



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Simulación de sistemas de purificación de agua  
con ósmosis inversa y paneles fotovoltaicos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Juan Pedro Ibáñez Lissen

**DIRECTORES:** Víctor Alfonsín Pérez  
Rocío Maceiras Castro

**CURSO ACADÉMICO:** 2015-2016

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Simulación de sistemas de purificación de agua  
con ósmosis inversa y paneles fotovoltaicos*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Cuerpo General

Universida<sub>d</sub>eVigo



## **RESUMEN**

El presente trabajo tiene como objeto el estudio de viabilidad técnica de un sistema de potabilización de agua marina mediante osmosis inversa y energía fotovoltaica. Para ello, se ha diseñado un modelo matemático que permite llevar a cabo simulaciones del funcionamiento del mismo con diferentes configuraciones. El dimensionado del sistema se llevará a cabo para su uso en una embarcación salvavidas por ser una aplicación novedosa y de aplicación en la Armada.

El modelado se realizará con la ayuda de software de simulación matemática por ordenador. Se ha elaborado la modelización matemática de cada uno de los componentes a través de las ecuaciones que predicen su comportamiento.

Para los ensayos, se han determinado las condiciones de radiación y temperatura gracias a una boya meteorológica ubicada en las inmediaciones de la Ría de Vigo.

Paralelamente, se ha llevado a cabo una reconstrucción tridimensional de los distintos elementos que componen el sistema de supervivencia. Para ello, se ha hecho uso de software de diseño asistido por ordenador, con objeto de obtener una reconstrucción realista de la implementación del sistema en una balsa salvavidas.

Los resultados han sido evaluados de cara a la obtención de conclusiones sobre el dimensionado de los componentes y su aplicación en distintos tipos de embarcaciones salvavidas, siempre considerando aquellas que emplea la Armada Española como referente.

## **PALABRAS CLAVE**

Osmosis, Fotovoltaica, Energía, Simulación, Diseño



## AGRADECIMIENTOS

*A mis tutores Víctor Alfonsín Pérez y Rocío Maceiras Castro,  
por guiarme en el proceso de elaboración de este trabajo.*

*A la Armada por brindarme esta oportunidad.*



# CONTENIDO

Índice de Figuras .....	1
Índice de Tablas.....	3
Introducción y Objetivos .....	5
1.    Introducción.....	7
2.    Objetivos.....	9
3.    Estado del arte.....	11
Desarrollo del TFG.....	15
1.    Diseño del sistema .....	17
1.1.    Embarcaciones salvavidas .....	17
1.2.    Diseño de la balsa salvavidas .....	18
1.3.    Diseño del panel fotovoltaico.....	19
1.4.    Diseño de la batería .....	20
1.5.    Diseño del osmotizador .....	21
1.6.    Sistema completo .....	22
2.    Placa fotovoltaica.....	25
2.1.    Energía fotovoltaica .....	25
2.2.    Tipos de sistemas fotovoltaicos.....	26
2.3.    Modelado.....	27
3.    Baterías .....	35
3.1.    Almacenamiento de energía .....	35
3.2.    Tipos de Tecnologías de Baterías.....	36
3.3.    Modelado.....	36
4.    Osmotizador.....	45
4.1.    Ósmosis Inversa .....	45
4.2.    Osmotizadores .....	46
4.3.    Modelado.....	47
5.    Control .....	53
5.1.    Descripción del control .....	53
5.2.    Modelado.....	54
6.    Sistema integrado.....	57
Simulaciones .....	59
1.    Introducción de datos.....	61

1.1. Ensayos en el mes de junio.....	63
1.2. Ensayos en el mes de enero.....	65
2. Modelos alternativos.....	69
2.1. Modelo con dimensiones reducidas .....	69
2.2. Modelo sin batería .....	72
3. Evaluación de resultados .....	75
Conclusiones y Líneas Futuras.....	77
1. Conclusiones.....	79
2. Líneas futuras.....	79
Bibliografía.....	81
Anexo I: Planos de los componentes.....	83

