será el primer sistema de desalación que se puede implementar rápidamente, operar completamente sin conexión a la red eléctrica, suministrar grandes cantidades de agua dulce a un coste competitivo y será tres veces menos costosa que la alternativa principal: los sistemas de desalación impulsados por diésel.

De esta forma, debido a que la energía undimotriz es una energía no constante, este Trabajo se basa en analizar el consumo energético específico bruto y neto de un sistema de desalación por ósmosis inversa frente a condiciones de operación con recurso energético variable en Praia Grande, Cabo Verde, para luego interconectarlo con la instalación de energía undimotriz realizando el dimensionado de la planta completa. Tras esto, se realiza un análisis de sensibilidad de la instalación para distintas localizaciones.

Abstract

Fresh water is a unique and scarce natural resource, essential for life and productive activities. The desalination of seawater emerges as a solution to be considered in areas of shortage of fresh water, given its reliable and economically sustainable technology, being in many places the only possible alternative.

In this sense, the pilot project *Wave₂OTM Cape Verde* is faced with generating a potable water supply solution for rational and permanent use, based on an alternative procedure such as reverse osmosis and whose source of energy is renewable in its entirety : the wave energy provided by the abundant waves of its coast. This solution will be the first desalination system that can be quickly implemented, operate completely without connection to the electricity grid, supply large quantities of fresh water at a competitive cost and will be three times less expensive than the main alternative: desalination systems driven by diesel.

In this way, because of wave energy is a non-constant energy, this work is based on analyzing the gross and net specific energy consumption of a reverse osmosis desalination system against operating conditions with variable energy resources in Praia Grande, Cape Verde, and then interconnect it with the wave power installation, realizing the sizing of the entire plant. After this, a sensitivity analysis of the installation it is carried out for different locations.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxii
1 Introducción	23
2 Energías marinas. Aplicación a la desalación de agua	26
2.1. <i>Energía undimotriz</i>	27
2.1.1 Origen	27
2.1.2 Captación de energía y potencial energético	28
2.1.3 Ventajas y desventajas	31
2.2. <i>Aplicación de las energías marinas a la desalación de agua</i>	32
2.2.1 Tecnologías de desalación	32
2.2.2 Energía oceánica	32
3 Aprovechamiento de la Energía Undimotriz. Viabilidad técnica	34
3.1. <i>Tecnologías de conversión de energía</i>	34
3.2. <i>Viabilidad técnica</i>	38
3.1.1. Wave ₂ O™ Cabo Verde	39
3.1.2. Wave ₂ O™ Cabo Verde. Solución propuesta	41
3.2. <i>Artículos científicos relevantes</i>	44
4 Sistema de Ósmosis Inversa. Diseño preliminar	53
4.1. <i>Sistema de ósmosis inversa</i>	53
4.1.1. Software ROSA	56
4.2. <i>Recuperación energética</i>	59
4.2.1. Metodología	59
4.2.2. Cálculos del SEC neto	62
4.3. <i>Resultados y comparación</i>	65
5 Dimensionado del sistema de desalación autónomo alimentado con Energía Undimotriz	67
5.1. <i>Definición del sistema</i>	67
5.2. <i>Cálculos e hipótesis realizadas</i>	68
6 Análisis de sensibilidad y otras localizaciones geográficas	70
7 Conclusiones y recomendaciones	73
Referencias	75
Anexos	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Información sobre el proyecto Wave ₂ O™.	40
Tabla 3-2. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías de desalación	45
Tabla 3-3. Requerimiento de energía de las tecnologías de desalación	46
Tabla 3-4. Coste aproximado de las tecnologías de desalación	46
Tabla 3-5. Coste típico de los sistemas de desalación de energía renovable	46
Tabla 4-1. Tipo de bomba de alta presión utilizada en el sistema de desalación por ósmosis inversa.	55
Tabla 4-2. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 100% de caudal de alimentación en la instalación.	62
Tabla 4-3. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 75% de caudal de alimentación en la instalación.	63
Tabla 4-4. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 50% de caudal de alimentación en la instalación.	64
Tabla 4-5. Resultados de los cálculos del SEC bruto (ROSA, sin recuperación energética) y del SEC neto (con recuperación energética), así como de la calidad del agua producto para distintos casos de operación a carga parcial.	65
Tabla 4-6. Parámetros necesarios para interconectar el SWRO con el sistema de energía undimotriz.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2 1. Propiedades de las olas.	28
Figura 2 2. Energía cinética y potencial de las olas	29
Figura 2 3. Distribución global de los niveles de potencia de las olas.	30
Figura 2-4. Distribución de los niveles de potencia de las olas en Europa.	30
Figura 3-1. Clasificación de WEC según profundidad de instalación	34
Figura 3-2. Columna de agua oscilante fija.	35
Figura 3-3. Wave Dragon.	36
Figura 3-4. Movimientos relativos provocados por el oleaje	36
Figura 3-5. Ejemplos de WEC oscilantes según sus movimientos relativos	37
Figura 3-6. Pato de Salter.	37
Figura 3-7. Pelamis.	38
Figura 3-8. Cilindro de Bristol	38
Figura 3-9. Ubicación del proyecto piloto Wave2OTM: Praia Grande, Cabo Verde	39
Figura 3-10. Escasez de agua potable en el África subsahariana	39
Figura 3-11. Disponibilidad mundial de agua potable.	40
Figura 3-12. Sistema de desalación de olas Wave2OTM operando sin electricidad.	41
Figura 3-13. Esquema del proyecto Wave2OTM operando con 15 WEC	42
Figura 3-14. Tipos de turbinas submarinas.	42
Figura 3-15. Contribución global reciente de cada tecnología de desalinización	44
Figura 3-16. WEC in Vizhinjam, India	48
Figura 3-17. Caudal de producción de agua y curva del nivel de almacenamiento por horas	50
Figura 3-18. a) Comparación entre la solicitud de potencia RO (Pro-req) y la energía generada por ISWEC individual (Piswec) y b) Análisis de sensibilidad en las unidades ISWEC	50
Figura 3-19. Diagrama conceptual de un sistema de admisión de pozo inclinado.	51
Figura 3-20. Diagrama que muestra un sistema difusor multipuerto montado en el extremo de una tubería de descarga.	52
Figura 4-1. Esquema de funcionamiento de ósmosis y ósmosis inversa.	54
Figura 4-2. Esquema conceptual de un sistema de ósmosis inversa	54
Figura 4-3. Situación de los botones de cabecera (azul), de las pestañas principales (rojo) y del marco exterior (verde)	56
Figura 4-4. Software ROSA. Cumplimentación de tabla de solutos del agua del Atlántico	57
Figura 4-5. Detail Report de la simulación de referencia de la desalación de agua del Océano Atlántico mediante el software ROSA	58
Figura 4-6. Detail Report de la simulación mejorada elegida de la desalación de agua del Océano Atlántico mediante el software ROSA	59

Figura 4-7. Comportamiento de un intercambiador energético PX-220 en condiciones de operación variables	60
Figura 4-8. Esquema del sistema de desalación con referencias a los distintos tramos existentes	61
Figura 5-1. Dimensionado instalación SWRO + Energía undimotriz.	69
Figura 6-1. Aplicación a localización y configuración más favorable.	71
Figura 6-2. Aplicación a localización y configuración más desfavorable.	71

Notación

RME	<i>Resolute Marine Energy</i>
WEC	Convertidor de energía undimotriz (<i>Wave Energy Converter</i>)
RO	Ósmosis inversa (<i>Reverse osmosis</i>)
MSF	Destilación multietapa por efecto flash (<i>Multi-stage flash distillation</i>)
MSD	Destilación multiefecto (<i>Multi-effect distillation</i>)
SD	Destilación solar (<i>Solar distillation</i>)
IDA	Asociación internacional de desalación (<i>International Desalination Association</i>)
TDS	Sólidos disueltos totales (<i>Total dissolved solids</i>)
SWRO	Ósmosis inversa del agua de mar (<i>Sea water reverse osmosis</i>)
$q_{v,F}$	Caudal volumétrico de alimentación
$q_{v,I}$	Caudal volumétrico de permeado
$q_{v,G}$	Caudal volumétrico de concentrado a la entrada del ERI-PX
$q_{v,H}$	Caudal volumétrico de concentrado a la salida del ERI-PX
$q_{v,D}$	Caudal volumétrico de agua de mar a la salida del ERI-PX
$q_{v,B}$	Caudal volumétrico de agua de mar a la entrada del ERI-PX
P_n	Presión en el punto n
$P_{w,Total}$	Potencia total consumida
μ_{HPP}	Eficiencia de la <i>High Pressure Pump</i>
μ_{BP}	Eficiencia de la <i>Booster Pump</i>
μ_{eng}	Rendimiento motor
SEC	Consumo energético específico
T_{sw}	Temperatura del agua de mar
ρ_{sw}	Densidad del agua de mar
P_{amb}	Presión ambiente
P_{WEC}	Potencia generada por el/los WEC
P_{SWRO}	Potencia demandada por el sistema SWRO
P_{Exceso}	Potencia generada en exceso
$q_{v,planta}$	Caudal volumétrico de permeado que se produciría en la planta
$q_{v,produc}$	Caudal volumétrico de permeado producido realmente en la planta
SEC_{AUX}	Consumo energético específico auxiliar
SEC_{TOT}	Consumo energético específico total

1 INTRODUCCIÓN

La utilización de fuentes de energía renovables para la producción y distribución de agua es actualmente una realidad que ha demostrado ser capaz de ofrecer soluciones competitivas viables frente a la escasez de agua y la necesidad de reducir los combustibles fósiles como fuente de energía.

Para la producción de agua potable o desalación de agua de mar, las tecnologías de membrana, especialmente la ósmosis inversa, han conseguido grandes avances en las últimas décadas además de ser competitivas con la destilación.

Los mares y océanos representan una de las mayores fuentes de energías renovables disponibles en nuestro planeta, ofreciendo un enorme potencial energético que, mediante diferentes tecnologías, se puede aprovechar y contribuir a satisfacer nuestras necesidades energéticas.

Como hecho a destacar, este Trabajo se aplica al diseño de una instalación de desalación de aguas marinas basado en una planta real que será ubicada en Cabo Verde (*Wave₂OTM Cabo Verde*), abastecida en su totalidad por energía undimotriz.

Gran parte de los procesos para desalar agua utilizando energía undimotriz se efectúan convirtiendo el movimiento de las olas en energía eléctrica, con la que posteriormente se abastece a la planta desaladora. Sin embargo, como se explicará posteriormente en más detalle, el proyecto propuesto aprovechará directamente el movimiento del oleaje para desalar agua por ósmosis inversa, sin necesidad de convertir el movimiento en energía eléctrica.

1.1 Objetivos

El presente Trabajo se centra en dos objetivos fundamentales.

- El primero de ellos es el diseño preliminar de una planta desaladora mediante ósmosis inversa adecuada para la aplicación de energía undimotriz.

Para ello se ha procedido al cálculo del consumo energético específico de un sistema de desalación por ósmosis inversa, en dos casos distintos: con recuperación de energía y sin recuperación de energía. En primer lugar, con ayuda de software comercial, se obtiene el consumo de un sistema de desalación basado en ósmosis inversa sin recuperación energética. En segundo lugar, a partir de esta información, se selecciona una recuperación energética y se calcula el nuevo valor del consumo energético de sistema.

Además se ha tenido en cuenta en todo momento que la energía de las olas es una energía no constante y por ello se han realizado todos los cálculos para varios casos de operación con recurso energético variable.

- Otro objetivo es el dimensionado de esa instalación interconectada con el sistema de conversión de

energía undimotriz para el análisis del comportamiento de la planta en Cabo Verde y en otras localizaciones con distintos consumos energéticos.

1.2 Alcance

El presente Trabajo culmina con una correcta aplicación de todo lo desarrollado a lo largo del mismo para una ubicación como es Praia Grande, en Cabo Verde, para luego extender lo aprendido a otras localizaciones. Para lograr tal fin es necesario llevar a cabo un estudio exhaustivo de la desalación por ósmosis inversa (RO, *Reverse Osmosis*) de las aguas del Océano Atlántico.

Para comenzar se estudian todos y cada uno de los elementos que constituyen un sistema de desalación por RO para poder realizar el diseño preliminar de forma correcta. Posteriormente se eligen los óptimos una vez obtenidos del Proyecto piloto *Wave₂OTM Cabo Verde* los datos necesarios para ello, como puede ser el caudal de alimentación de agua de mar que es capaz de desalar al día.

Para el diseño, además, se debe saber la temperatura y salinidad propia de las aguas de esa zona concreta u obtener unos valores similares (por ejemplo, de la isla canaria de Santa Cruz de Tenerife). Conocida esta información, se procede a calcular consumos energéticos específicos con distintas cargas en operación para compararlos y concluir en qué circunstancias es mejor operar que parar la operación de la planta. Para estos cálculos nos ayudamos de un programa informático llamado ROSA, el cuál nos da el consumo energético específico (SEC, *Specific Energy Consumption*) bruto (sin recuperación energética) para distintos casos de operación a carga parcial (además de con carga total). Los cálculos del SEC neto, con recuperación energética, se realizan a mano a partir de las ecuaciones termodinámicas expresadas en el Capítulo 4.

Por último, con ayuda y el desarrollo de un fichero de Excel, se modela todo este diseño preliminar. De esta forma vinculamos el sistema de desalación por RO previo con el impulso necesario de la energía de las olas de Praia Grande para tal desalación de agua.

A partir de aquí y conocidas las variables necesarias de otros emplazamientos, se podría aplicar lo aprendido a otras localizaciones.

1.3 Estructura

El texto se compone de distintos objetos de estudio localizados de forma deductiva en diferentes capítulos numerados del 1 al 7. Cada capítulo se compone a su vez de distintas secciones en las cuales se estudian aspectos relativos al principal objeto de estudio.

A continuación se explica el contenido de cada capítulo.

Capítulo 1. <i>Introducción.</i>	En este primer capítulo se desarrolla una pequeña introducción del Trabajo, se explican sus principales objetivos, el alcance, la estructura que posee y la metodología que sigue del mismo.
Capítulo 2. <i>Energías marinas.</i> <i>Aplicación a la</i> <i>desalación de agua.</i>	Este es un capítulo completamente teórico en el que se muestra la justificación del Trabajo y se explican todos los aspectos relativos a las energías marinas, como pueden ser el origen o las propiedades de las olas, y se pone de manifiesto su aplicación a la desalación de agua.
Capítulo 3. <i>Aprovechamiento de la</i> <i>energía undimotriz.</i>	En este capítulo se realiza una definición de las principales tecnologías de conversión de energía de las olas y de su viabilidad técnica. Además se introduce el Proyecto piloto de la empresa <i>Resolute Marine Energy</i> en Cabo Verde: <i>Wave₂OTM Cabo Verde</i> . Por último también se exponen

<i>Viabilidad técnica.</i>	diferentes artículos científicos relevantes.
Capítulo 4. <i>Sistema de ósmosis inversa. Diseño preliminar.</i>	La explicación de todos los componentes de un sistema genérico de ósmosis inversa y su funcionamiento se desarrolla en este capítulo, además del diseño preliminar de una planta desaladora que utiliza esta tecnología de membranas. Asimismo se realizan cálculos de consumo energético específico para varios casos distintos que se pueden dar en una planta real.
Capítulo 5. <i>Dimensionado del sistema de desalación autónomo alimentado por energía undimotriz.</i>	Este capítulo se compone del dimensionado del diseño de la planta desaladora interconectado con una instalación de energía undimotriz y se estudia su comportamiento operando a carga total y parcial.
Capítulo 6. <i>Análisis de sensibilidad y otras localizaciones.</i>	El capítulo 6 consta de la aplicación de todo lo aprendido en capítulos anteriores para diversas localizaciones geográficas con diferentes configuraciones en planta. Se realiza un análisis de sensibilidad.
Capítulo 7. <i>Conclusiones y recomendaciones.</i>	Por último, en este capítulo se desarrollan las conclusiones y recomendaciones a cerca de la desalación de agua de mar por ósmosis inversa impulsada por energía undimotriz tras el estudio realizado en el presente Trabajo Final de Grado.

1.4 Metodología

La metodología llevada a cabo a la hora de la elaboración de este Trabajo ha constado de varios procesos.

Primero, una previa dotación y estudio de toda la información necesaria relativa tanto a la desalación, las energías marinas y al proyecto piloto de aplicación emplazado en Cabo Verde.

Posteriormente, se procede a realizar una planificación de todo lo que se iba a desarrollar a lo largo del texto para cerciorarnos así de que la comprensión del mismo fuera fácil y rápida, así como intuitiva.

Se ha optado por la estructura más lógica para fomentar tal comprensión: estructura deductiva de los temas a discusión, desarrollando primero los aspectos generales del estudio para después analizar sus derivaciones.

Para los cálculos, se usan soportes informáticos como son ROSA o Excel, además de cálculos a mano.

Se realizan razonamientos a partir de las comparaciones de los resultados obtenidos, obteniendo así conclusiones y recomendaciones lógicas.

2 ENERGÍAS MARINAS. APLICACIÓN A LA DESALACIÓN DE AGUA

La energía marina es una forma de energía renovable consistente en la explotación, uso o aplicación de la energía que lleva el agua en todas sus formas (océanos, mares, ríos, mareas, corrientes marinas, gradiente salino, gradiente térmico, etc.). Este tipo de energía puede ser transformado en electricidad y contribuir a satisfacer las necesidades energéticas actuales.

Dentro de las energías marinas, existen tecnologías claramente diferenciadas, en función del tipo de aprovechamiento energético. A continuación se describen las distintas tipologías de energías del mar:

- **Energía de las corrientes:** consiste en el aprovechamiento de la energía cinética contenida en las corrientes marinas. El proceso de captación se basa en convertidores de energía cinética similares a los aerogeneradores empleando en este caso instalaciones en el fondo marino.
- **Energía de las olas o Undimotriz:** Es el aprovechamiento energético producido por el movimiento ondulatorio de la superficie del agua del mar. Esta tipología se desarrollará con más detalle en las siguientes secciones.
- **Energía de las mareas o Maremotriz:** Se basa en aprovechar el ascenso y descenso del agua del mar producido por la acción gravitatoria del Sol y la Luna. Un proyecto de una central maremotriz está basado en el almacenamiento de agua en un embalse que se forma al construir un dique con unas compuertas que permiten la entrada de agua o caudal a turbinar, en una bahía, cala, río o estuario para la generación eléctrica.
- **Energía Maremotérmica:** se fundamenta en el aprovechamiento de la energía térmica del mar basado en la diferencia de temperaturas entre la superficie del mar y las aguas profundas. Se requiere que el gradiente térmico sea de al menos 20°C. Las plantas maremotérmicas transforman la energía térmica en energía eléctrica utilizando el ciclo termodinámico de Rankine para producir energía eléctrica cuyo reservorio de mayor temperatura es el agua de la superficie del mar y el reservorio de menor temperatura el agua de las profundidades.
- **Energía del gradiente salino o Energía Azul:** es la energía obtenida por la diferencia en la concentración de sal entre el agua de mar y el agua de los ríos mediante los procesos de ósmosis.

2.1. Energía Undimotriz.

En la presente sección se va a estudiar con más detenimiento la energía de las olas.

Para comenzar, se describe la fuente energética; el origen, la captación y el potencial energético, así como las ventajas y desventajas. Posteriormente, se analiza la aplicación de las energías marinas a la desalación de agua.

2.1.1 Origen.

La energía undimotriz es obtenida a través de la captación de la energía cinética contenida en el movimiento de las olas.

Se define como ola a todo tipo de oscilación en la superficie del agua que sea periódica. Entre las causas que generan esta oscilación se pueden encontrar el viento, las fuerzas gravitacionales de la luna y el sol y movimientos tectónicos.

- De los desplazamientos que se producen debido a la atracción que ejercen sobre las masas oceánicas tanto el sol como la luna, se obtiene como resultado las mareas.
- La variación de temperatura produce modificaciones en la presión atmosférica que a su vez genera grandes desplazamientos de aire en la forma de todo tipo de tormentas.
- La aparición de los acontecimientos sísmicos o erupciones volcánicas generan grandes movimientos ondulares que se propagan grandes distancias en forma ondular.