# Índice de Figuras

Figura 1: Esquema y osmotizador experimental de Thomson [6].....	11
Figura 2: Planta de potabilización portátil [7].....	12
Figura 3: Katadyn Survivor 06 [8] .....	12
Figura 4: Tipos de embarcaciones salvavidas .....	17
Figura 5: Balsa salvavidas Zurvitec/Zodiac para 12 personas .....	18
Figura 6: Vista tridimensional de la balsa salvavidas .....	19
Figura 7: Vista tridimensional de la placa fotovoltaica.....	20
Figura 8: Vista tridimensional de la batería .....	20
Figura 9: Vista tridimensional del Osmotizador Katadyn 40E .....	21
Figura 10: Sistema montado.....	22
Figura 11: Aportación energética global (Greenpeace) [14].....	25
Figura 12 Efecto fotoeléctrico .....	26
Figura 13 Aplicaciones marinas .....	27
Figura 14: Circuito equivalente del modelo de los 5 parámetros.....	28
Figura 15: Eco-Worthy 80W 12V foldable mono solar panel [11].....	30
Figura 16: Montaje de la placa .....	31
Figura 17: Diagrama de simulación de placa fotovoltaica en MATLAB/Simulink®.....	32
Figura 18: Ensayo de verificación.....	32
Figura 19 Esquema de una celda electrolítica .....	35
Figura 20: Circuito equivalente de una batería de 6 celdas.....	37
Figura 21: batería 12V65A G31EXT CTRL200.....	40
Figura 22: Tensión de circuito abierto de una celda de Litio-Ion en función de DoD.....	40
Figura 23: Esquema general del modelo de la batería.....	41
Figura 24: Bloques de entrada (a) y salida (b) del modelo.....	41
Figura 25: Bloques de operación.....	42
Figura 26 ecuación (3.15) en MATLAB® .....	42
Figura 27 ecuación (3.11) en MATLAB® .....	43
Figura 28: Cálculo del SOC .....	43
Figura 29: Procesos de osmosis.....	45
Figura 30: Esquema osmotizador .....	46
Figura 31: Esquema membrana de enrollamiento .....	47
Figura 32 Sistema de recuperación de energía Katadyn. Hoja de características del Katadyn Power Survivor 40E [13].....	48

Figura 33: Osmotizador en Matlab/Simulink® .....	50
Figura 34: Bloque del osmotizador en Matlab/Simulink® .....	51
Figura 35: Coeficiente de producción de agua .....	51
Figura 36: Diagrama de flujo del controlador .....	53
Figura 37 Esquema general del control .....	54
Figura 38: Esquema del control.....	55
Figura 39: Función de control .....	55
Figura 40: Esquema del sistema .....	57
Figura 41: Localización de la boya de Meteogalicia.....	61
Figura 42: Radiación solar anual (W/m <sup>2</sup> ).....	62
Figura 43: Temperatura ambiente anual (°C) .....	62
Figura 44: Temperatura del agua anual (°C) .....	62
Figura 45: Radiación solar en Junio (W/m <sup>2</sup> ) .....	63
Figura 46: Temperatura en Junio (°C) .....	63
Figura 47: Potencia fotovoltaica en Junio (W).....	64
Figura 48: SoC en Junio (%) .....	64
Figura 49: Producción de agua en Junio (litros).....	65
Figura 50: Radiación solar en Enero (W/m <sup>2</sup> ) .....	65
Figura 51: Temperatura en Enero (°C) .....	66
Figura 52: Potencia Fotovoltaica en Enero (W) .....	66
Figura 53: SoC en Enero (%) .....	66
Figura 54: Producción de Agua en Enero (litros).....	67
Figura 55: Esquema de 1 panel fotovoltaico .....	69
Figura 57: Esquema de la Batería.....	70
Figura 58: Tensión de circuito abierto para batería de LiFePO <sub>4</sub> en Matlab® .....	71
Figura 60: Potencia Fotovoltaica en Enero (W) .....	71
Figura 61: SoC en Enero (%) .....	71
Figura 62: Producción de agua en Enero (litros).....	72
Figura 63: Esquema general del modelo sin batería.....	72
Figura 64: Potencia fotovoltaica en Enero (W).....	73
Figura 65: Producción de agua en Enero (litros).....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa de osmotizadores Katadyn.....	21
Tabla 2: Hoja de características del panel Eco-Worthy 80W 12V [11].....	30
Tabla 3: Comparativa de tecnologías en baterías .....	36
Tabla 4: capacidad de producción de agua en función de la temperatura (°F) [13]. .....	49
Tabla 5: Comparativa de modelos propuestos.....	75



## **INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS**



## 1. Introducción

El continuo desarrollo y crecimiento de la población mundial ha aumentado el interés por la sostenibilidad en los recursos energéticos y el abastecimiento de agua potable. Uno de los retos para este siglo está siendo combinar la creciente necesidad de abastecimiento de agua con el precio de los recursos energéticos que ello implica [1].

Por otra parte, el agua y la energía son términos que no pueden separarse, pues para la purificación del agua son requeridas grandes cantidades de energía, mientras que de forma análoga, para la obtención de energía se precisan grandes cantidades de agua.

En las últimas décadas, se ha invertido mucho en la investigación y desarrollo de sistemas de purificación de agua. Hoy en día, las tecnologías relacionadas con el uso de membranas son las más utilizadas para la generación de agua potable. Entre ellas, el proceso de osmosis inversa ha resultado ser el método más prometedor para la desalinización.

Los sistemas de osmosis más punteros han reducido considerablemente los requerimientos de energía con respecto a los desarrollados treinta años atrás. No obstante, las altas presiones hidráulicas demandadas por estos procesos siguen consumiendo cantidades considerables de energía. Razón por la cual, se sigue invirtiendo en mejoras que permitan aumentar el rendimiento [1].

De acuerdo a las necesidades energéticas que se presentan, la energía solar constituye una buena candidata ya que en la historia reciente ha cobrado una gran importancia en el ambiente de las energías renovables.

La energía solar cuenta con dos aplicaciones primarias: térmica y fotovoltaica. La energía solar fotovoltaica es empleada para la producción de corriente continua directamente a partir de la radiación solar. Por otro lado, el uso termodinámico de la energía solar térmica, se centra en el calentamiento de agua y su uso se encuentra muy extendido hoy día en Europa [2].

En base a los requerimientos de energía de los procesos de osmosis inversa, generalmente se concluye que para sistemas de desalinización a gran escala, la energía termosolar suele ser la más económica. No obstante, estos sistemas de desalinización son complejos y no son escalables de forma tan eficiente para el caso plantas de menor tamaño. Para sistemas de potabilización a menor escala, la solución óptima parece encontrarse en la energía fotovoltaica [3].

Si bien el estudio de la potabilización de agua marina empleando energías renovables, principalmente del tipo solar, es una corriente que en los últimos años ha adquirido una gran fuerza en el ámbito de plantas estacionarias, su uso en sistemas móviles es mucho más reducido.

Una posible aplicación de estos sistemas móviles, además con ámbito de implementación en la Armada y extensible a otros ámbitos similares, se podría encontrar en los sistemas de obtención de agua potable integrados en los medios de salvamento marítimo actuales para casos de abandono de buque.

Dada la importancia de la hidratación en situaciones de emergencias en la mar [4], se estima primordial la incorporación de un sistema que garantice la producción de agua apta para el consumo humano, y cuyos mínimos son marcados por documentos como *Guidelines for Drinking-Water Quality (2011)*, promulgada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [5].

Actualmente en la Armada Española no existe ningún sistema que garantice la producción de agua potable en embarcaciones de emergencia. En este momento el agua potable con la que se cuenta en caso de abandono de buque, es aquella que los miembros de la dotación lleven consigo. Además, la cubierta de las balsas permite recoger agua de lluvia en caso de que se produzcan precipitaciones. En cualquier caso, no existe una forma que permita generar agua a voluntad del personal de la balsa.

La implementación de un sistema de osmosis inversa para la potabilización del agua del mar, apoyado con energía fotovoltaica, se presenta como una alternativa novedosa para resolver este inconveniente. Siendo además objeto de estudio en el presente trabajo, evaluando su viabilidad tanto técnica como energética

## 2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es el estudio técnico y energético de un sistema de desalinización de agua mediante osmosis inversa alimentado con energía fotovoltaica. Todo ello realizado con el fin de ser implementado en botes salvavidas de la Armada Española.

Para ello, se realizará en primer lugar, un estudio técnico mediante el diseño en Siemens NX<sup>®</sup> del conjunto formado por una balsa salvavidas, un osmotizador, un panel fotovoltaico y una batería. El objeto será estudiar los posibles emplazamientos de todas estas partes integrantes, y así obtener las conclusiones necesarias para adaptar este sistema a las balsas salvavidas de la Armada Española.