Sin embargo, de todas ellas, el viento es el factor principal de generación de oleaje. Por ello se puede decir que la energía de las olas del mar es una manera indirecta de la energía solar, ya que el viento es generado por el calentamiento desigual de la superficie terrestre producto del sol, como se ha descrito anteriormente.

Las olas se generan a partir de ondulaciones en las capas superficiales del mar y al crearse estas ondulaciones aumenta la superficie de contacto con el viento, lo que genera más ondulaciones y, eventualmente, la formación de las olas que vemos comúnmente.

- **Propiedades de las olas.**

Si seccionamos la superficie del mar en el mismo sentido de la propagación de sus olas por un plano vertical podremos estudiar sin dificultad los ocho parámetros que las caracterizan:

- Altura (H). Es la distancia vertical entre una cresta y un valle consecutivos.
- Amplitud. Equivale a la mitad de la altura.
- Periodo (T). Es el tiempo medio en segundos transcurrido entre el paso de dos crestas o dos senos, por el mismo lugar.
- Frecuencia. Es el número de crestas o valles que pasan por un punto en un tiempo determinado. La inversa del período.
- Longitud de onda (L). Es la distancia entre dos crestas consecutivas.
- Velocidad (v). Es el avance de la ola.

$$v = \frac{L}{T}$$

- Pendiente (P). Es el cociente entre la altura y la longitud de la ola.

$$P = \frac{H}{L}$$

- Dirección. Punto del horizonte de donde viene la ola. Igual que el viento. No se debe confundir con la dirección de la corriente (hacia donde va).

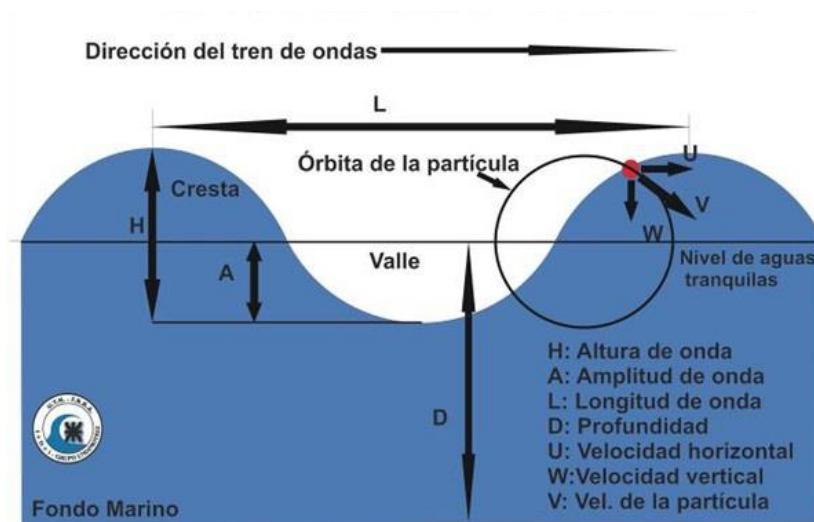


Figura 2-1. Propiedades de las olas: [1].

2.1.2 Captación de energía y potencial energético.

Las olas pueden viajar cientos de kilómetros con mínima pérdida de energía y con una densidad de potencia mayor que la potencia del viento o la potencia del sol.

Cuando una ola se acerca a la costa disminuye su velocidad, decrece en longitud de onda y crece en altura. La mayor parte de la energía se pierde en la fricción con el suelo marino y solo una fracción de la misma alcanza la orilla.

Una ola contiene tanto energía cinética como energía potencial gravitacional. Se puede demostrar que tanto la energía (E) potencial como la cinética asociada a la ola por unidad de área horizontal (A), viene dada por la siguiente expresión:

$$E = \frac{\rho g}{4} \times A^2$$

Donde ρ es la densidad del océano y g la aceleración de la gravedad.

La energía total almacenada en la ola por unidad de area será entonces:

$$E = \frac{\rho g}{2} \times A^2$$

La potencia promedio de la ola por unidad de longitud de frente de ola o transporte de energía de la ola J se puede calcular mediante el producto de la velocidad del frente C por la energía por area horizontal E . Tomando en cuenta que la velocidad de propagación del frente de una onda plana, progresiva, armónica sobre aguas profundas es:

$$C = \frac{\omega}{k} = \frac{g}{\omega}$$

Tendremos que el transporte de energía de la ola vendrá dado por la siguiente expresión:

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

Recordando que la altura H de la ola es dos veces la elevación máxima y que la frecuencia angular temporal ω es 2π entre el periodo de la ola, la ecuación se puede escribir así:

$$J = \frac{\rho g^2}{32\pi} \times TH^2 \quad [W/m]$$

Para un cuerpo flotante aislado expuesto al oleaje, se emplea el ancho de captura para evaluar el desempeño del dispositivo para capturar la potencia del oleaje. A una frecuencia dada, el ancho de captura $L(\omega)$ se define como la potencia media absorbida por el cuerpo P entre la potencia promedio por unidad de ancho de cresta de la ola incidente J :

$$L(\omega) = \frac{P}{J} \quad [m]$$

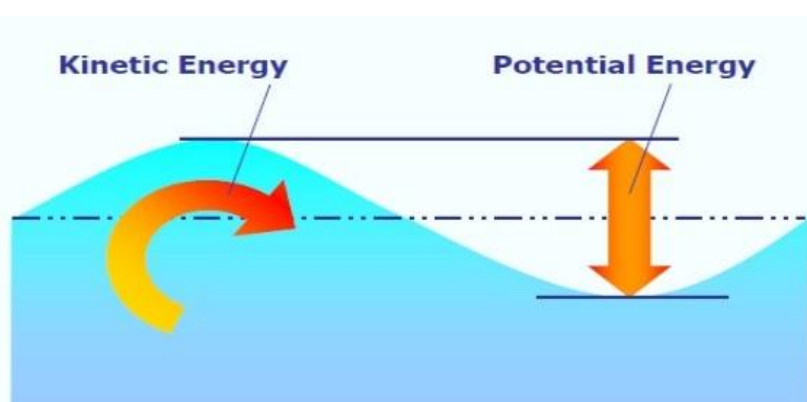


Figura 2-2. Energía cinética y potencial de las olas.

La potencia transportada por la ola depende de la altura y del período, y es usualmente dada en unidades de potencia entre unidades de longitud (anchura del frente de onda) (W/m). Su potencia eléctrica nominal son 0.5 MWe, refiriéndonos a un valor habitual de potencia para 1 m de ancho del frente de ondas.

Como ocurre con las otras formas de energía renovable, la energía de las olas no esta distribuida uniformemente alrededor del planeta.

La distribución global de los niveles de potencia de las olas se muestra en la *Figura 2-3*, donde las unidades están dadas en kW/m de frente de onda. Como se puede observar, las mayores fuentes de energía undimotriz se encuentran entre los 30 grados y los 60 grados de latitud en ambos hemisferios (a lo largo de la costa occidental de Europa, fuera de las costas de Canadá y Estados Unidos y en la costa sur de Australia y América del Sur).

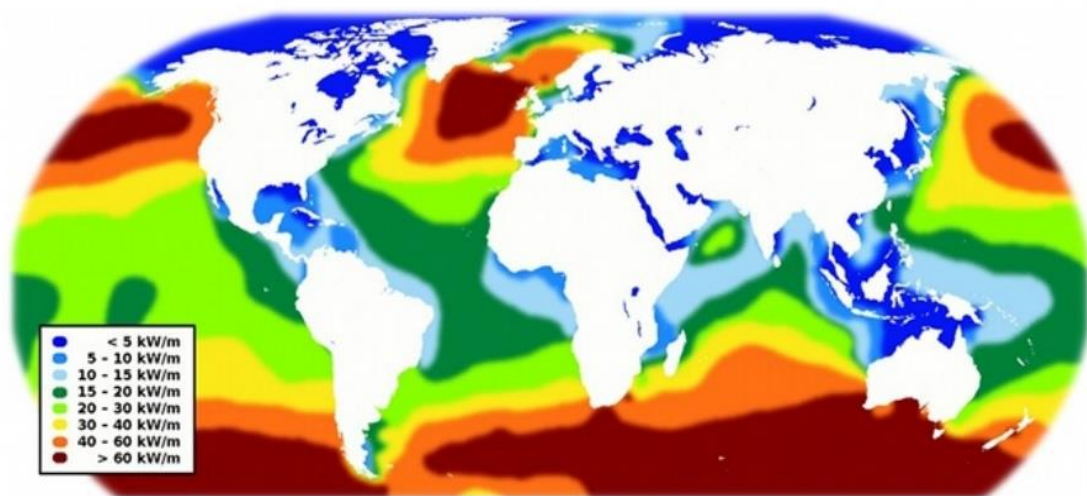


Figura 2-3. Distribución global de los niveles de potencia de las olas: [2].

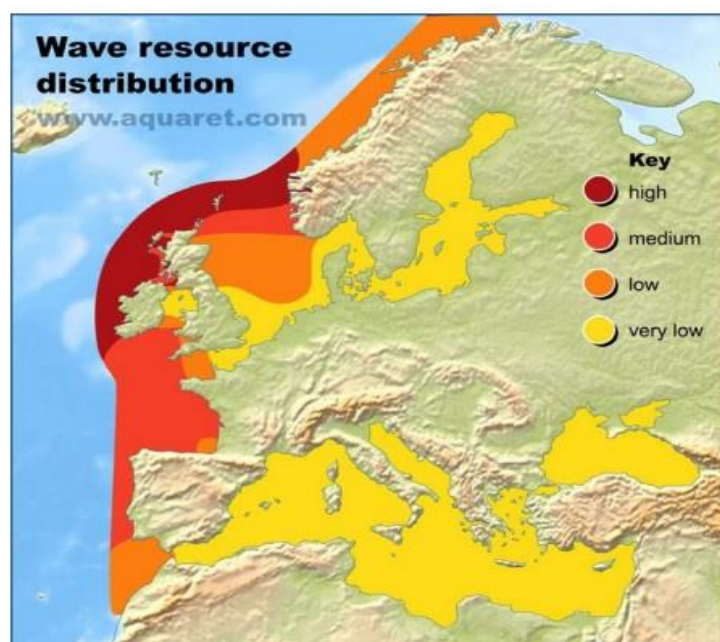


Figura 2-4. Distribución de los niveles de potencia de las olas en Europa- [3].

2.1.3 Ventajas y desventajas.

En esta sección se discutirán las ventajas que tendría el aprovechamiento de la energía undimotriz, así como sus inconvenientes.

- **Ventajas:**

1.- Es una energía limpia.

El aprovechamiento de la energía de las olas no implica emisiones de los nocivos gases de efecto invernadero. Esta es la mayor motivación a la hora de desarrollar esta tecnología. Tenemos la urgencia de hallar fuentes de energía que sustituyan a los combustibles fósiles que son muy contaminantes.

2.- Es renovable.

Se conoce como energía renovable aquella energía que utiliza los recursos inagotables de la naturaleza. De esta forma, como esta fuente de energía se origina de manera indirecta mediante la energía solar, es inagotable y, consecuentemente, renovable.

3.- Tiene un enorme potencial energético.

La cantidad de energía que contienen las olas es enorme. Por cada 10 m² de superficie de olas de 1 metro de altura se estima que se puede obtener entre 20 y 40 kW. A medida que nos adentramos en el océano, se puede llegar a los 100 kW por metro de altura y 10 m² de superficie.

4.- Es segura.

Todos los días hay olas y raramente se interrumpen. Esto hace que las olas sean una fuente de producción de energía bastante fiable, a diferencia de la energía solar o eólica que dependen de la climatología en gran medida.

Debería aclararse que la cantidad de energía de las olas varía de año en año o de estación en estación. Por ejemplo, en el hemisferio norte la energía potencial en el mes de noviembre duplica a la del mes de mayo.

La energía de las olas y del viento tiene mayor potencial en invierno lo que es estupendo, pues se puede combinar con la energía solar cuyo mayor potencial se da precisamente en verano.

5.- Eficiente respecto al espacio.

Una granja marina de olas con una superficie de menos de una milla cuadrada (1.6 kilómetros cuadrados aprox.) puede generar más de 30 MW, pudiendo cubrir las necesidades de 20.000 hogares. Además no provoca un gran impacto visual.

- **Desventajas:**

1.- Efectos medioambientales.

Si se ven afectadas las plantas cercanas a la orilla que son además visibles desde tierra, se pueden ocasionar conflictos con intereses turísticos o con la aceptación de población local. Debido a esto, las instalaciones deben someterse a un riguroso estudio para minimizar impactos al medio y encontrar el tamaño y el emplazamiento óptimos.

Hoy en día desconocemos los efectos de las instalaciones de energía undimotriz sobre la vida marina.

2.- Costes.

La energía de las olas está todavía en periodo de desarrollo, lo que significa que los costes son todavía muy grandes. Encontrar lugares con olas óptimos, mejorar la conexión a la red eléctrica y la vida útil de las instalaciones son factores que afectan significativamente al precio de este tipo de energía.

Por ello, en la actualidad los costes son generalmente altos pero en un futuro próximo serán cada vez más competitivos.

3.- Mantenimiento.

Casi todas las partes involucradas en las instalaciones para aprovechar la energía de las olas requieren un mantenimiento regular y esto redonda una vez más en los costes.

En resumen, el aprovechamiento de la energía de las olas o energía undimotriz tiene un gran potencial. Sin embargo, sigue siendo necesario más inversión en la investigación de mejores tecnologías para hacerla más competitiva con otras formas de energía.

2.2 Aplicación de las energías marinas a la desalación de agua.

La desalación de agua de mar o salobre se aplica para obtener agua potable principalmente para poblaciones, hoteles, industrias, islas remotas e irrigación en zonas de ocio y agrícolas.

Sin embargo, los requisitos energéticos de los procesos de desalinización son altos. Por ello, el suministro de energía en países de bajo desarrollo o áreas aisladas puede ser un problema, especialmente si se requiere electricidad. Dado que la mayoría de las regiones áridas tienen altos recursos de energía renovable, el uso de energías renovables en la desalación del agua de mar presenta una oportunidad interesante, o incluso la única forma de ofrecer una fuente segura de agua dulce.

En la aplicación de las energías del mar a desalación de agua es importante destacar que esto implica que la planta pueda colocarse lo más cercana posible a la línea de costa.

A continuación se revisan las tecnologías de aplicación y el desarrollo del acoplamiento de sistemas de energías marinas con unidades de desalinización. Se señala que hay lugar de desarrollo incluso para tecnologías que parecen ser las más maduras.

2.2.1 Tecnologías de desalación.

Las tecnologías de desalación industrial aplicables al uso de energía undimotriz usan membranas semipermeables para separar el solvente o algunos solutos.

Son procesos de membrana la ósmosis inversa (RO) y electrodiálisis (ED). Este último sólo es aplicable a aguas de baja concentración salina (agua salobre), por lo tanto no es una opción de interés en el uso de energías marinas. La RO requiere electricidad o potencia en el eje de la bomba para impulsar y aumentar la presión del agua salada de alimentación. Normalmente alrededor de 55 bar para la desalinización del agua de mar.

Todos los procesos de desalación requieren un pretratamiento químico del agua de mar y también requieren un post-tratamiento químico.

ED requiere electricidad. Ambos, RO y ED, se usan para la desalinización de agua salobre, pero solo los RO compiten con los procesos de destilación en la desalación de agua de mar.

Los procesos dominantes en la industria de la desalación de agua de mar son destilación MSF (*Multi-Stage Flash*) y RO: 44% y 42% de la capacidad mundial, respectivamente. El proceso MSF representa más del 93% de la producción del proceso térmico, mientras que el proceso de RO representa más del 88% de la producción de procesos de membrana- [4].

2.2.2 Energía oceánica.

La energía oceánica consiste en el aprovechamiento de la energía de las olas, las mareas y el gradiente térmico del mar. Su potencia nominal son 0.5, 240 y 40 MWe, respectivamente.

Por otro lado, la conversión de energía térmica oceánica es una tecnología ya experimentada y constatada, sin embargo, su alto coste limita su desarrollo comercial. Esta tecnología se basa en un ciclo de conversión de energía mediante la diferencia de temperatura entre el agua de mar superficial y agua de mar a una profundidad de 1000 m o incluso más. El agua de mar caliente pasa por una cámara de vacío y se condensa, después de la expansión, por agua fría.

Una variedad de diferentes sistemas de desalación impulsados por energía oceánica se diseñaron de la siguiente manera: Rabas y Panchal (1991) describen un sistema de desalinización de MSF acoplado a un sistema de energía oceánica térmica. Además, Rey y Lauro (1981) analizan el acoplamiento de una planta de conversión de energía térmica impulsada por el gradiente térmico del mar y una unidad de destilación.

Con respecto a la desalinización impulsada por olas, la Universidad de Delaware (EE. UU.) desarrolló una planta RO impulsada por olas, denominada DELBOUY. Su comercialización comenzó en 1985 por ISTI Delaware, Inc. Se evaluaron diferentes capacidades de planta desde $6 \text{ m}^3 / \text{día}$ disponible ya que el sistema es modular. La experiencia operativa mostró un período de amortización de cinco años (Hicks et al., 1989). Además, McCormick y Kim (1997) ofrecen estimaciones de costes para un sistema de RO impulsado por olas en planta de menos de 1 dólar por 1000 galones cuando el sistema opera en un mar con una altura media de ola de 1.5 m y un período de 7.5 s.

Por otro lado, Heath (1996) propuso un sistema híbrido de energía eólica y undimotriz conectado a una unidad de destilación. Las ventajas de tal sistema serían la disponibilidad de una fuente de energía más regular que la energía eólica.

Como conclusión, se puede afirmar que el uso del sistema RO parece ser razonable para la aplicación de energía undimotriz, a pesar de que la energía de las olas no sea comercial. Actualmente, debido a los avances de la tecnología RO, las aplicaciones con procesos de compresión mecánica de vapor (MVC, Mechanical Vapour Compression) deberían descartarse por excesivos consumos. A título de ejemplo, mientras que en el Atlántico el consumo principal de un proceso RO está en torno a 2 kWh/m^3 , el del proceso MVC sería superior al doble.

3 APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ. VIABILIDAD TÉCNICA

Las tecnologías en las que se basa el aprovechamiento de la energía de las olas están en continuo desarrollo y aunque existen distintos tipos de aplicaciones reales, se están diseñando en la actualidad nuevas instalaciones y también existen otras que aún no se han implantado. A continuación se explican las principales y más maduras tecnologías de conversión de energía undimotriz.

3.1 Tecnologías de conversión de energía.

El movimiento de las olas puede convertirse en energía mecánica y luego en energía eléctrica usando sistemas apropiados. Los convertidores de energía de las olas generalmente se refieren en la literatura como dispositivos WEC que es el acrónimo en inglés de *Wave Energy Converter*.

Existen alrededor de cuarenta mecanismos para explotar la energía de las olas. Se dispone de diferentes clasificaciones de los dispositivos que extraen energía de las olas. Según el sitio de la instalación, los convertidores de energía de las olas se clasifican en convertidores de aguas profundas, aguas intermedias y profundidades reducidas; tal y como se muestra en la figura:

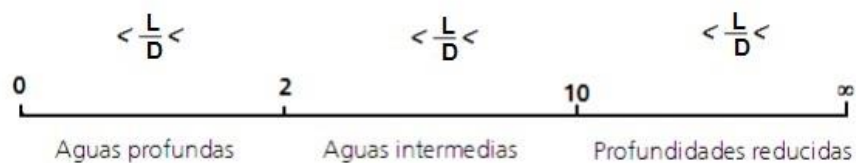


Figura 3-1. Clasificación de WEC según profundidad de instalación.

Su distinción se basa en la teoría lineal, concretamente en función de la longitud de onda y la profundidad.

También podemos clasificar los dispositivos de energía de las olas en función del mecanismo efectivo por el que absorben la energía de éstas. Esta clasificación se divide en tres grupos principales, columna de agua oscilante (CAO), rebosamiento y movimiento oscilatorio.