De cara a la evaluación energética, se requerirá el modelado matemático de todo el conjunto (osmotizador, placa fotovoltaica y baterías), para posteriormente llevar a cabo simulaciones bajo condiciones reales de radiación y temperatura. Para esta tarea, se empleará el software matemático y de simulación Matlab/Simulink<sup>®</sup>, con el que se elaborarán cada uno de los modelos de los elementos que van a componer el sistema de supervivencia de forma individual, para posteriormente integrarlos en un único modelo global.

A partir de las simulaciones realizadas, se obtendrán los valores de agua producida en un caso hipotético de abandono de buque, estudiando varios intervalos de tiempo, así como para distintas condiciones de radiación.



### 3. Estado del arte

La corriente de estudio en torno a la desalinización de agua empleando energías renovables tiene sus miras apuntando principalmente a plantas fijas, de uso común en áreas rurales.

Uno de los estudios que a día de hoy constituyen un referente en lo que a sistemas de osmosis alimentados con energía fotovoltaica se refiere, es la tesis doctoral de A. Murray Thomson de 2003 [6], en la cual se diseña, construye y analiza un sistema de desalinización (Figura 1). El sistema diseñado por Murray opera con agua marina y no requiere uso de baterías de manera que la producción de agua dulce depende directamente de la disponibilidad de energía solar.

El sistema se dimensiona en base a la disponibilidad de radiación solar en el Reino Unido, para la cual se alcanza un flujo de  $1,5 \text{ m}^3$  de agua al día. El osmotizador empleado utiliza una bomba hidráulica de tipo Clark, estas bombas proporcionan altas presiones con una buena eficiencia, lo que las hace perfectas para este tipo de sistemas. El resto de componentes empleados son de tipo industrial y son seleccionados minuciosamente por el autor de cara a minimizar las pérdidas energéticas y aumentar el rendimiento. Estos factores cobran especial importancia dada la naturaleza renovable del sistema.

Todos los componentes son modelados con algoritmos matemáticos con ayuda del software Matlab/Simulink<sup>®</sup>. Una vez elaborados e integrados los modelos matemáticos, Thomson analiza los resultados a fin de mejorar el sistema y minimizar el coste del agua [6].