- Columna de Agua Oscilante.

Como su nombre indica, la columna de agua oscilante u OWC (*Oscillating Water Column*) aprovecha el recurso energético de las olas mediante la oscilación del agua en el interior de una cámara.

Cuando la ola penetra en la cavidad, aumenta la presión interior de la columna, ejerciéndose una fuerza sobre el aire encerrado que es obligado a pasar por una turbina. Finalmente un generador de inducción acoplado a la turbina y conectado a la red proporciona la salida eléctrica.

Por otra parte, el movimiento de retroceso de la ola hace que la presión disminuya, lo que provoca que el aire vuelva desde la atmósfera para llenar el vacío resultante. En este caso la succión de aire hacia la cámara se realiza nuevamente a través de la turbina.

El mecanismo de funcionamiento del sistema OWC se presenta en la siguiente figura:

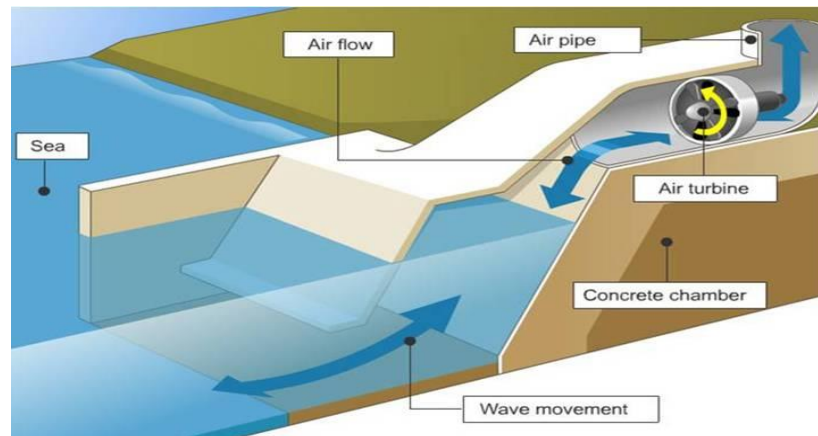


Figura 3-2. Columna de agua oscilante fija: [5].

Los dispositivos OWC presentan una eficiencia fuertemente dependiente de la frecuencia de la ola incidente. Con geometrías optimizadas, la eficiencia puede variar entre un 10% y un 90%.

Este tipo de principio de captación suele ser implantado, como se muestra en la anterior figura, en instalaciones en la línea de costa o rompe olas. No obstante, también han sido desarrollados dispositivos flotantes para su instalación lejos de la costa. En ellos, la cámara de aire es sustituida por una cavidad cilíndrica donde se produce la ascensión y descenso de la columna de agua.

- Rebosamiento.

Este principio puede entenderse como la transferencia al mar de la generación hidráulica convencional. Los dispositivos están diseñados con rampas por las cuales ascienden las olas incidentes hasta alcanzar un reservorio de agua en la parte superior. Este agua almacenada se conduce a través de una turbina hidráulica conectada a un generador que se encarga de producir electricidad. La instalación puede estar dotada de más de un reservorio de agua, a distintos niveles, y de varias turbinas. Este tipo de principio puede ser empleado tanto en instalaciones en la línea de costa como en plataformas flotantes alejadas de la costa.

Algunos ejemplos de instalaciones en línea de costa son el dispositivo Tachan o SSG, y en estructuras flotantes, el caso más representativo es el Wave Dragon, mostrado en la figura siguiente:



Figura 3-3. Wave Dragon- [6].

Este dispositivo utiliza un diseño reflector que concentra las olas en dirección a una rampa para llenar un reservorio ubicado a un nivel más alto. La electricidad se produce cuando el agua del reservorio desciende por un conducto que mueve una turbina acoplada a un generador.

Desde 1998 el desempeño de este sistema ha sido optimizado a través de modelación numérica y de mediciones en tanques experimentales. Las mejoras se han enfocado en el diseño del reflector y de la sección transversal de la rampa. Actualmente se está enfocando la investigación en el desarrollo de una unidad múltiple de generación de 77 MW- [7].

- Movimiento Oscilatorio.

En este principio se aprovecha el movimiento relativo entre las partes del dispositivo en alguno de los grados de libertad posible. Dicho movimiento está obviamente generado por el oleaje.

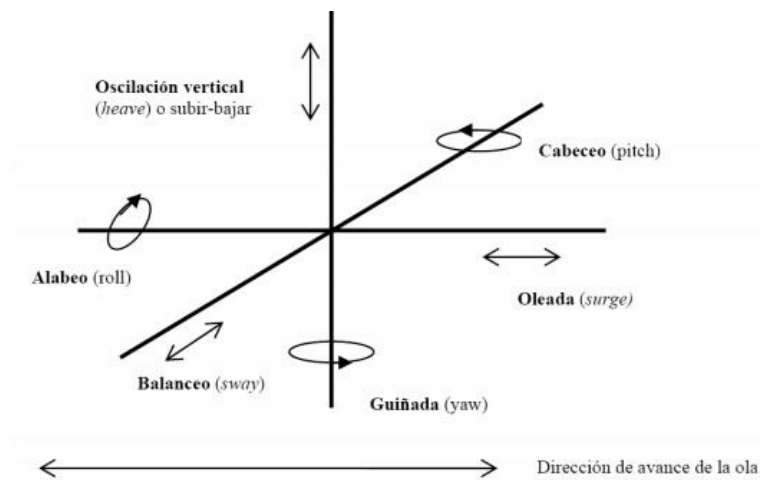
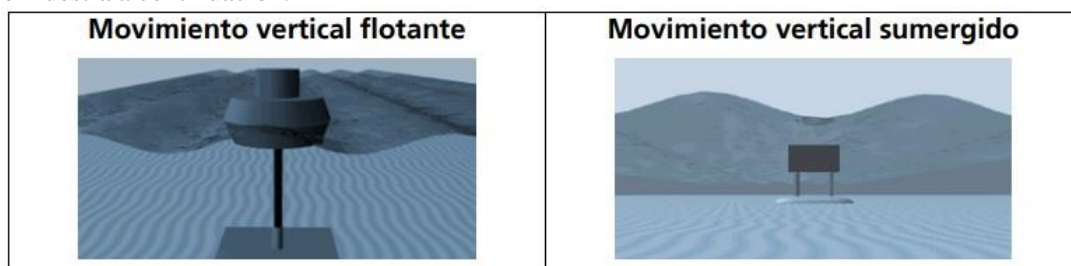


Figura 3-4. Movimientos relativos provocados por el oleaje.

Dentro de este grupo, los dispositivos pueden ser divididos por el tipo de movimiento concreto que aprovechan como se muestra a continuación:



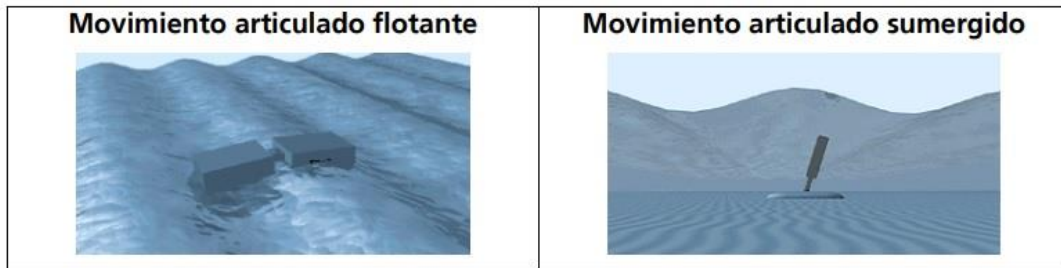


Figura 3-5. Ejemplos de WEC oscilantes según sus movimientos relativos.

Además, otros sistemas de aprovechamiento de energía undimotriz conocidos son los siguientes:

Pato de Salter.

Este sistema fue uno de los primeros que se construyó para extraer energía mecánica de las olas (1970), inventado por Stephen Salter.

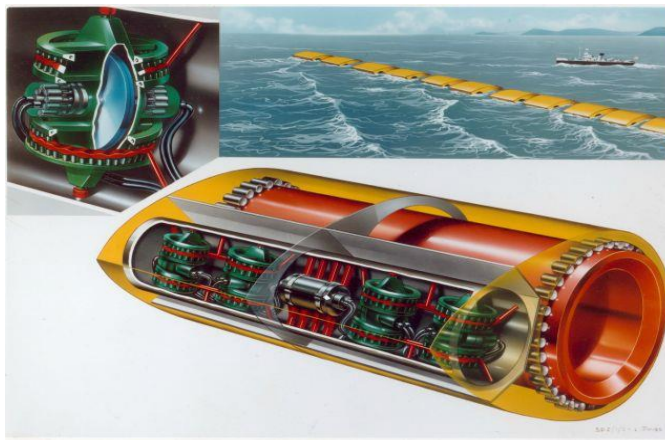


Figura 3-6. Pato de Salter- [8].

El sistema de Salter debe ser anclado al lecho marino, a unos 80 km de la costa, para que la cámara rote sobre su eje y así produzca el movimiento rotatorio mecánico que luego se convertirá en energía eléctrica. La conversión del movimiento de flote en energía eléctrica se dificulta cuando las oscilaciones del mar son lentas.

A pesar de ser el sistema más eficiente inventado hasta ahora, nunca ha sido implementado debido a su complejo sistema hidráulico que hace costosa y arriesgada la inversión para un sistema a plena escala.

Pelamis

El convertidor de energía de las olas, Pelamis, fue inventado en Escocia y consiste en cuatro cilindros articulados de 3.5 m de diámetro y 30 metros de longitud que hacen de flotadores y tres cilindros articulados de 3.5 metros de diámetro y 5 metros de longitud que son las unidades generadoras de energía. Esta estructura, con unos 140 metros de longitud total, es colocada anclada y semisumergida en aguas profundas, como se puede observar en la siguiente imagen:

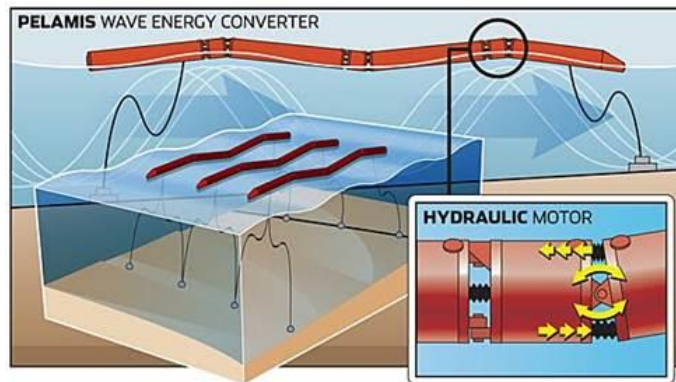


Figura 3-7. Pelamis: [9].

Debido al oleaje, el sistema Pelamis realiza un movimiento serpenteante de arriba a abajo y de lado a lado. Este movimiento se transmite a un sistema hidráulico que a su vez mueve los generadores eléctricos. Cada uno de los módulos de potencia es capaz de generar 250 kW para un total de 750 kW: [7].

Los dispositivos se encuentran normalmente diseñados para aprovechar sólo uno de los movimientos, aunque existen casos, como el Pelamis, pensados para aprovechar tanto el movimiento vertical (heave) como el balanceo (sway).

El cilindro oscilante de Bristol

El cilindro de Bristol consiste de un cilindro flotante que recoge el movimiento de las olas. El cilindro está mecánicamente conectado a una unidad de energía mediante un sistema mecánico formado por palancas y uniones flexibles. Las uniones se mueven lentamente siguiendo el movimiento del cilindro permitiendo así la transferencia de energía al eje de la unidad convertidora. La unidad convertidora se encuentra ubicada en el lecho marino sobre la misma estructura que sirve de anclaje. En la siguiente figurase muestra el sistema cilindro de Bristol:



Figura 3-8. Cilindro de Bristol.

3.2 Viabilidad técnica.

A fin de justificar la viabilidad técnica de la aplicación de energía undimotriz en la desalación de agua mediante ósmosis inversa se va a estudiar el proyecto piloto de la empresa *Resolute Marine Energy* en Cabo Verde: *Wave₂OTM Cabo Verde*.

3.2.1 Wave₂O™ Cabo Verde.

El 21 de diciembre de 2015, el Fondo de Energía Sostenible para África (SEFA), auspiciado por el Banco Africano de Desarrollo, otorgó a Cabo Verde una subvención de \$ 930000 para desarrollar el primer sistema de desalación impulsado por olas del mundo. Wave₂O™, que se ubicará en Praia Grande, Cabo Verde, operará completamente sin conexión a la red y suministrará agua dulce a más de 48,000 personas a un coste competitivo. Se espera que el sistema tenga una capacidad de 4000 m³/d de agua y eliminará 5400 toneladas métricas de CO₂ por año [10].

El sitio seleccionado podría permitir una ampliación significativa del proyecto piloto de Wave₂O™ en una planta de tamaño comercial (más de 20000 m³/d).



Figura 3-9. Ubicación del proyecto piloto Wave₂O™: Praia Grande, Cabo Verde.

Resolute Marine Energy (RME) Cabo Verde, subsidiaria de la compañía Resolute Marine de Estados Unidos, es la empresa que desarrollará el proyecto, para lo cual ha tenido en cuenta las abundantes olas de las costas de caboverdianas con las que puede operar esta tecnología de forma rentable y llevar a cabo un proyecto pionero en esta parte del mundo.

El acceso de Cabo Verde a recursos hídricos sostenibles es el segundo más bajo de todos los países del África subsahariana y esta escasez constante de agua dulce crea condiciones de vida estresantes para toda la población.



Figura 3-10. Escasez de agua potable en el África subsahariana.

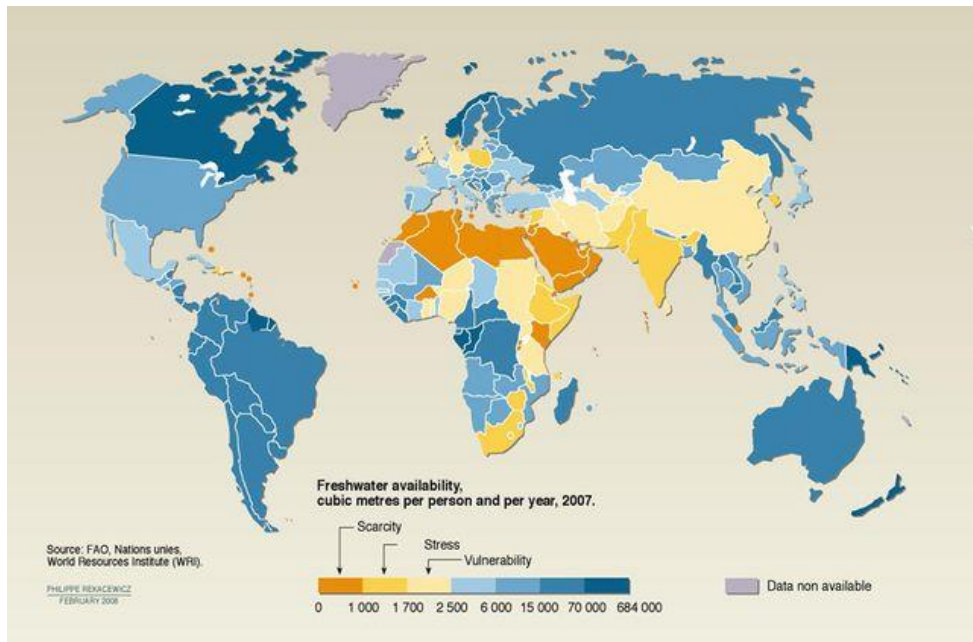


Figura 3-11. Disponibilidad mundial de agua potable: [11].

La desalinización del agua de mar es una solución ideal para estos problemas (el 70% de la superficie de la Tierra está formada por océanos) pero es un proceso extremadamente intensivo de energía.

Si bien Cabo Verde cuenta con abundantes recursos de energía renovable que incluyen energía solar, eólica y biomasa, la mayor parte de su electricidad se genera actualmente a través de combustibles fósiles importados, lo cual es costoso y ambientalmente deficiente.

El exclusivo programa *Wave₂OTM* ayudará al país a cumplir su ambicioso objetivo de reemplazar la generación de electricidad basada en combustibles fósiles con un 100% de energía renovable para 2020 y, además, mejorará el control sobre los precios de la energía.

Cabo Verde representa el camino más corto hacia la comercialización porque se ha asegurado el compromiso de la empresa local de electricidad y agua, Electra, de comprar una planta *Wave₂OTM* a gran escala después de que se hayan completado con éxito los ensayos de una planta a escala piloto.

Conexión	No eléctrica
Estado actual	Planificado
Coste de la inversión	20,000.000 €
Tipo	Energía undimotriz
País	Cabo Verde
Categoría RE&EE (Energía Renovable y Eficiencia Energética)	Ola, océano y energía mareomotriz

Tabla 3-1. Información sobre el proyecto *Wave₂OTM*: [12].

3.2.2 Wave₂O™ Cabo Verde. Solución propuesta.

Los sistemas de desalinización por ósmosis inversa (RO) tradicionales requieren una conexión a la red eléctrica fuerte. Sin embargo, debido a que los países en desarrollo normalmente carecen de capacidad suficiente de red eléctrica y no pueden pagar el capital o el tiempo necesarios para construir y desplegar sistemas de RO tradicionales, Wave₂O™ propone una solución innovadora a este problema: el primer sistema de desalinización que se puede implementar rápidamente, operar completamente sin conexión a la red eléctrica y suministrar grandes cantidades de agua dulce a un coste competitivo.

Wave₂O™ estará diseñado para incluir los siguientes beneficios para el cliente:

1. Baja inversión de capital.
2. Despliegue rápido.
3. Operación y mantenimiento simple.
4. Fácilmente escalable.
5. Impacto ambiental mínimo en comparación con los sistemas de RO controlados por diésel.
6. Bajo coste por m³ de agua producida.

Wave₂O™ consiste en convertidores de energía undimotriz o energía de las olas (WEC) y dos contenedores de 30 pies desplegados en el perímetro de la zona de oleaje (es decir, cerca de la costa); uno que alberga equipos que producen energía eléctrica y otro que produce agua dulce.

Los WEC se conectarán a los contenedores mediante varias tuberías flexibles que transportan agua de mar presurizada hacia y desde los WEC. Además, presurizan el agua de mar que se canaliza a tierra para impulsar un sistema de desalación por ósmosis inversa.

Una ventaja importante de Wave₂O™ es que la salmuera (subproducto salino del proceso RO) se diluye antes de volver al mar y, por lo tanto, no daña el medio ambiente.

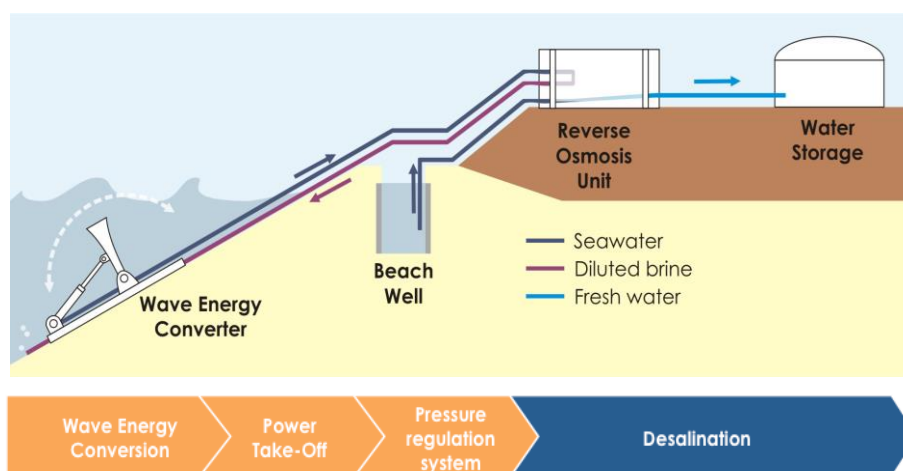


Figura 3-12. Sistema de desalación de olas Wave₂O™ operando sin electricidad— [13].

En la etapa comercial, una planta de 15 WEC puede producir 4000 m³/día de agua dulce. Las características más destacables del proyecto serían las siguientes:

- Agua de bajo coste: € 1.0/m³ antes de ganancias y financiación.
- Retorno financiero: IRR de capital > 25% en lanzamiento de mercado.
- Rápida recuperación: Retribución de 6 años para socios de financiación.
- Bajo coste de capital: € 20 M de costo total - 60% de financiación de la UE.
- Impacto: proporciona agua para 48000 personas.



Figura 3-13. Esquema del proyecto Wave₂OTM operando con 15 WEC: [13].

En Cabo Verde, el primer sistema Wave₂OTM puede ser inmediatamente competitivo y es tres veces menos costoso que la alternativa principal: los sistemas de desalinización impulsados por diésel.

Otros aspectos a discutir sobre el presente proyecto piloto serían los mostrados a continuación:

1. Escogido un emplazamiento adecuado, la energía auxiliar de bombear el agua de mar hasta la propia planta de desalación sería mínima. Por lo tanto, se puede afirmar que en el emplazamiento elegido, al estar en una zona de costa, la energía empleada para el bombeo es mínima y, por ello, su coste también.
2. El aprovechamiento de energía procedente del movimiento debido a olas permite el concepto de aplicaciones mar adentro, análogo al off-shore de parques eólicos.

Otra alternativa que también podría utilizarse en desalación es la energía de las corrientes marinas. Las turbinas submarinas son una realidad y su implantación crece a pasos agigantados. El objetivo es extraer energía de las corrientes marinas por medio de "granjas" de turbinas que normalmente se colocan en el fondo del mar. Con ellas se aprovechan las corrientes marinas para generar electricidad del mismo modo que operan los aerogeneradores.

Existen diferentes tipos, los cuales se muestran a continuación:

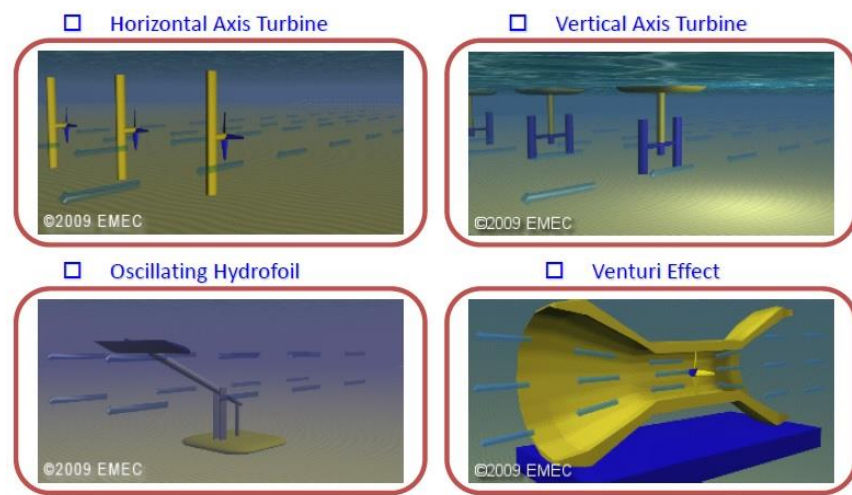


Figura 3-14. Tipos de turbinas submarinas: [14].

Sin embargo, con carácter general no se daría en el mismo emplazamiento, la demanda de agua desalada y el recurso de corrientes marinas con velocidades de interés a lo largo del año para su explotación. Por tanto, el aprovechamiento de la energía de las olas es más idóneo.

3. Los criterios en los que se basa la elección del emplazamiento óptimo de instalaciones de energía undimotriz, eólica, solar y biomasa son bastante parecidos. En particular, dado que las olas tienen su

origen en el viento, coinciden las localizaciones con abundantes recursos energéticos de viento y de olas.

Los criterios fundamentales para la elección del emplazamiento donde se situarán las instalaciones eólicas son principalmente la frecuencia de la existencia de vientos y la media-alta velocidad que éstos posean. Además se consideran la orografía del terreno, impacto ambiental y proximidad a la red eléctrica. La elección óptima sería la de un emplazamiento con las siguientes características:

- Elevada velocidad media. Las velocidades medias han de ser lo más altas posibles. El emplazamiento además ha de tener buena exposición al flujo de aire y sin obstáculos.
- Variaciones diurnas y estacionales aceptables.
- Aceptables niveles de vientos extremos y turbulencia. Son estos factores que afectarán a la integridad estructural y vida útil del sistema. Hay que conocer la velocidad máxima alcanzada además de la probabilidad de que esta se produzca.

Estas características se pueden dar con más frecuencia en zonas costeras, llanos y llanuras elevados y valles o pasos entre montañas.

Como vemos, uno de los lugares idóneos el que se dan estas condiciones son lugares costeros bien expuestos en áreas de fuertes vientos de altura, fuertes gradientes térmicos o de presión; lugar idóneo también para el emplazamiento de una instalación de energía undimotriz (como lo es Praia Grande, Cabo Verde). Esta implantación de energía eólica en zonas costeras o en mar adentro se conoce como “eólica off-shore”.

Además, se sabe que el mar, a parte de proporcionar recursos energéticos marinos y eólicos, proporciona también biomasa del fondo marino en forma de algas y que tienen cierta utilidad en determinados sectores.

Se puede añadir, como se ha definido en el capítulo anterior, se puede decir que la energía de las olas del mar es una manera indirecta de la energía solar, ya que el viento es la principal fuente de formación de olas y es generado por el calentamiento desigual de la superficie terrestre producto del sol.

De todo esto, podemos obtener como conclusión que hay una íntima conexión entre las energías renovables undimotriz, eólica, solar y biomasa en relación a la localización con grandes recursos de dichas energías. Es por ello por lo que se podría proponer instalaciones híbridas. A continuación se muestran dos ejemplos.

- Undimotriz-Eólica:

Como se ha estudiado, existen iguales emplazamientos óptimos para ambas energías por lo que una instalación híbrida en días de grandes recursos de viento podría producir energía para cubrir en gran medida las necesidades demandadas.

Sin embargo, ambas energías renovables dependen de las condiciones de viento para su producción, por lo que en días desfavorables, no se produciría energía en la instalación.

Como solución se podría disponer de almacenadores de energía como pueden ser sistemas basados en el hidrógeno, entre otros.

- Solar Fotovoltaica-Eólica:

Los sistemas híbridos que combinan energía fotovoltaica con energía eólica optimizan las mejores condiciones del viento y el sol, complementándose entre sí. Los días fríos y de viento, normalmente nubosos, apenas permiten aprovechar la luz solar, pero son ideales para los aerogeneradores. Por su parte, los días de anticiclón suelen provocar cielos despejados con poco viento, y por tanto, más adecuados para las placas fotovoltaicas.

El principio de funcionamiento de una instalación híbrida es idéntico al de una instalación solar, con el valor añadido de tener un generador eólico con su respectivo regulador, el cual transforma la señal alterna producida por el aerogenerador en continua para inyectar en el circuito común al campo de paneles solares.

Por otra parte, se puede afirmar que una potencia nominal (o capacidad de desalación) de consumo de la ósmosis inversa razonable a día de hoy para una aplicación de energía undimotriz puede ser de entre unos 3 ó 4 kWh/m³ de agua.

3.3 Artículos científicos relevantes.

- **Revisión de los sistemas de desalinización de agua integrados con energía renovable-** [15].

La desalación es un proceso de consumo energético significativo, en el cual producir 1000 m³ de agua por día requiere alrededor de 10000 toneladas de combustibles fósiles por año. Reemplazar el combustible fósil por recursos energéticos renovables y sostenibles se convierte en una necesidad crucial para disminuir 'la huella de carbono' y la emisión de gases de efecto invernadero que son las principales razones del calentamiento global y del cambio climático. El propósito de este artículo es evaluar la tecnología, la energía y el coste de los últimos avances disponibles en sistemas de desalación y su potencial para integrarse con la energía renovable.

Los sistemas de desalación se pueden clasificar según la fuente de energía o según el proceso de desalación.

La ósmosis inversa (RO) seguida de varias etapas, los sistemas de destilación multietapa por efecto flash (MSF) y de destilación multiefectos (MED) son las tecnologías de desalación más implementadas a nivel mundial.

De acuerdo con la Asociación Internacional de Desalación (IDA) 2015, más de 300 millones de personas dependen del agua producida por 18426 plantas de desalinización en 150 países, que proporcionan más de 86,8 millones de m³ al día.

Los países occidentales desarrollados prefieren los sistemas de RO debido a su consumo eficiente de energía, mientras que los países de Medio Oriente y del Golfo prefieren los sistemas de MSF y MED debido a la abundante fuente de petróleo disponible.

La tecnología de desalinización más simple es el sistema de destilación solar (SD), que es adecuado para las áreas remotas con una pequeña demanda de agua debido a la baja productividad de estos sistemas.

La *Figura 3-13* presenta la contribución global reciente de cada tecnología de desalación.

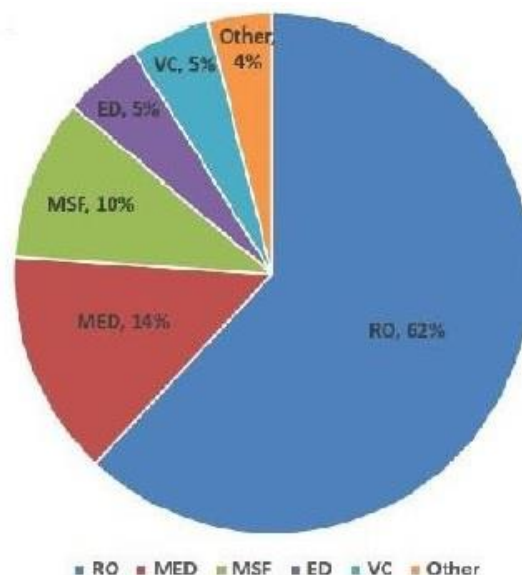


Figura 3-15. Contribución global reciente de cada tecnología de desalinización.

A continuación se analizan las ventajas y desventajas de algunas tecnologías comerciales de desalinización.

Tecnología	Ventajas	Desventajas
SD	Bajo coste de inversión. Bajo mantenimiento. Bajo consumo de energía. Amigable con el medio ambiente.	Baja productividad por unidad de área.
MSF	Fácil de administrar y operar. Puede tratar agua muy salada hasta 70,000 mg / l.	No puede operar a menos del 60% de su capacidad. No apto para combinar con energías renovables que tienen suministros de energía intermitente. Uso de alta energía (3-5 kWh / m ³ de electricidad y 233 MJ / m ³ - Se requiere 258 MJ / m ³ de calor).
MED	Se puede operar entre 30% y 100% de capacidad mientras que la unidad MED sea mantenida bajo vacío y circulación fría.	Se requieren antiincrustantes para detener la acumulación de salmuera en las superficies donde se evapora.
RO	Se adapta fácilmente a las condiciones locales. El tamaño de la planta puede ajustarse para satisfacer los aumentos a corto plazo en la demanda según sea necesario. Ventaja de coste significativo en el tratamiento de aguas subterráneas salobres. Puede eliminar la sílice. El coste de capital es aproximadamente un 25% menor que las opciones térmicas.	Requiere pretratamientos integrales que se utilizarán para agua con alto contenido de sal. Ensuciamiento de la membrana. Configuración compleja. Requiere personal cualificado para operación y mantenimiento.
ED	Sólo apta para aguas salobres de baja concentración. Alta tasa de recuperación de hasta 94%. Membranas de vida más larga (hasta 15 años)	Capital intensivo y costoso en comparación con RO.

	cuando funcionan correctamente).	
	Puede combinarse con RO para una mayor recuperación de agua de hasta 98%.	

Tabla 3-2. Ventajas e inconvenientes de las tecnologías de desalación.

Pasamos a analizar el requerimiento de energía de las principales tecnologías de desalinización.

	MSF	MED-TVC	MED	MVC	RO	ED
Tamaño de unidad típico (m ³ /d)	50,000 - 70,000	10,000 - 35,000	5,000 - 15,000	100 - 2500	24,000	- 145,000
Consumo de energía eléctrica (kWh/m ³)	4 - 6	1.5 - 2.5	1.5 - 2.5	7 - 12	3 - 7	2.6 - 5.5
Consumo de energía térmica (kJ/kg)	190 - 390	145 - 390	230 - 390	None	None	None
Equivalencia eléctrica de la energía térmica (kWh/m ³)	9.5 - 19.5	9.5 - 25.5	5 - 8.5	None	None	None
Consumo total de energía equivalente (kWh/m ³)	13.5 - 25.5	11 - 28	6.5 - 11	7 - 12	3 - 7	2.6 - 5.5

Tabla 3-3. Requerimiento de energía de las tecnologías de desalación, (2017).

La siguiente Tabla 3-4 muestra el coste aproximado en USD/m³.d de las principales tecnologías de desalinización.

	MSF	MED	RO
Costes de inversión	1,700-2,900	1,700-2,700	1,300-2,500
Costes operacionales	0.65-1.25	0.67-0.96	0.58-0.88
Costes totales anuales	0.84-1.6	1.21-1.59	1.06-1.36

Tabla 3-4. Coste aproximado de las tecnologías de desalación en USD/m³.d.

El costo aproximado de la energía renovable es aproximadamente (0.1-0.2 USD / kWh) pero se espera que este precio sea aproximadamente (0.05 USD / kWh –siendo USD las siglas en inglés de dólares americanos) dentro de los próximos 20 años, lo que puede ser equivalente al coste de energía convencional. La Tabla 3-5 muestra el coste típico reciente de los sistemas de desalinización de energía renovable.

	Solar térmica			Solar fotovoltaica		Eólica		
	MED	HDH	SD	ED	RO	MVC	RO	RO
Capacidad (m ³ /d)	>5000	>100	>1	>100	>100	>100	>50	>1000
Coste (USD/m ³)	2.5-3	2.8-7	1.4-12	11.2-12.6	12.5-16.8	5.6-8.4	7-9.8	2.1-5.6

Tabla 3-5. Coste típico de los sistemas de desalación de energía renovable.

De los datos ofrecidos se deduce que:

- La tecnología de desalación de energía renovable (RED) proporciona sostenibilidad y reduce la 'huella de carbono'.
- Entre los diferentes recursos de energía renovable contemplados, la energía solar es la alternativa más prometedora al combustible fósil porque es más predecible y disponible que otros recursos.
- Actualmente, el coste de producir agua dulce por los sistemas RED es más alto que el de los sistemas de desalación convencionales. Sin embargo, aumentar la eficiencia y la productividad de los sistemas RED requiere mayor investigación y desarrollo para hacerlos económicamente competitivos con sistemas de desalinización convencionales.
- El sistema de destilación solar (SD) es la técnica más aplicable a áreas remotas y rurales que sufren estrés hídrico y energético. El único problema con los sistemas SD es el bajo productividad que lo hace una elección costosa. Por lo tanto, se requiere una investigación adicional para mejorar el rendimiento y para aumentar la productividad de los sistemas SD.

- **Producción de agua dulce a partir del movimiento de las olas del océano.** [16].

En este artículo se identifican algunos proyectos exitosos de producción de agua dulce mediante energía undimotriz y desalación: Delbuoy, la columna de agua oscilante en Vizhinjam, CETO Freshwater, SAROS y Odyssee. Vamos a estudiar cada uno de ellos.

Delbuoy

Se conoce como una planta WABRO aquella en la que un cuerpo es activado por olas, como una boya, combinado con una planta de desalinización por ósmosis inversa. Dos consideraciones específicas para un sistema WABRO son qué tipo de cuerpo activado por ola usar y qué tipo de toma de fuerza será interesante para el sistema (hidráulico o eléctrico).

El primer sistema combinado conocido de energía undimotriz y desalinización fue el sistema WABRO llamado Delbuoy.

Delbuoy comenzó a producir agua dulce en 1982 en Puerto Rico. Se identificaron las características de los sitios y el entorno adecuados para el sistema; profundidad del agua: 15-20 m, altura de ola significativa: 0.6-1.5 m y período de energía: 3-8 s.

Delbuoy consistía en una boya cilíndrica en la superficie del mar, conectada a una bomba en el fondo del océano. El tamaño del sistema hizo posible el despliegue desde un pequeño barco pesquero. El proceso de desalación fue por ósmosis inversa, produciendo 1,1 m³ de agua dulce por día. En primer lugar, el agua se prefiltró al entrar en la bomba y luego se presurizó. El agua se rectificó a través de válvulas de retención, un acumulador hidráulico estabilizó la presión y finalmente, el agua, con una presión de 5500 kPa, se desaló a través de la membrana de ósmosis inversa.

El 20% del agua de alimentación se convirtió en agua dulce y el 80% se convirtió en concentrado, que fue liberado de vuelta al océano. El diseño WEC / DES fue desarrollado en la Universidad de Delaware e ISTE Delaware, Inc., con fondos del Programa Nacional Sea Grant College, y en el Departamento de Ciencias del Mar de la Universidad de Puerto Rico con fondos de USAID. Se realizaron estudios financieros, comparando el Delbuoy con un sistema RO convencional. El sistema WEC / DES fue modelado y probado antes del despliegue.

- Columna de agua oscilante en Vizhinjam, India

Una planta de OWCRO consiste en una columna de agua oscilante combinada con una planta de desalación de RO. Para este tipo de planta WEC / DES, la turbina y la ubicación de la planta (en tierra o en alta mar) deben considerarse.

El sistema WEC / DES en Vizhinjam, Kerala, India, se muestra en la Figura 3-14, es una planta OWCRO autónoma en tierra construida en 1990 para producir agua dulce a la comunidad del puerto. El agua de mar tenía TDS (sólidos totales disueltos) de 35,000 mg / l y pH de 7.2.

Tres diferentes sistemas de energía de las olas fueron considerados en la búsqueda del diseño más adecuado, lo que resulta en la construcción de una planta OWC de 3000 toneladas. Después de diferentes pruebas de turbinas, se implementó una turbina de impulso. Por otra parte, el sistema WEC consistía en un alternador, un rectificador, una batería y un inversor, generando una sola fase de 50 Hz y 230 V de tensión de CA para alimentar la planta de desalinización.

La ósmosis inversa fue elegida para el proceso de desalinización, produciendo 10,000 l de agua dulce cada día con una cantidad de TDS de menos de 500 mg/l y un pH de 6.5-7.5. Antes del proceso de RO, el agua de mar se filtra por micro filtración y después del proceso, se clora y se neutraliza.

El agua producida fue probada, demostrando una buena calidad. La investigación fue patrocinada por el Gobierno de la India y realizada por Wave Energy Group en el Instituto Indio de Tecnología en Chennai. Antes de la puesta en marcha, se realizaron simulaciones de Matlab y pruebas de laboratorio.

Además, antes de que la planta de RO estuviera conectada a la columna de agua oscilante, ésta se probó con otras cargas para investigar su funcionalidad.



Figura 3-16. WEC in Vizhinjam, India.

- CETO de agua dulce.

Carnegie fue la primera compañía en comercializar la desalación impulsada por energía undimotriz con su proyecto CETO freshwater, que consiste en una boya totalmente sumergida que impulsa una bomba, generando agua presurizada que se manda a la orilla. El sistema de energía de las olas se conectó a membranas de ósmosis inversa. El WEC / DES se incluyó en el Proyecto Perth, cuyo objetivo era generar energía y agua dulce para la base naval HMAS Stirling en Australia.

- SAROS

EcoH₂O Innovations ha comercializado un sistema WABRO autónomo llamado SAROS (Sistema de Osmosis Inversa Accionado por el fondo del mar) con un enfoque en la sostenibilidad, que incluye un flotador con un péndulo conectado a un sistema hidráulico. A medida que el péndulo se mueve con el movimiento de las olas del océano, el agua de mar se presuriza y limpia a través de una membrana de ósmosis inversa, generando agua dulce.

- Odyssée

El sistema Odyssée WABRO consiste en una boya conectada a una bomba de cilindro hidráulico. El movimiento de las olas se transfiere a la bomba, generando una presión para impulsar el aceite a través de un motor rotativo hidráulico, que luego se conecta a una bomba que presuriza el agua para un sistema de limpieza RO.

Se concluye entonces que la energía de las olas y la desalación se pueden combinar en un sistema sostenible y autónomo, generando agua dulce a partir de las olas del océano. Sin embargo, las preguntas sobre el coste del agua producida, las variaciones en la producción de energía debido a la intermitencia y los efectos ambientales aún permanecen.

● **Evaluación preliminar del uso de energía de las olas en una planta desalinizadora de isla fuera de la red:** [17].

Este documento analiza el uso de tecnologías de energía de las olas cercanas a la costa como una solución viable para hacer frente a la demanda de agua de una isla típica en el mar Tirreno, la isla de Ponza. Las islas están rodeadas por el mar y esto debe tomarse en consideración como una fuente de energía válida. A este fin, el presente artículo evaluará la opción de desalinización de RO para el suministro de agua dulce en la isla de Ponza. Se compararán dos escenarios con referencia al envío de agua:

Escenario 1: planta de desalinización alimentada con energía de red del generador de motor diesel de la isla.

Escenario 2: desalinización alimentada por energía de las olas.

Los escenarios 1 y 2 están modelados mediante simulaciones transitorias basadas en pasos cada hora teniendo en cuenta la carga de agua y los datos meteorológicos y estados del mar. La comparación se lleva a cabo utilizando medidas de emisión.

La demanda de agua dulce de la isla de Ponza asciende a 400000 m³ /año.

En cuanto a todo el suministro de agua, alrededor de 237 barcos son necesarios para transportarla, y las emisiones correspondientes a la propulsión de los barcos mediante motores diesel serán de aproximadamente 2133 tCO₂eq / año.

Existe una emisión de 2.33 tCO₂eq para las operaciones de carga / descarga y las emisiones anuales correspondientes son aproximadamente 552 tCO₂eq / año.

Concluyendo, el transporte de agua por barco implica una emisión específica de 6.71 kgCO₂eq / m³.

Además, el servicio de envío de agua descrito tiene un coste de 11.30 € / m³, eso significa 4520000 € / año.

Para analizar los escenarios del sistema de desalinización, sin entrar en detalles de modelado, en TRNSYS se desarrollaron modelos de simulación transitorios escalonados por hora para un año de referencia añadiendo componentes internos para la unidad de desalinización por ósmosis inversa, control de agua y energía y convertidor de energía de las olas ISWEC.

La planta de desalinización de RO para la isla de Ponza claramente debe tener un tamaño capaz de cubrir completamente las necesidades de agua. El sistema estará equipado con los tanques de almacenamiento de agua de 3000 m³ de capacidad global ya presentes en la isla. En la elección del tamaño se ha intentado fusionar dos aspectos esenciales pero opuestos: un número reducido de unidades y un tamaño capaz de explotar adecuadamente el aporte de energía variable de las fuentes de energía renovable.

El consumo total de energía de las unidades RO aumenta a 44.93 kW.

- **Resultados.**

Escenario 1.

En este escenario, aunque el objetivo de nivel de almacenamiento no es mantenido, no hay déficits hídricos y se alcanza un mínimo de aproximadamente 590 m³ de reserva. La energía requerida para producir 389350 m³ / año de agua es de 1496 MWh / año, que corresponde a 1196.80 tCO₂eq / año.

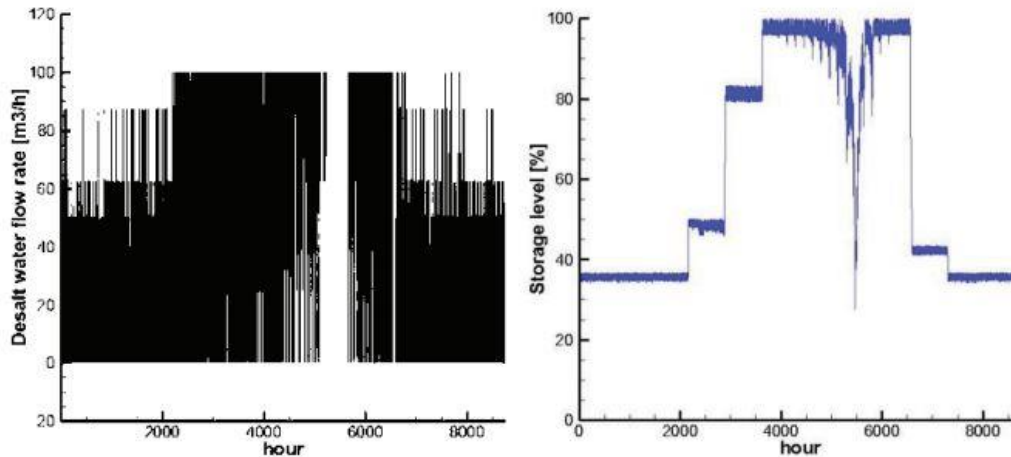


Figura 3-17. Caudal de producción de agua y curva del nivel de almacenamiento por horas.

Escenario 2.

En este escenario, la potencia requerida es entregada por DEGS en caso de déficit de energía de las olas. Por ello, los datos de producción representados en la Figura 3-17 permanecen invariables.

Las unidades ISWEC deben limitarse a 8 para obtener una disminución recurrente de DEGS sin valores de energía excedente demasiado altos. Con tal número de unidades, la energía de las olas enviada al sistema de desalinización asciende a 88.89 MWh / año (es decir, 48.88% de la energía de olas generada total), con un retorno a los motores diesel de 1397.48 MWh / año correspondiente a 1117.98 tCO₂ eq/año.

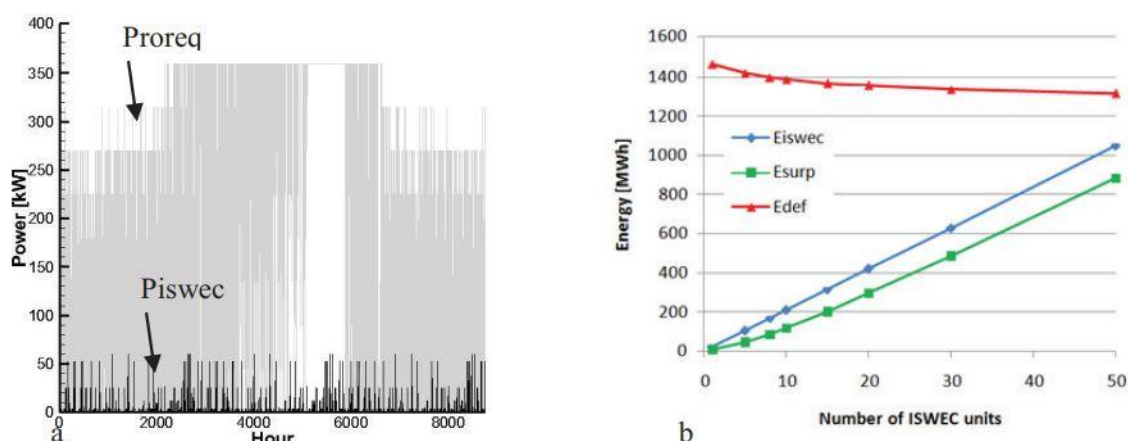


Figura 3-18. a) Comparación entre la solicitud de potencia RO (Pro-req) y la energía generada por ISWEC individual (Piswec) y b) Análisis de sensibilidad en las unidades ISWEC.

- **Conclusión.**

El primer resultado es que el sistema de desalinización podrá cubrir completamente la carga de agua. Este

logro, considerando una simple planta de desalinización alimentada a la red, traerá una reducción de emisiones de CO₂ equivalente del 55.44%. Los costes de desalinización del agua oscilan en el rango de 0.8-1.5 €/ m³. Es evidente que, en el peor de los casos, los costes de desalinización de 1,5 €/ m³, el precio del agua es 7,5 veces menor con la desalinización que con el envío, alcanzando una cantidad equivalente de agua, suponiendo un gasto anual de 600000 € en lugar de 4520000 €.

Al analizar la hipótesis alimentada ISWEC-DEGS, los resultados muestran que la falta de un sistema de almacenamiento de energía influye fuertemente en la implantación de sistemas de energía renovables, llevando a una limitación necesaria del número de unidades ISWEC a 8. Sin embargo, la contribución permite reducir un 3% las emisiones de CO₂, alcanzando la reducción de 58.37% con respecto al otro escenario. Como ISWEC todavía no es una tecnología muy comercial, los autores no pueden evaluar el coste final del agua cuando parte de las necesidades de energía de desalación se derivan de la explotación de la energía de las olas.

Con el objetivo de obtener un sistema de desalación totalmente basado en energía undimotriz, es esencial una solución de almacenamiento. En este caso, una granja de olas compuesta por 70 unidades ISWEC, es decir, 4,2 MW de potencia nominal podrá operar completamente la planta de desalación.

- **Cuestiones ambientales en la desalinización por ósmosis inversa del agua de mar: admisión y expulsión.** [18].

La desalinización de ósmosis inversa de agua de mar tiene algunos impactos ambientales asociados con la construcción y el funcionamiento de los sistemas de admisión y la eliminación del concentrado.

El principal impacto de los sistemas convencionales de admisión de agua marina es el impacto y arrastre de organismos marinos. Estos impactos se pueden minimizar ubicando la admisión en una posición geográfica donde la productividad oceánica sea baja, además los límites de velocidad tienden a reducir los impactos al minimizar el número de peces arrastrados.

La mitigación, como la restauración ambiental del hábitat o la repoblación, puede proporcionar una solución aceptable para los impactos donde éstos sean significativos. Los sistemas de admisión subsuperficiales evitan impactos de arrastre, pero pueden causar otros impactos menos importantes como el impacto visual o dificultad de acceso a la playa.

La eliminación del concentrado puede tener un impacto local en los organismos que viven en el fondo marino si se permite que la descarga poco diluida fluya a través del fondo marino. Éstos se pueden minimizar mediante el uso de sistemas difusores diseñados y colocados adecuadamente basados en la corriente y el modelado del flujo.

Para minimizar estos impactos, en este artículo se plantean varias opciones de admisión del agua marina como de salida de la solución salina. En las siguientes figuras se muestra algunos ejemplos.

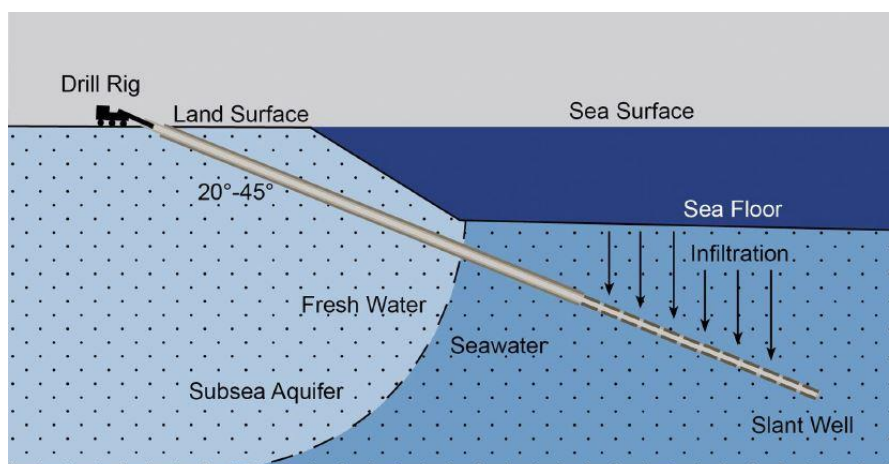


Figura 3-19. Diagrama conceptual de un sistema de admisión de pozo inclinado.

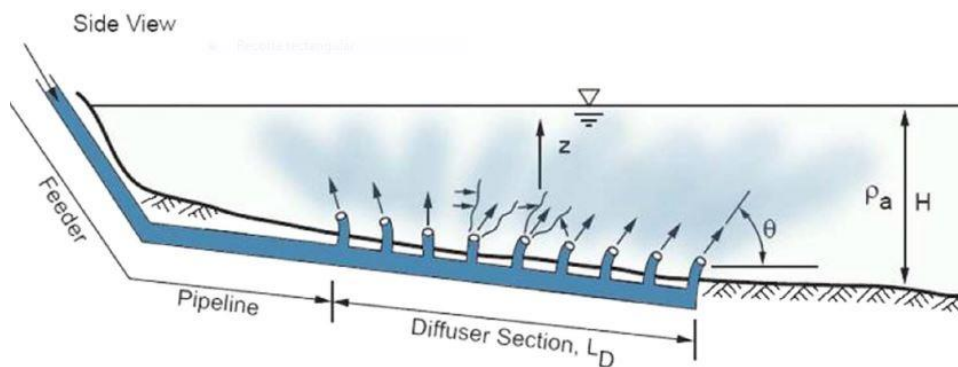


Figura 3-20. Diagrama que muestra un sistema difusor multipuerto montado en el extremo de una tubería de descarga.

4 SISTEMA DE ÓSMOSIS INVERSA. DISEÑO PRELIMINAR

Como mecanismo de desalación en la planta undimotriz de Cabo Verde se elige la ósmosis inversa debido a las ventajas que presenta, ya comentadas en capítulos previos.

A continuación se explica el funcionamiento de dicho mecanismo, se describen los equipos que forman parte de un sistema de ósmosis inversa además del diseño preliminar de una planta desaladora adecuada para aplicación de energías marinas.

4.1 Sistema de Ósmosis Inversa.

El fenómeno de la ósmosis está basado en la búsqueda del equilibrio. Cuando se ponen en contacto dos fluidos con diferentes concentraciones de sólidos disueltos, se mezclarán hasta que la concentración sea uniforme. Si estos fluidos están separados por una membrana permeable (la cual permite el paso a su través de uno de los fluidos), el disolvente se moverá a través de la membrana será el de menor concentración, de tal forma que pasa al fluido de mayor concentración: [19]. (*Estado inicial del equilibrio osmótico*)

Al cabo de un tiempo, el contenido en agua será mayor en uno de los lados de la membrana (*sentido espontáneo de la transferencia de disolvente, estado final del equilibrio osmótico*). La diferencia de altura entre ambos fluidos se conoce como Presión Osmótica.

Si se utiliza una presión superior a la presión osmótica, se produce el efecto contrario. Los fluidos se presionan a través de la membrana, mientras que los sólidos disueltos quedan atrás (*flujo de disolvente contrario al sentido espontáneo*). Para poder purificar el agua necesitamos llevar a cabo el proceso contrario al de la ósmosis convencional, es lo que se conoce como ósmosis inversa. Se trata de un proceso con membranas. Para forzar el paso del agua que se encuentra en la corriente de salmuera a la corriente de agua con baja concentración de sal es necesario presurizar el agua a un valor superior al de la presión osmótica. Como consecuencia a este proceso la salmuera se concentrará más.

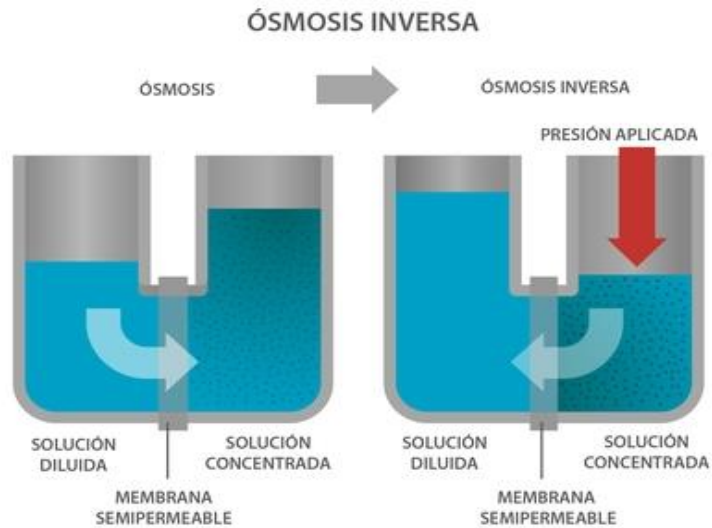
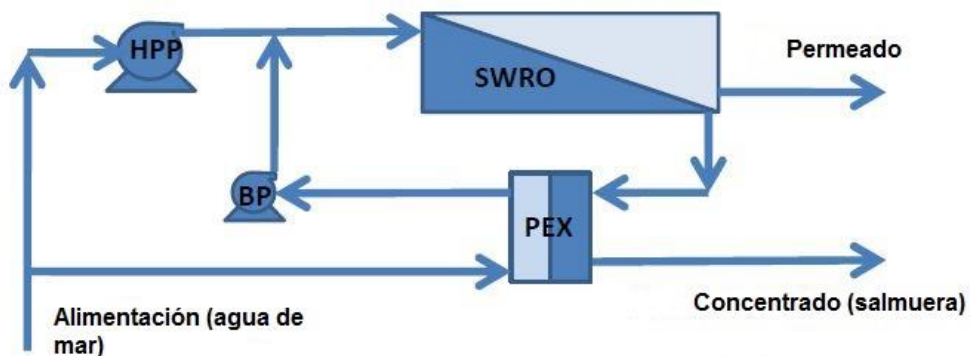


Figura 4-1. Esquema de funcionamiento de ósmosis y ósmosis inversa- [20].

El sistema de ósmosis inversa consta de varios equipos:



Configuración SWRO con intercambiadores de presión (cámara isobárica)

SWRO : ósmosis inversa de agua de mar

HPP : bomba de alta presión

BP : bomba "booster" o de refuerzo

PEX : intercambiador de presión

Figura 4-2. Esquema conceptual de un sistema de ósmosis inversa.

En este sistema, el agua marina llega a las membranas a través de las bombas de alta presión, obteniendo agua permeada o de producto y agua de rechazo o salmuera a alta presión. La energía de dicho rechazo se recupera mediante un dispositivo de recuperación energética y se transmite por una bomba de recirculación o booster de nuevo hasta el bastidor de membranas.

1. **HPP.** La bomba de alta presión utilizada es la *Danfoss Axial Piston Principle* (APP) ya que estas bombas suministran alta presión de manera fiable, eficiente y a bajo coste.

En concreto, el tipo de bomba seleccionada para un caudal de entrada de unos 1000 m³/d es la siguiente:

APP pumps						
Pump type	CFlow			Energy consumption @ 80 barg (1,160 psig)		Pump speed
	rpm	Metric measure	US measure	Metric measure	US measure.	Metric measure
APP 21	1,200	21.1 m ³ /h	92.9 gpm	54.8 kW	73.6 CV	700-1,200 rpm
APP 21	1,500	21.9 m ³ /h	96.4 gpm	58.9 kW	78.9 CV	700-1,500 rpm
APP 24	1,200	24.8 m ³ /h	109.0 gpm	64.4 kW	86.3 CV	700-1,200 rpm
APP 24	1,500	24.1 m ³ /h	106.2 gpm	64.8 kW	86.9 CV	700-1,500 rpm
APP 26	1,200	26.6 m ³ /h	117.1 gpm	69.9 kW	93.8 CV	700-1,200 rpm
APP 26	1,500	26.7 m ³ /h	117.4 gpm	70.9 kW	95.1 CV	700-1,500 rpm
APP 30	1,200	30.7 m ³ /h	135.1 gpm	80.7 kW	108.3 CV	700-1,200 rpm
APP 30	1,500	31.3 m ³ /h	137.7 gpm	83.2 kW	111.6 CV	700-1,500 rpm
APP 38	1,500	38.4 m ³ /h	168.9 gpm	100.9 kW	135.3 CV	700-1,500 rpm
APP 43	1,700	44.6 m ³ /h	196.4 gpm	105.5 kW (70 barg)	141.4 CV (70 barg)	700-1,700 rpm
APP 53	1,500	53 m ³ /h	235 gpm	132 kW	200 CV	700-1,500 rpm
APP 65	1,500	68 m ³ /h	299 gpm	160 kW	250 CV	700-1,500 rpm
APP 78	1,500	78 m ³ /h	345 gpm	160 kW	250 CV	700-1,500 rpm
APP 86	1,700	88 m ³ /h	387 gpm	200 kW	300 CV	700-1,700 rpm

Tabla 4-1. Tipo de bomba de alta presión utilizada en el sistema de desalación por ósmosis inversa: [21].

2. **PEX.** Intercambiador de presión o recuperador energético. En este caso, el dispositivo elegido será el Recuperador ERI-PX.

La operación y el control de una unidad PX (o sistema PX en paralelo) en un sistema SWRO se puede entender considerando dos tuberías paralelas; uno de agua a alta presión y otro de agua a baja presión que fluye en direcciones opuestas. El agua a alta presión fluye en un circuito a través de las membranas, la unidad PX, la bomba de refuerzo y de vuelta a las membranas a una velocidad controlada por la bomba de refuerzo o una válvula de mariposa de alta presión. El agua a baja presión fluye desde la bomba de suministro de agua de mar y una válvula de mariposa en la descarga de salmuera desde la unidad PX. Dado que los flujos de alta y baja presión son independientes, la planta SWRO-PX debe diseñarse para la monitorización del flujo y el control de ambas corrientes.

La función del rotor PX es intercambiar un volumen de salmuera presurizada de las membranas del dispositivo SWRO por un volumen igual de agua de mar filtrada. Este intercambio se realiza en un rotor que flota sobre un rodamiento hidrodinámico lubricado con salmuera. La velocidad de rotación del rotor PX está controlada por el caudal combinado de las corrientes de baja y alta presión. No hay ejes, motor o controles electrónicos en una unidad PX.

3. **SWRO.** Dispositivo encargado de realizar la desalación del agua de mar por ósmosis inversa, tal y como se ha explicado previamente.

Para el modelado de la planta se ha diseñado el bastidor de membranas del sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa con el software ROSA, cuyo funcionamiento se va a explicar brevemente a continuación.

4.1.1 Software ROSA.

ROSA son las siglas de “Reverse Osmosis System Analysis” (Sistema de Análisis de Ósmosis Inversa), y se trata de una herramienta asistida por ordenador para el diseño y operación de sistemas de ósmosis inversa y nanofiltración para el tratamiento y purificación de aguas desarrollada por *Dow Chemical*.

Al inspeccionar la ventana inicial del programa, el usuario se encontrará con que la interfaz del programa se divide principalmente en seis ventanas, a las cuales se accede mediante otras tantas pestañas situadas en su parte inferior.

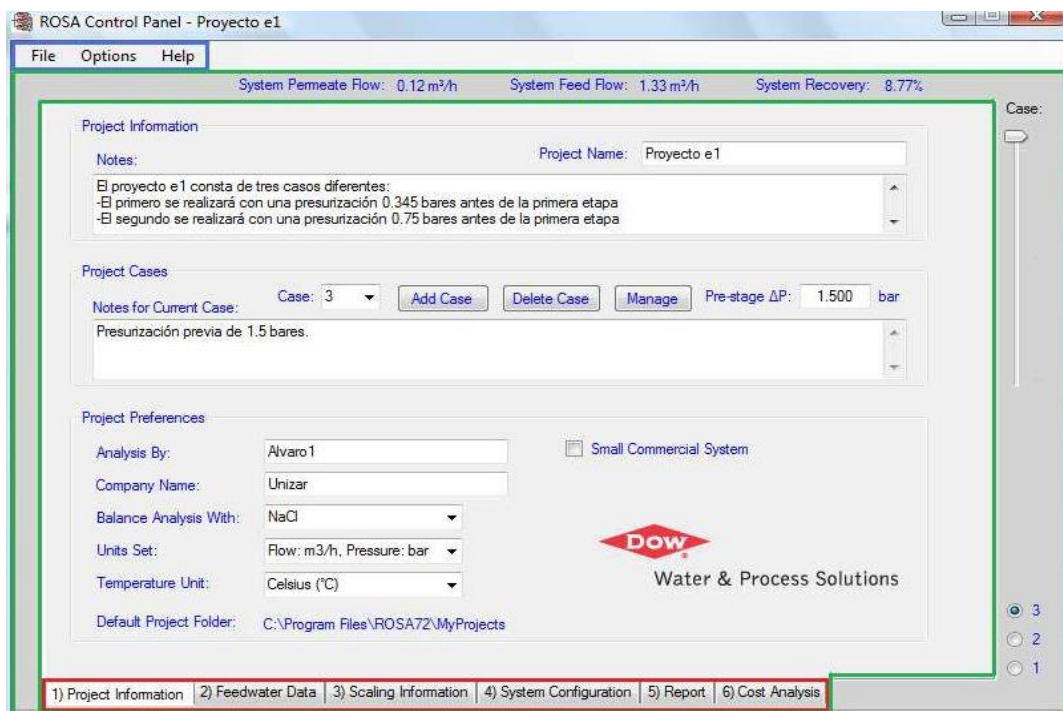


Figura 4-3. Situación de los botones de cabecera (azul), de las pestañas principales (rojo) y del marco exterior (verde).

Pasamos a explicar brevemente los datos de entrada o “inputs” de cada pestaña principal.

- **Project Information (información del proyecto).** En esta ventana el usuario debe seleccionar que se quiere realizar el análisis del balance con NaCl, usar como unidad de flujos, m^3/h ; y de presión, bar; así como de temperatura seleccionamos los grados Celsius.
- **Feedwater Data (datos de agua de alimentación).** En este siguiente paso, seleccionamos “*Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5*”. La temperatura del agua de alimentación será de $20^\circ C$ y el pH será igual a 7.5. Además, clicamos en la opción de “Especificar solutos individuales” y completamos la tabla con los datos relativos al agua del océano Atlántico, como se muestra en la Figura 4-5. Para terminar aseguramos que el balance de solutos resulta con valor 0.00. En caso contrario, clicamos en “Ajustar todos los iones”.

The screenshot shows the ROSA software interface for water profile configuration. At the top, the 'Water Type' is set to 'Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5'. Below this, 'Feed Percentage' is 100.0%, 'Feed Number' is 1, and 'Feed Streams' is 1. A table lists various ions with their concentrations in different units and a total concentration. To the right, there are controls for 'Specify Individual Solutes', 'Total Dissolved Solids' (37125.9 mg/l), 'Feed Parameters' (Temperature: 20.0 °C, Flow Rate: 8.11 m³/h, pH: 7.5), and 'Charge Balance' (Cations: 643.25, Anions: 643.25, Balance: 0.00). At the bottom, 'System Temp' is 20.0 °C and 'System pH' is 7.50. Buttons for 'Open Water Profile Library' and 'Save Water Profile to Library' are also visible.

Ions	mg/l	ppm CaCO3	meq/l	Total Conc.(mg/l)
Ammonium (NH4+ + NH3)	0.08	0.222	0.004	0.080
Potassium (K)	438	560.074	11.201	438.00
Sodium (Na)	11080.01	24097.450	481.949	11080.01
Magnesium (Mg)	1486.001	6112.212	122.244	1486.00
Calcium (Ca)	558	1392.216	27.844	558.00
Strontium (Sr)	0.12	0.137	0.003	0.12
Barium (Ba)	0	0.000	0.000	0.00
Carbonate (CO3)	5.53	9.216	0.184	5.53
Bicarbonate (HCO3)	158.6	129.990	2.600	158.60
Nitrate (NO3)	6.1	4.919	0.098	6.10
Chloride (Cl)	20926.31	29512.740	590.255	20926.31
Fluoride (F)	1.71	4.500	0.090	1.71
Sulfate (SO4)	2399.998	2499.998	50.000	2400.00
Silica (SiO2)	34	n.a.	n.a.	34.00
Boron (B)	5.5	n.a.	n.a.	n.a.

Figura 4-4. Software ROSA. Complementación de tabla de solutos del agua del Atlántico.

- **Scaling Information (información sobre la precipitación de sales).** Esta pestaña conduce a una nueva ventana para ampliar la información acerca de la corriente de alimentación. Para ello simplemente clicamos en “No químicos añadidos”.
- **System Configuration (configuración del sistema).** En esta pestaña, se definen los parámetros de operación. Tanto como número de pasos, paso actual y número de etapas seleccionamos 1, como factor de flujo tomaremos 0.85 y como eficiencia de la bomba de alimentación tomamos 90% (*Danfoss Axial Piston Principle*).

Clicando por ejemplo en “Flujo Permeado”, se abre una pestaña que nos permite especificar los valores de la recuperación y del permeado, para los cuales tomamos 45% y 3.65 m³/h respectivamente para la primera simulación de referencia. Seguidamente le damos a “Recalcular” y a “Aceptar cambios y cerrar”, para que el programa haga los cálculos con los nuevos datos.

Si nos vamos a la sección llamada “Configuración por etapa 1 en paso 1”, seleccionamos Etapa 1, 7 elementos en cada vaso o membranas, y como tipo de membrana tomamos la denominada “SW30ULE-440i”. Si clicamos en “Especificaciones” podemos ver los detalles de los distintos tipos de membranas.

- **Report.** Esta ventana es solo de lectura y solo se ejecutará si no ha habido ningún error en los pasos anteriores.

En “Report”, ROSA muestra el informe completo de la instalación resultante, en dos documentos distintos, tras realizar los cálculos necesarios para ello. Aunque el programa los nombre de distinta forma, son complementarios: la ventana “*System Design Overview*” muestra un informe resumido del sistema y la ventana “*Detail Report*” muestra, como su nombre indica, un informe completo y en detalle.

En “*Detail Report*” encontraremos los datos para saber si se cumple la normativa de calidad del agua tratada obtenida y además se muestra el consumo energético necesario para ello.

Una buena calidad del agua desalada se da si los valores de los sólidos disueltos en el permeado (“*Perm TDS*”) son menores que 500 mg/l y si el Boro se da en una cantidad menor que 2 mg/l.

Lo interesante es conseguir que la energía específica sea lo menor posible y que el flujo promedio del paso 1 (“Average Pass 1 Flux”) esté entre 12 y 14 pero más cercano a 14, ya que esto significará que se pagará menos membrana por unidad de producto.

- **Cost Analysis.** Esta pestaña corresponde al análisis de costes. Permite al usuario un breve análisis económico comparativo de los diferentes elementos que operan en un mismo sistema bajo las mismas condiciones.

Una vez realizada una primera simulación en ROSA con los datos del agua oceánica de Cabo Verde, correspondiente al océano Atlántico, obtenemos el siguiente *Detail Report*, en el que observamos que los resultados se pueden mejorar.

System Details

Feed Flow to Stage 1	8.11 m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	3.65 m ³ /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	8.11 m ³ /h	Pass 1 Recovery	44.99 %	Feed	25.82 bar
Feed Pressure	52.12 bar	Feed Temperature	20.0 C	Concentrate	48.16 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	37125.92 mg/l	Average	36.99 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	7	Average NDP	14.49 bar
Total Active Area	286.13 M ²	Average Pass 1 Flux	12.75 l/m ² h	Power	13.05 kW
Water Classification: Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5		Specific Energy	3.58 kWh/m ³		

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (lmh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	SW30ULE-440i	1	7	8.11	51.78	0.00	4.46	50.66	3.65	12.75	0.00	0.00	341.91

Pass Streams (mg/l as Ion)					
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Total
			Stage 1	Stage 1	
NH4+ + NH3	0.08	0.08	0.14	0.00	0.00
K	438.00	438.00	791.73	5.55	5.55
Na	11080.01	11080.01	20046.69	117.84	117.84
Mg	1486.00	1486.00	2698.16	4.08	4.08
Ca	558.00	558.00	1013.19	1.51	1.51
Sr	0.12	0.12	0.22	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	5.53	5.53	13.37	0.00	0.00
HCO3	158.60	158.60	279.87	2.17	2.17
NO3	6.10	6.10	10.57	0.64	0.64
Cl	20926.31	20926.31	37881.38	197.97	197.97
F	1.71	1.71	3.09	0.02	0.02
SO4	2400.00	2400.00	4361.20	2.34	2.34
SiO2	34.00	34.00	61.33	0.58	0.58
Boron	5.50	5.50	8.69	1.61	1.61

Figura 4-5. *Detail Report* de la simulación de referencia de la desalación de agua del Océano Atlántico mediante el software ROSA. (Ver Nota en Anexos)

Para la mejora, se llevan a cabo varias simulaciones más, 23 en concreto, en las cuales se incrementan tanto la recuperación como el flujo de permeado en distintas proporciones, hasta conseguir reducir el consumo energético específico y ajustar más la *Average Pass 1 Flux* a 14, siempre confirmando que se cumplen las condiciones de calidad del producto.

Así, de la mejor simulación elegida, se obtiene el siguiente *Detail Report*.

System Details

Feed Flow to Stage 1	8.16 m ³ /h	Pass 1 Permeate Flow	4.00 m ³ /h	Osmotic Pressure:	
Raw Water Flow to System	8.16 m ³ /h	Pass 1 Recovery	49.00 %	Feed	25.82 bar
Feed Pressure	56.30 bar	Feed Temperature	20.0 C	Concentrate	52.26 bar
Flow Factor	0.85	Feed TDS	37125.92 mg/l	Average	39.04 bar
Chem. Dose	None	Number of Elements	7	Average NDP	16.64 bar
Total Active Area	286.13 M ²	Average Pass 1 Flux	13.98 l/mh	Power	14.19 kW
Water Classification: Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5				Specific Energy	3.55 kWh/m ³

Stage	Element	#PV	#Ele	Feed Flow (m ³ /h)	Feed Press (bar)	Recirc Flow (m ³ /h)	Conc Flow (m ³ /h)	Conc Press (bar)	Perm Flow (m ³ /h)	Avg Flux (l/mh)	Perm Press (bar)	Boost Press (bar)	Perm TDS (mg/l)
1	SW30ULE-440i	1	7	8.16	55.95	0.00	4.16	54.90	4.00	13.98	0.00	0.00	332.34

Pass Streams (mg/l as Ion)						
Name	Feed	Adjusted Feed	Concentrate		Permeate	
			Stage 1	Stage 1	Stage 1	Total
NH4+ + NH3	0.08	0.08	0.16	0.00	0.00	0.00
K	438.00	438.00	853.68	5.38	5.38	5.38
Na	11080.01	11080.01	21616.16	114.50	114.50	114.50
Mg	1486.00	1486.00	2909.99	3.98	3.98	3.98
Ca	558.00	558.00	1092.74	1.47	1.47	1.47
Sr	0.12	0.12	0.23	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	5.53	5.53	14.78	0.00	0.00	0.00
HCO3	158.60	158.60	300.90	2.12	2.12	2.12
NO3	6.10	6.10	11.36	0.62	0.62	0.62
Cl	20926.31	20926.31	40848.38	192.39	192.39	192.39
F	1.71	1.71	3.33	0.02	0.02	0.02
SO4	2400.00	2400.00	4703.83	2.28	2.28	2.28
SiO2	34.00	34.00	66.13	0.57	0.57	0.57
Boron	5.50	5.50	9.28	1.57	1.57	1.57

Figura 4-6. Detail Report de la simulación mejorada elegida de la desalación de agua del Océano Atlántico mediante el software ROSA. (Ver Nota en Anexos)

4.2 Recuperación energética.

En el sistema de desalación que se presenta en el software ROSA no existe recuperación energética. Sin embargo, esta opción resulta bastante interesante debido al impacto que presenta en relación a la reducción del consumo energético de la planta desaladora y al aumento de eficiencia de la misma.

Por estas ventajas, en la planta de desalación de agua marina en Cabo Verde se propone instalar intercambiadores de presión o recuperadores energéticos. Estos recuperadores son comúnmente dispuestos en paralelo para evitar la pulsación; por ello, aunque se hagan los cálculos para 1 solo dispositivo ERI, debemos tener en cuenta esta disposición en paralelo.

Para el modelado de tales recuperadores optamos por seleccionar intercambiadores de presión de cámara isobárica, por su mejor rendimiento. Se eligen los intercambiadores ERI-PX (Energy Recovery, Inc) por su especialización en el sector.

4.2.1 Metodología.

A continuación nos disponemos a calcular todos los parámetros de presiones y caudales volumétricos del sistema de desalación con recuperación energética y, posteriormente, se calcula el SEC neto de dicha instalación.

Se supondrá una eficiencia del 97% del ERI-PX. Hay que tener en cuenta en todo momento que la expresión utilizada para dicha eficiencia es la dada por el fabricante y no la eficiencia termodinámica del sistema. Su expresión es la que se muestra a continuación.

$$Eficiencia = \frac{\sum(Presión \times Flujo)_{salida}}{\sum(Presión \times Flujo)_{entrada}} \times 100$$

Como sabemos, la energía undimotriz, al igual que las demás energías renovables, son variables. Por tanto, se debe modelar el intercambiador de presión para operar con recurso energético variable.

Para ello el comportamiento de un dispositivo de intercambio de presión ERI-PX-220 se ilustra en la figura siguiente.

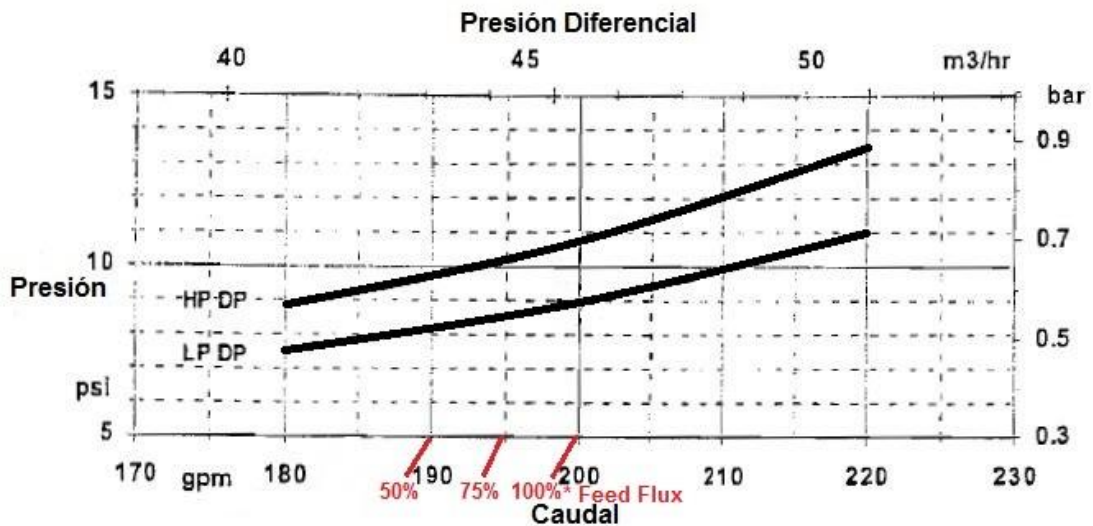


Figura 4-7. Comportamiento de un intercambiador energético PX-220 en condiciones de operación variables: [22].

De esta forma, vamos a poder calcular el consumo energético específico de la instalación para varios puntos de funcionamiento. En este caso vamos a proponer 3 casos: para un 50%, 75% y 100% de caudal de alimentación de agua de mar en la instalación, tal y como muestran los puntos señalados en la anterior gráfica.

En todos los casos el procedimiento será el mismo, sólo cambian los resultados al variar el valor del caudal de alimentación en cada caso. Por ello pasamos a describir el procedimiento general y después se explicarán los cálculos detallados.

En la siguiente figura se pueden observar los distintos tramos del sistema de desalación por ósmosis inversa que conllevan distintos flujos con sus correspondientes presiones.

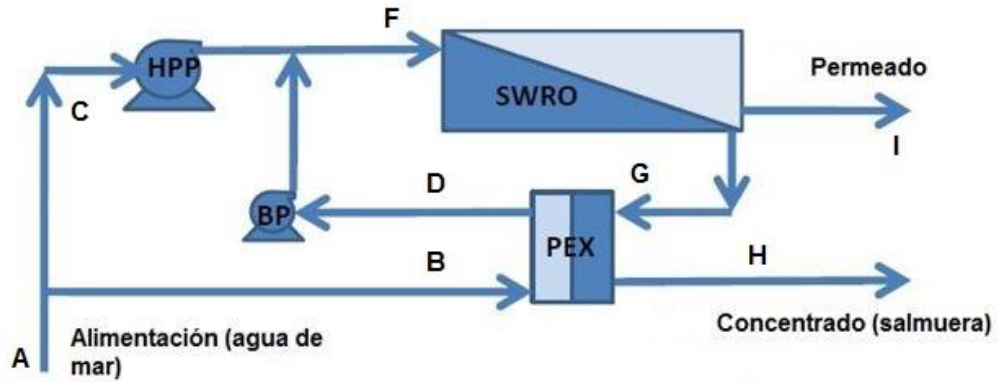


Figura 4-8. Esquema del sistema de desalación con referencias a los distintos tramos existentes.

Por definición:

High Pressure Flow Differential Pressure (HPDP): La presión en el puerto de entrada de alta presión del PX menos la presión en el puerto de salida de alta presión.

Low Pressure Flow Differential Pressure (LPDP): La presión en el puerto de entrada de baja presión del PX menos la presión en el puerto de salida de baja presión.

De estas definiciones podemos obtener con ayuda de la gráfica anterior las presiones que nos son desconocidas (P_B y P_D):

$$HPDP = P_G - P_D$$

$$LPDP = P_B - P_H$$

Siendo P_G conocida (dato de ROSA) y P_H = Presión atmosférica.

Con estos resultados y con los datos de los flujos conocidos, mediante la expresión de la eficiencia podemos obtener el flujo que es incógnita ($q_{v,B} = q_{v,H}$); flujo presurizado por el recuperador energético.

Una vez calculadas todas las presiones y los flujos, se calcula el consumo específico del sistema de la siguiente forma:

La potencia total consumida en el sistema será la suma de las potencias consumidas por las dos bombas existentes cuyas expresiones se muestran a continuación:

$$P_{W,Total} = P_{W,HPP} + P_{W,BP}$$

$$P_{W,HPP} = \frac{\left(\frac{q_{v,F} - q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600} \right) \cdot (P_F - P_{amb})}{\mu_{HPP} \cdot \mu_{eng}}$$

Siendo $\mu_{eng} = 0.95$

$$P_{W,BP} = \frac{\left(\frac{q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600} \right) \cdot [0.7 + (P_F - P_G)]}{\mu_{BP} \cdot \mu_{eng}}$$

Siendo $\mu_{eng} = 0.93$ y $(P_F - P_G)$ la pérdida de presión en el permeador.

Entonces, el consumo energético específico será la relación entre la potencia total consumida y el flujo de permeado:

$$SEC = \frac{P_{W,Total}}{q_{v,I}}$$

Siendo la densidad del agua de mar calculada a partir de la T_{sw} usada en ROSA y el valor de la salinidad del agua de mar la de las Islas Canarias (datos similares en Cabo Verde) y son constantes para todos los casos. Además, se supone que no existe intercambio de materia en el ERI-PX.

Hay que tener en cuenta que parar la instalación esporádicamente cuando la carga es menor acarrea problemas de ineficiencia y de mantenimiento. Por esta razón se evita parar y se mantiene la planta en activo aunque se pierda un poco de eficiencia. Para ello, lo que hacemos es calcular el consumo específico de la planta (tanto bruto como neto) variando el caudal de alimentación manteniendo su presión constante, enfocándonos en cómo opera una sola unidad ERI, aunque en realidad siempre se dispongan varios ERI en paralelo.

4.2.2 Cálculos del SEC neto.

Nos centramos pues en una propuesta de filosofía de operación donde se tiene el tren de presión, al que alimenta la bomba HPP, funcionando con el 100%, 75% y 50% de caudal de alimentación, representando tres casos distintos en los que existe una disponibilidad de energía menor.

De esta forma se calculan los 3 casos propuestos que se detallarán a continuación por separado.

- **Caso 1. Caudal de alimentación al 100%.**

Datos conocidos						
T_{sw}	ρ_{sw}	Eficiencia ERI-PX	μ_{HPP}	μ_{BP}	HPDP	LPDP
20°C	1027.8 kg/m ³	97%	90%	75%	0.7 bar	0.6 bar
$q_{v,F}$	P_F	$q_{v,G}$	P_G	$q_{v,I}$	P_I	P_H
8.16 m ³ /h	55.95 bar	4.16 m ³ /h	54.9 bar	4 m ³ /h	0 bar	0 bar

Tabla 4-2. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 100% de caudal de alimentación en la instalación.

Siguiendo el procedimiento previamente explicado, vamos a calcular las presiones y caudales cuyos valores son desconocidos y, posteriormente, el SEC neto para este primer caso:

$$HPDP = P_G - P_D = 0.7 \rightarrow P_D = 55.2 \text{ bar}$$

$$LPDP = P_B - P_H = 0.6 \rightarrow P_B = 1.6 \text{ bar}$$

$$Eficiencia = \frac{q_{v,D} \cdot P_D + q_{v,H} \cdot P_H}{q_{v,B} \cdot P_B + q_{v,G} \cdot P_G} \times 100 = \frac{4.16 \cdot 55.2 + q_{v,H} \cdot 0}{q_{v,H} \cdot 1.6 + 4.16 \cdot 54.9} \times 100 = 97 \rightarrow$$

$$\rightarrow q_{v,H} = 5.21 \frac{m^3}{h} = q_{vB}$$

$$P_{W,HPP} = \frac{\left(\frac{q_{v,F} - q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot (P_F - P_{amb})}{\mu_{HPP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{8.16 - 4.16}{3600}\right) \cdot (55.95 \times 10^5)}{0.9 \cdot 0.95} = 7.27 \text{ kW}$$

$$P_{W,BP} = \frac{\left(\frac{q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot [0.7 + (P_F - P_G)]}{\mu_{BP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{4.16}{3600}\right) \cdot [0.7 + (55.95 \times 10^5 - 54.9 \times 10^5)]}{0.75 \cdot 0.93} = 0.174 \text{ kW}$$

$$P_{W,Total} = P_{W,HPP} + P_{W,BP} = 7.27 + 0.174 = 7.44 \text{ kW}$$

$$SEC = \frac{P_{W,Total}}{q_{v,perm}} = \frac{7.44 \text{ kW}}{4 \frac{m^3}{h}} = 1.86 \frac{kWh}{m^3}$$

• **Caso 2. Caudal de alimentación al 75%.**

Datos conocidos						
T_{sw}	ρ_{sw}	Eficiencia ERI-PX	μ_{HPP}	μ_{BP}	HPDP	LPDP
20°C	1027.8 kg/m ³	97%	90%	75%	0.65 bar	0.55 bar
$q_{v,F}$	P_F	$q_{v,G}$	P_G	$q_{v,I}$	P_I	P_H
6.12 m ³ /h	55.95 bar	2.96 m ³ /h	55.3 bar	3.16 m ³ /h	0 bar	0 bar

Tabla 4-3. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 75% de caudal de alimentación en la instalación.

Vamos a calcular el SEC neto para este segundo caso:

$$HPDP = P_G - P_D = 0.65 \rightarrow P_D = 55.65 \text{ bar}$$

$$LPDP = P_B - P_H = 0.55 \rightarrow P_B = 1.55 \text{ bar}$$

$$Eficiencia = \frac{q_{v,D} \cdot P_D + q_{v,H} \cdot P_H}{q_{v,B} \cdot P_B + q_{v,G} \cdot P_G} \times 100 = \frac{2.96 \cdot 55.65 + q_{v,H} \cdot 0}{q_{v,H} \cdot 1.55 + 2.96 \cdot 55.3} \times 100 = 97 \rightarrow$$

$$\rightarrow q_{v,H} = 4.55 \frac{m^3}{h} = q_{vB}$$

$$P_{W,HPP} = \frac{\left(\frac{q_{v,F} - q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot (P_F - P_{amb})}{\mu_{HPP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{6.12 - 2.96}{3600}\right) \cdot (55.95 \times 10^5)}{0.9 \cdot 0.95} = 5.74 \text{ kW}$$

$$P_{W,BP} = \frac{\left(\frac{q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot [0.7 + (P_F - P_G)]}{\mu_{BP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{2.96}{3600}\right) \cdot [0.7 + (55.95 \times 10^5 - 55.3 \times 10^5)]}{0.75 \cdot 0.93} = 0.077 \text{ kW}$$

$$P_{W,Total} = P_{W,HPP} + P_{W,BP} = 5.74 + 0.077 = 5.82 \text{ kW}$$

$$SEC = \frac{P_{W,Total}}{q_{v,perm}} = \frac{5.82 \text{ kW}}{3.16 \frac{m^3}{h}} = 1.84 \frac{kWh}{m^3}$$

• **Caso 3. Caudal de alimentación al 50%.**

Datos conocidos						
T_{sw}	ρ_{sw}	Eficiencia ERI-PX	μ_{HPP}	μ_{BP}	HPDP	LPDP
20°C	1027.8 kg/m ³	97%	90%	75%	0.58 bar	0.5 bar
$q_{v,F}$	P_F	$q_{v,G}$	P_G	$q_{v,I}$	P_I	P_H
4.08 m ³ /h	55.95 bar	1.87 m ³ /h	55.62 bar	2.21 m ³ /h	0 bar	0 bar

Tabla 4-4. Datos conocidos para el cálculo de la recuperación energética y SEC operando con un 50% de caudal de alimentación en la instalación.

Se calcula el SEC neto para este tercer caso:

$$HPDP = P_G - P_D = 0.58 \rightarrow P_D = 55.04 \text{ bar}$$

$$LPDP = P_B - P_H = 0.5 \rightarrow P_B = 1.5 \text{ bar}$$

$$Eficiencia = \frac{q_{v,D} \cdot P_D + q_{v,H} \cdot P_H}{q_{v,B} \cdot P_B + q_{v,G} \cdot P_G} \times 100 = \frac{1.87 \cdot 55.04 + q_{v,H} \cdot 0}{q_{v,H} \cdot 1.5 + 1.87 \cdot 55.62} \times 100 = 97 \rightarrow$$

$$\rightarrow q_{v,H} = 1.4 \frac{m^3}{h} = q_{vB}$$

$$P_{W,HPP} = \frac{\left(\frac{q_{v,F} - q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot (P_F - P_{amb})}{\mu_{HPP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{4.08 - 1.87}{3600}\right) \cdot (55.95 \times 10^5)}{0.9 \cdot 0.95} = 4.017 \text{ kW}$$

$$P_{W,BP} = \frac{\left(\frac{q_{v,G}}{m^3 \cdot h^{-1} \cdot 3600}\right) \cdot [0.7 + (P_F - P_G)]}{\mu_{BP} \cdot \mu_{eng}} = \frac{\left(\frac{1.87}{3600}\right) \cdot [0.7 + (55.95 \times 10^5 - 55.62 \times 10^5)]}{0.75 \cdot 0.93}$$

$$= 0.024 \text{ kW}$$

$$P_{W,Total} = P_{W,HPP} + P_{W,BP} = 4.017 + 0.024 = 4.04 \text{ kW}$$

$$SEC = \frac{P_{W,Total}}{q_{v,perm}} = \frac{4.04 \text{ kW}}{2.21 \frac{m^3}{h}} = 1.82 \frac{kWh}{m^3}$$

4.3 Resultados y comparación.

A continuación se muestran los resultados de los cálculos previos para los casos de operación al 100%, 75% y 50% de caudal de alimentación de agua de mar.

Caudal de alimentación	SEC Bruto (ROSA) (kWh/m ³)	SEC Neto (Con recuperación energética) (kWh/m ³)	Permeate TDS (mg/l)	Boro (mg/l)
Al 100%	3.55	1.86	332.34	1.57
Al 75%	3.37	1.84	439.1	1.81
Al 50%	3.21	1.82	651.39	2.12

Tabla 4-5. Resultados de los cálculos del SEC bruto (ROSA, sin recuperación energética) y del SEC neto (con recuperación energética), así como de la calidad del agua producto para distintos casos de operación a carga parcial.

Se puede observar que, dado que la calidad del agua permeada comienza a verse afectada para valores bajos de caudal de alimentación, no conviene disminuir la capacidad del sistema más de un 50%. Por ello, para el dimensionado del sistema de desalación por ósmosis inversa impulsado por energía undimotriz nos moveremos en el rango de operación entre el 50% y 100% del $q_{v,F}$.

Los parámetros necesarios para realizar tal interconexión con el sistema de propulsión por energía undimotriz son los siguientes:

Caudal de alimentación	Recovery rate (%)	q_{VI} (m³/h)	Permeate TDS (mg/l)	Boro (mg/l)	SEC neto (kWh/m³)	Average Flux (l/m²/h)
Al 100%	49	4	332.34	1.57	1.86	13.98
Al 75%	51.59	3.16	439.1	1.81	1.84	11.03
Al 50%	54.26	2.21	651.39	2.12	1.82	7.74

Tabla 4-6. Parámetros necesarios para interconectar el SWRO con el sistema de energía undimotriz.

El caso 3 (50%**Feed Flux*) no cumple las normativas de consumo humano, por ello se tomará como hipótesis que las horas de operación al 50% de caudal de alimentación son tales que siempre se cumple la normativa de calidad que rige que el valor de *Permeate TDS* debe ser menor que 500 ppm y que la cantidad de Boro es menor que 2 mg/l.

5. DIMENSIONADO DEL SISTEMA DE DESALACIÓN AUTÓNOMO ALIMENTADO CON ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Para la interconexión del sistema SWRO con el sistema de energía undimotriz nos basamos en el estudio realizado por *Alessandro Corsini et al* (2015) en el artículo científico comentado por su relevancia en el apartado 3.3 del capítulo 3. En los siguientes apartados se explicará en detalle qué hipótesis se han realizado y se procederá al posterior dimensionado del sistema.

5.1 Definición del sistema.

En el artículo previamente mencionado, se toma la opción de desalación por RO para el suministro de agua dulce en la isla de Ponza evaluando como alimentación del sistema dos opciones distintas: el uso únicamente de la energía de red del generador de motor diesel de la isla y el aprovechamiento de energía de las olas de la costa de la isla para suministrar parte de la energía necesaria para alimentar el sistema de desalación.

Para el dimensionado del sistema de desalación de agua de mar por ósmosis inversa de Cabo Verde se realiza una aplicación de lo que nos enseña el artículo de *Corsini et al*.

En las dos siguientes gráficas se puede observar cómo varía el caudal de producción de agua y el nivel de almacenamiento por horas.

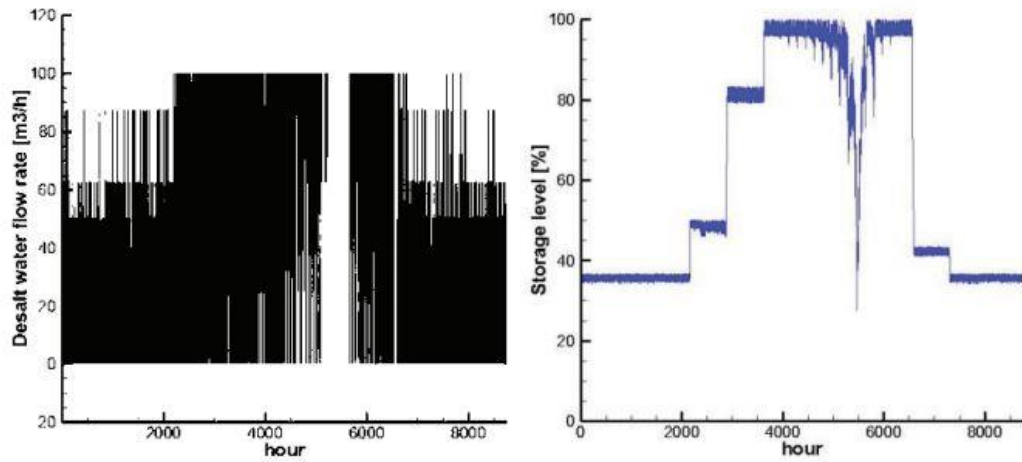


Figura 3-17 (bis). Caudal de producción de agua y curva del nivel de almacenamiento por horas.

De esta Figura podemos hacer unas aproximaciones de cuántas horas al año funcionaría nuestro sistema de unidades WEC al 100% de capacidad, al 75% y al 50%.

Además, en las siguientes gráficas, se muestra la comparación entre la demanda de potencia del sistema de desalación SWRO y la energía generada por cada WEC; y un análisis de sensibilidad en las unidades WEC.

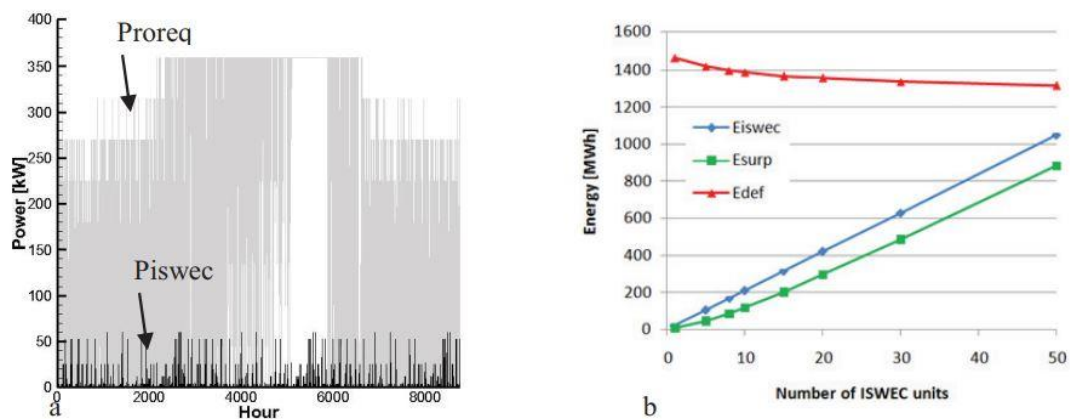


Figura 3-18 (bis). Comparación entre la solicitud de potencia RO (Pro-req) y la energía generada por ISWEC individual (Piswec) y b) Análisis de sensibilidad en las unidades ISWEC

Se puede observar que cada WEC genera 50 kW de potencia. Puesto que las unidades WEC deben limitarse a 8 según el artículo para obtener una disminución del consumo sin valores de energía excedente demasiado altos, la potencia total que pueden generar los WEC asciende a 400 kW. De este modo, si el sistema se encuentra al 100% de capacidad, generará 400 kW; si está al 75% de capacidad, se generará 300 kW y si está al 50%, 200 kW.

Tenemos, entonces, 3 casos distintos para cada sistema por separado:

Caso 1: (SWRO al 50% de q_{VF})

Caso A: (P_{WEC} al 50%)

Caso 2: (SWRO al 75% de q_{VF})

Caso B: (P_{WEC} al 75%)

Caso 3: (SWRO al 100% de q_{VF})Caso C: (P_{WEC} al 100%)

El objetivo del dimensionado de la instalación es interconectar los sistemas otorgándole a cada situación, un tipo de comportamiento. Para ello, se realizan los cálculos mostrados en la siguiente sección.

Los recursos de energía undimotriz de Cabo Verde se sitúan entre 15-20 kW/m mientras que en las costas italianas de la isla de Ponza se tiene en torno a 5 kW/m. Esta isla está localizada cernaca a la costa del continente, entre Nápoles y Roma (*ver Fig.2-3*). Por tanto realizamos hipótesis de recursos más favorables que Ponza. Consideramos la referencia [23] -*ver pág. 20*-, donde se consideran 2200 h anuales de operación anual a potencia nominal.

5.2. Cálculos e hipótesis realizadas.

Para una más clara comprensión y visualización de los datos utilizados del análisis llevado a cabo por *Corsini* en el artículo, los posteriores cálculos realizados y las decisiones tomadas, se ha usado un fichero Excel en el que se pueden distinguir por colores todos esos aspectos.

En blanco: hipótesis obtenidas del artículo de *Corsini* y datos asumidos.

En amarillo: datos tomados de ROSA y cálculos (a mano) del SEC neto.

En naranja: decisiones tomadas razonadamente.

En celeste: cálculos de Excel.

Pw_nom total WEC	400	Nº de udes WEC:	8	Pw_nom unitaria WEC, kW				50
	qVP, m3/h	r	SECaux, kWh/m3	SECnet, kWh/m3	SECtot, kWh/m3	qVp Planta, m3/h	PwSWRO, kW	
Caso 1 (50% de qVF)	2,21	0,5426	0,75	1,82	2,57	55,25	142,0	
Caso 2 (75% de qVF)	3,16	0,5159	0,75	1,84	2,59	79,00	204,6	
Caso 3 (100% de qVF)	4	0,49	0,75	1,86	2,61	100,00	261,0	
	h/año	PwWEC, kW	Elección de caso	PwSWRO, kW	Pw_Exceso, kW	qVp produc, m3/h	Producción, m3/a	
Caso A (50% Pw WEC)	725	200	Caso 1	142,0	58,0	55,25	40056,25	
Caso B (75% Pw WEC)	850	300	Caso 3	261,0	39,0	100,00	85000	
Caso C (100% Pw WEC)	1200	400	Caso3	261,0	139,0	100,00	120000	
h/año operación equiv.	2200					Suma:	245056,25	
						% nominal:	27,97	

Figura 5-1. Dimensionado instalación SWRO + Energía undimotriz.

A partir de las hipótesis que obtenemos del artículo científico (número de unidades WEC y su potencia unitaria respectiva, así como número de horas en las que se opera en cada caso dado), se han realizado los cálculos de potencia demandada y generada, del SEC total y del caudal de permeado que se genera en la planta para conseguir el valor de la producción anual de la instalación para cada caso de operación a carga parcial. De esta forma se ha obtenido un valor del 77% de producción anual; valor que denota una productividad muy satisfactoria.

6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y OTRAS LOCALIZACIONES

La parte más importante de todo modelo es la posibilidad de aplicación a otros ámbitos. En nuestro caso, el modelo utilizado para el dimensionado de la instalación de desalación por ósmosis inversa impulsada con energía undimotriz en Cabo Verde, se puede aplicar en otras localizaciones geográficas con distinto número de horas anuales de operación a cargas parciales y total, así como para instalaciones con diferente número de unidades WEC. En la siguiente sección se muestra un análisis de sensibilidad en el que se puede observar un caso más favorable y otro más desfavorable con respecto al analizado en el capítulo 5.

6.1. Análisis de sensibilidad.

A continuación se analizan dos localizaciones geográficas diferentes.

- **Localización 1: caso más favorable.**

	h/año de operación	Nº de unidades WEC
Caso A (50%*Pw WEC)	4560	9
Caso B (75%*Pw WEC)	1300	
Caso C (100%*Pw WEC)	2900	

Siguiendo la leyenda de colores explicada en el capítulo 5, se muestra a continuación el fichero Excel para la localización 1.

Desalación por ósmosis inversa mediante energías marinas: aplicación a Cabo Verde

Pw_nom total WEC	450	Nº de udes WEC:	9	Pw_nom unitaria WEC, kW				50
	qVP, m3/h	r	SECaux, kWh/m3	SECnet, kWh/m3	SEctot, kWh/m3	qVp Planta, m3/h	PwSWRO, kW	
Caso 1 (50% de qVF)	2,21	0,5426	0,75	1,82	2,57	55,25	142,0	
Caso 2 (75% de qVF)	3,16	0,5159	0,75	1,84	2,59	79,00	204,6	
Caso 3 (100% de qVF)	4	0,49	0,75	1,86	2,61	100,00	261,0	
	h/año	PwWEC, kW	Elección de caso	PwSWRO, kW	Pw_Exceso, kW	qVp produc, m3/h	Producción, m3/a	
Caso A (50% Pw WEC)	350	225	Caso 2	142,0	83,0	79,00	27650	
Caso B (75% Pw WEC)	900	337,5	Caso 3	204,6	132,9	100,00	90000	
Caso C (100% Pw WEC)	1350	450	Caso3	261,0	189,0	100,00	135000	
h/año operación equiv.	2200					Suma:	252650	
						% nominal:	28,84	

Figura 6-1. Aplicación a localización y configuración más favorable.

Como se puede observar, en esta localización identificada por esas h/año de operación para cada caso dado, al añadir una unidad WEC más, la Pw WEC de la instalación asciende, por lo que la planta tiende a operar más tiempo al 100% de su capacidad, lo que conlleva una mejor productividad anual.

- **Localización 2: caso más desfavorable.**

	h/año de operación	Nº de unidades WEC
Caso A (50%*Pw WEC)	4600	6
Caso B (75%*Pw WEC)	1260	
Caso C (100%*Pw WEC)	2900	

Siguiendo la leyenda de colores explicada en el capítulo 5, se muestra a continuación el fichero Excel para la localización 1.

Pw_nom total WEC	300	Nº de udes WEC:	6	Pw_nom unitaria WEC, kW				50
	qVP, m3/h	r	SECaux, kWh/m3	SECnet, kWh/m3	SEctot, kWh/m3	qVp Planta, m3/h	PwSWRO, kW	
Caso 1 (50% de qVF)	2,21	0,5426	0,75	1,82	2,57	55,25	142,0	
Caso 2 (75% de qVF)	3,16	0,5159	0,75	1,84	2,59	79,00	204,6	
Caso 3 (100% de qVF)	4	0,49	0,75	1,86	2,61	100,00	261,0	
	h/año	PwWEC, kW	Elección de caso	PwSWRO, kW	Pw_Exceso, kW	qVp produc, m3/h	Producción, m3/a	
Caso A (50% Pw WEC)	975	150	Caso 1	142,0	8,0	55,25	53868,75	
Caso B (75% Pw WEC)	950	225	Caso 2	204,6	20,4	79,00	75050	
Caso C (100% Pw WEC)	1000	300	Caso3	261,0	39,0	100,00	100000	
h/año operación equiv.	2200					Suma:	228918,75	
						% nominal:	26,13	

Figura 6-2. Aplicación a localización y configuración más desfavorable.

Para esta localización concreta, al disminuir las unidades WEC, se reduce la Pw WEC de la planta, por lo que las horas de operación anuales a cargas parciales aumentan, lo que lleva a una disminución de la producción al año en la instalación.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dado que la mayoría de las regiones áridas tienen altos recursos de energía renovable, la energía undimotriz se presenta como una de las energías renovables más prácticas para la obtención de agua dulce mediante desalación de agua de mar debido a que implica que la planta pueda colocarse lo más cercana posible a la línea de costa, siendo además una energía limpia, fiable, eficiente respecto al espacio ocupado y con un enorme potencial energético.

Tal potencial energético se puede convertir en energía mecánica y, posteriormente, en eléctrica, mediante dispositivos WEC basados principalmente en columna de agua oscilante, rebosamiento o movimiento oscilatorio.

La ósmosis inversa se muestra actualmente como la más indicada para funcionar impulsada por energía undimotriz debido a su alta eficiencia y posibilidad de operar a carga parcial sin pérdida significativa de eficiencia, hasta el 50% de su capacidad nominal.

El proyecto piloto *Wave₂OTM* que se estudia en el Trabajo y que es llevado a cabo por la empresa *Resolute Marine Energy* en Cabo Verde es un ejemplo de que este tipo de sistemas de desalación impulsados por energía undimotriz es viable técnica y económicamente, según los estudios realizados por la empresa.

Tras el análisis energético de la instalación, se ha comprobado que el uso de la recuperación energética resulta bastante interesante debido al impacto que presenta en relación a la reducción del consumo energético de la planta desaladora y al aumento de eficiencia de la misma.

El recurso energético variable conlleva el modelado de la planta para su operación en carga parcial. Se han obtenido los siguientes valores:

- A carga nominal, se tiene un consumo específico (SEC) de 1.86 kWh/m³, siendo la calidad del producto 332 mg/L. Se considera como referencia producción de permeado de 100 m³/h, siendo la potencia consumida 261 kW – considerando 0.75 kWh/m³ de consumo auxiliar -.
- Al 75% de la carga nominal, el SEC es 1.84 kWh/m³, siendo la calidad del producto 439 mg/L. En estas condiciones se producen 79.0 m³/h con un consumo de 204.6 kW.
- Al 50% de la carga nominal, el SEC es 1.82 kWh/m³, siendo la calidad del producto 651 mg/L, la producción 55.25 m³/h con un consumo de 142.0 kW.

Dado que el último caso, 50% de la carga nominal, no permite cumplir las normativas de calidad del permeado para el consumo humano (<500 mg/L), se recomienda parar la planta para menores valores de recurso disponible.

Parar la instalación esporádicamente cuando la carga es menor acarrea problemas de ineficiencia y de mantenimiento, así como de reposición de membranas. Además, la parada de la planta implica horas improductivas que exigen sobredimensionamiento de la planta para cubrir la demanda.

Por estas razones, se recomienda mantener la planta en activo trabajando siempre con un caudal de alimentación entre el 50% y el 100% ya que se observa tras el dimensionado de la instalación que mantener la planta a valores de capacidad altos, (aumentando, por ejemplo, las unidades WEC sin obtener grandes valores de potencia de exceso), aumenta la eficiencia y la productividad de la misma.

En base al análisis realizado, se recomienda para Cabo Verde, la instalación de al menos 6-9 unidades de producción de energía undimotriz (WEC) de 50 kW por cada m³/h de capacidad nominal instalada. En estas condiciones se obtendría se produciría una cantidad de agua en torno al 26-29% de la capacidad instalada. Por tanto, se recomienda utilizar otro sistema energético renovable con la finalidad de incrementar la producción anual.

REFERENCIAS

1. UTN.BA, Grupo undimotriz I+D+I (2018). *Proyecto undimotriz UTN.BA*. Buenos Aires. Recuperado de <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz/?lang=es>
2. World Energy Council (2018). *World Energy Resources*. Recuperado de www.worldenergy.org
3. Aqua-RET (2012). *Delivering knowledge and understanding*. Recuperado de www.aquaret.com
4. García-Rodríguez, Lourdes. *Renewable energy applications in desalination: state of the art*. Departamento de Ingeniería Energética.
5. DiCYT (2018). *Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología-Ciencia*. Recuperado de <http://www.dicyt.com/ciencia>
6. State of Green (2017). *Wave Dragon*. Recuperado de <https://stateofgreen.com>
7. Biblioteca de Ingeniería - Universidad de Sevilla (2018). Recuperado de <https://bibing.us.es>
8. Diario Ecología (2018). *Pato de Salter*. Rescatado de www.diarioecologia.com
9. Wind Prospect Group (2018). *Pelamis*. Recuperado de www.windprospect.com
10. African Development Bank Group (2016). *Blue Economy: Cape Verde wins SEFA grant to develop revolutionary wave-powered desalination system*. Recuperado de <https://www.afdb.org/en/news-and-events/blue-economy-cape-verde-wins-sefa-grant-to-develop-revolutionary-wave-powered-desalination-system-15296/>
11. World Resources-SIMCenter (2017). *Disponibilidad mundial de agua potable*. Recuperado de <http://www.wrsc.org/>
12. Ecowrex (2015). *Wave₂OTM Cabo Verde*. Recuperado de <http://www.ecowrex.org/eg/wave2otm-cabo-verde>
13. Resolute Marine Limited (2015). *Wave₂OTM in Cape Verde*. Recuperado de <http://mria.ie/documents/503badd7d6904035e510fed4a.pdf>

14. EMEC (2018). *European Marine Energy Centre*. Recuperado de <http://www.emec.org.uk/>
15. Ahmed Alkaisia, Ruth Mossadb, Ahmad Sharifian-Barforoush. “*A review of the water desalination systems integrated with renewable energy*”. Artículo Científico, Universidad RMIT, Melbourne, Australia.
16. Jennifer Leijon, Cecilia Boström. “*Freshwater production from the motion of ocean waves – A review*”. Artículo Científico, Universidad de Uppsala, Box 534, 751 21 Uppsala, Suecia.
17. Alessandro Corsinia, Eileen Tortorab, Ennio Cimag. “*Preliminary assessment of wave energy use in an off-grid minor island desalination plant*”. Artículo Científico, Sapienza Universidad de Roma, via Eudossiana 18, 00184, Roma, Italia.
18. Thomas M. Missimera, Robert G. Malivab. “*Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls*”. Artículo Científico, Universidad de Florida, Estados Unidos.
19. Binnie et. Al (2002)
20. Lenntech (2017). *Ósmosis y ósmosis inversa*. Recuperado de www.lenntech.com
21. Danfoss Catalogue (2017). *High-pressure pumps for seawater reverse osmosis applications*. Recuperado de <http://www.danfoss.es>
22. Energy Recovery, Inc. Catalogue (2006). *ERI Technical Bulletin Flow in PX Arrays*. Recuperado de <http://www.energyrecovery.com>
23. Javier González. Un banco de ensayos en el ámbito de las energías marinas. PLOCAN Plataforma Oceánica de Canarias. http://www.tenemosunplan.org/documentos/empleoverde_3.pdf (última visita 08/07/2018)

ANEXOS

NOTA.

Se detectó un error en los cálculos realizados mediante el software ROSA durante la realización de las simulaciones en los valores mostrados en los *Detail Report* de la energía específica y la potencia. Para la obtención de los valores correctos se procedió a calcularlos a mano y posteriormente se usaron estos valores ya correctos en todo lo que proseguía. Los valores correctos son los siguientes:

Correcciones de los datos de potencia (kW) y SEC (kWh/m ³) de ROSA				
100%* $q_{v,F}$	14,18	kW	3,54	kWh/m ³
75%* $q_{v,F}$	10,63	kW	3,37	kWh/m ³
50%* $q_{v,F}$	7,09	kW	3,21	kWh/m ³

Captura del *Detail Report* de ROSA para el caso de operación de la instalación al 50%* $q_{v,F}$ **Detalles del Sistema**

Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	4.08 m ³ /h	Caudal de Permeado Paso 1	2.21 m ³ /h	Presión Osmótica:
Caudal de Agua Bruta al Sistema	4.08 m ³ /h	Conversión Paso 1	54.26 %	Alimentación 25.82 bar
Presión de Alimentación	56.30 bar	Temperatura de Alimentación	20.0 C	Concentrado 58.53 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	37125.92 mg/l	Media 42.18 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	7	NDP media 14.11 bar
Área Activa Total	286.13 M ²	Flujo específico medio Paso 1	7.74 lmh	Potencia 21.28 kW
Clasificación del Agua: Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5				Energía Específica 9.61 kWh/m ³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m ³ /h)	Caudal de concentrado (m ³ /h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m ³ /h)	Flujo específico medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión Booster (bar)	STD Permeado (mg/l)
1	SW30ULE-440i	1	7	4.08	55.95	0.00	1.87	55.62	2.21	7.74	0.00	56.30	651.39

Nombre	Corrientes Paso (mg/l como ión)				
	Alimentación	Alimentación ajustada	Concentrado		Permeado Total
			Etapa 1	Etapa 1	
NH ₄ ⁺ + NH ₃	0.08	0.08	0.17	0.01	0.01
K	438.00	438.00	945.05	10.59	10.59
Na	11080.01	11080.01	23956.05	226.34	226.34
Mg	1486.00	1486.00	3239.48	7.93	7.93
Ca	558.00	558.00	1216.48	2.94	2.94
Sr	0.12	0.12	0.26	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃	5.53	5.53	16.92	0.00	0.00
HCO ₃	158.60	158.60	332.02	4.00	4.00
NO ₃	6.10	6.10	12.04	1.09	1.09
Cl	20926.31	20926.31	45300.28	380.62	380.62
F	1.71	1.71	3.69	0.04	0.04
SO ₄	2400.00	2400.00	5241.78	4.56	4.56
SiO ₂	34.00	34.00	73.03	1.10	1.10
Boro	5.50	5.50	9.51	2.12	2.12

Captura del Detail Report de ROSA para el caso de operación de la instalación al 75%* $q_{v,F}$

Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	6.12 m ³ /h	Caudal de Permeado Paso 1	3.16 m ³ /h	Presión Osmótica:
Caudal de Agua Bruta al Sistema	6.12 m ³ /h	Conversión Paso 1	51.59 %	Alimentación 25.82 bar
Presión de Alimentación	56.30 bar	Temperatura de Alimentación	20.0 C	Concentrado 55.21 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	37125.92 mg/l	Media 40.52 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	7	NDP media 15.45 bar
Área Activa Total	286.13 M ²	Flujo específico medio Paso 1	11.03 lmh	Potencia 24.82 kW
Clasificación del Agua: Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5				Energía Específica 7.86 kWh/m ³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº Elementos	Caudal de Alimentación (m ³ /h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m ³ /h)	Caudal de concentrado (m ³ /h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m ³ /h)	Flujo específico medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión de Booster (bar)	STD Permeado (mg/l)
1	SW30ULE-440i	1	7	6.12	55.95	0.00	2.96	55.30	3.16	11.03	0.00	56.30	439.10

Corrientes Paso (mg/l como ión)					
Nombre	Alimentación	Alimentación ajustada	Concentrado		Permeado
			Etapa 1	Etapa 1	Permeado Total
NH ₄ ⁺ + NH ₃	0.08	0.08	0.16	0.00	0.00
K	438.00	438.00	897.19	7.13	7.13
Na	11080.01	11080.01	22726.56	151.84	151.84
Mg	1486.00	1486.00	3064.06	5.28	5.28
Ca	558.00	558.00	1150.60	1.96	1.96
Sr	0.12	0.12	0.25	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO ₃	5.53	5.53	15.80	0.00	0.00
HCO ₃	158.60	158.60	315.70	2.75	2.75
NO ₃	6.10	6.10	11.76	0.79	0.79
Cl	20926.31	20926.31	42956.29	255.19	255.19
F	1.71	1.71	3.50	0.03	0.03
SO ₄	2400.00	2400.00	4954.53	3.03	3.03
SiO ₂	34.00	34.00	69.44	0.75	0.75
Boro	5.50	5.50	9.44	1.81	1.81

Captura del *Detail Report* de ROSA para el caso de operación de la instalación al 100%* $q_{v,F}$

Detalles del Sistema

Caudal de Alimentación a la 1ª Etapa	8.16 m³/h	Caudal de Permeado Paso 1	4.00 m³/h	Presión Osmótica:
Caudal de Agua Bruta al Sistema	8.16 m³/h	Conversión Paso 1	49.00 %	Alimentación 25.82 bar
Presión de Alimentación	56.30 bar	Temperatura de Alimentación	20.0 C	Concentrado 52.26 bar
Factor de flujo	0.85	STD Alimentación	37125.92 mg/l	Media 39.04 bar
Dosificación Química	Ninguno	Número de Elementos	7	NDP media 16.64 bar
Área Activa Total	286.13 M²	Flujo específico medio Paso 1	13.98 lmh	Potencia 14.19 kW
Clasificación del Agua: Seawater with DOW Ultrafiltration, SDI < 2.5				Energía Específica 3.55 kWh/m³

Etapa	Elemento	Nº Cajas de presión	Nº de Elementos	Caudal de Alimentación (m³/h)	Presión de Alimentación (bar)	Caudal de Recirculación (m³/h)	Caudal de concentrado (m³/h)	Presión del concentrado (bar)	Caudal de Permeado (m³/h)	Flujo específico medio (lmh)	Presión de Permeado (bar)	Presión Booster (bar)	STD Permeado (mg/l)
1	SW3oULE-44oi	1	7	8.16	55.95	0.00	4.16	54.90	4.00	13.98	0.00	0.00	332.34

Nombre	Corrientes Paso (mg/l como ión)				
	Alimentación	Alimentación ajustada	Concentrado		Permeado
			Etapa 1	Etapa 1	Permeado Total
NH4+ + NH3	0.08	0.08	0.16	0.00	0.00
K	438.00	438.00	853.68	5.38	5.38
Na	11080.01	11080.01	21616.16	114.50	114.50
Mg	1486.00	1486.00	2909.99	3.98	3.98
Ca	558.00	558.00	1092.74	1.47	1.47
Sr	0.12	0.12	0.23	0.00	0.00
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	5.53	5.53	14.78	0.00	0.00
HCO3	158.60	158.60	300.90	2.12	2.12
NO3	6.10	6.10	11.36	0.62	0.62
Cl	20926.31	20926.31	40848.38	192.39	192.39
F	1.71	1.71	3.33	0.02	0.02
SO4	2400.00	2400.00	4703.83	2.28	2.28
SiO2	34.00	34.00	66.13	0.57	0.57
Boro	5.50	5.50	9.28	1.57	1.57