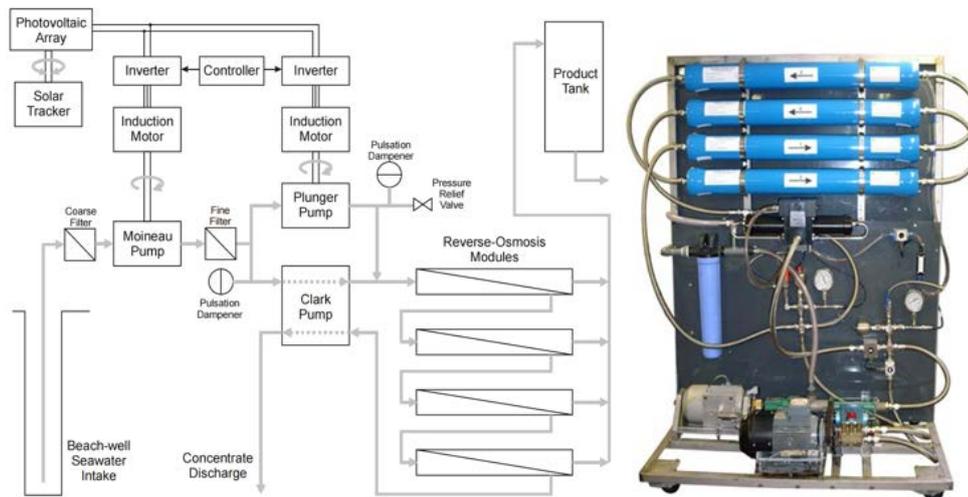


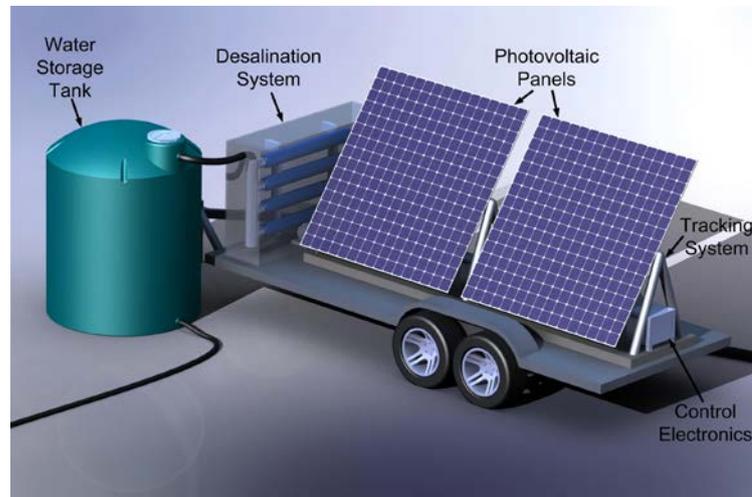
Figura 1: Esquema y osmotizador experimental de Thomson [6]

Por otro lado, el estudio, diseño e implantación de un sistema de desalinización de agua, empleando osmosis inversa y generación eléctrica mediante placas fotovoltaicas, todo ello con almacenamiento de la energía en baterías, ha sido llevado a cabo e implantado al norte del Jordán como parte del proyecto ADIRA (*Autonomous Desalination In Rural Areas*). Este sistema se compone de paneles fotovoltaicos, baterías y osmotizadores compactos que dan lugar a una producción diaria media de 500 litros de agua. En este proyecto se realiza un diseño de las instalaciones así como un estudio del efecto en el sistema de datos meteorológicos como son la radiación solar, la temperatura ambiente y las horas de luz diarias. Además de ello, se analiza el efecto de la presión y temperatura en el proceso de osmosis inversa, para obtener información de la cantidad de agua potable generada, la cantidad de sal eliminada y los consumos energéticos [2].

Estos son solo dos ejemplos de referencia en lo que a plantas potabilizadoras basadas en energía fotovoltaica se refiere; no obstante, su uso a escala reducida y portátil supone un nuevo nicho de

investigación, y como se comentaba anteriormente, no existe casi ningún tipo de sistemas de este estilo para dichas aplicaciones.

Uno de los departamentos que más ha investigado en lo que a sistemas de desalinización portátiles se refiere, es el MIT (Massachusetts Institute of Technology). En su web [7], se muestra una buena variedad de prototipos diseñados (Figura 2) con la finalidad de proporcionar energía y agua potable en zonas remotas como desiertos, zonas rurales, pequeños poblados, etcétera.



**Figura 2: Planta de potabilización portátil [7]**

Este tipo de diseño se basa en la modularidad e intercambiabilidad de componentes. Si bien, el diseño de sistemas basados en osmosis inversa y energías renovables hasta el momento se lleva a cabo teniendo en cuenta la zona de operación, el MIT pretende lograr la mayor simplicidad en sus sistemas con objeto de abaratar costes. Otra ayuda que emplean en este departamento para ganar en eficiencia, es la reconstrucción de los elementos mediante software matemático. Este modo de proceder se ha ido imponiendo en tiempos recientes, sirvan de ejemplo los demás presentados en este apartado, pues es una manera de reducir los costes que implican el ensayo y error con componentes físicos.

Existe un sistema de desalinización de agua para situaciones de supervivencia que puede considerarse como aquel en funcionamiento más próximo a lo que se propone en este trabajo de fin de grado en la actualidad.

El referente más cercano en cuanto a medios, medidas y técnicas de supervivencia en la mar se encuentra en la United States Navy, (USN). La armada norteamericana emplea en sus balsas salvavidas un osmotizador de tipo manual, el Katadyn Survivor 06, capaz de producir hasta 0,89 litros a la hora (Figura 3).



**Figura 3: Katadyn Survivor 06 [8]**

Este sistema ha sido implementado de igual manera en los buques de la United States Coast Guard y en la Armada canadiense.

La energía que se emplea para mover la bomba es puramente mecánica, esto es, un bombeo manual. Es por ello que la producción de este sistema es baja. No obstante, suficiente dadas las dimensiones reducidas y la utilidad.

El sistema aquí diseñado, pretende ser una evolución del modelo anterior manual. Por una parte, la ausencia de necesidad de aportación de esfuerzo humano es un factor muy positivo teniendo en cuenta la posibilidad de impedimentos como la hipotermia el cansancio o el nerviosismo de los náufragos. Por otra parte, el sistema abre la posibilidad de reutilización de la energía generada para otras funcionalidades como radiobalizas, iluminación, etcétera.



## **DESARROLLO DEL TFG**



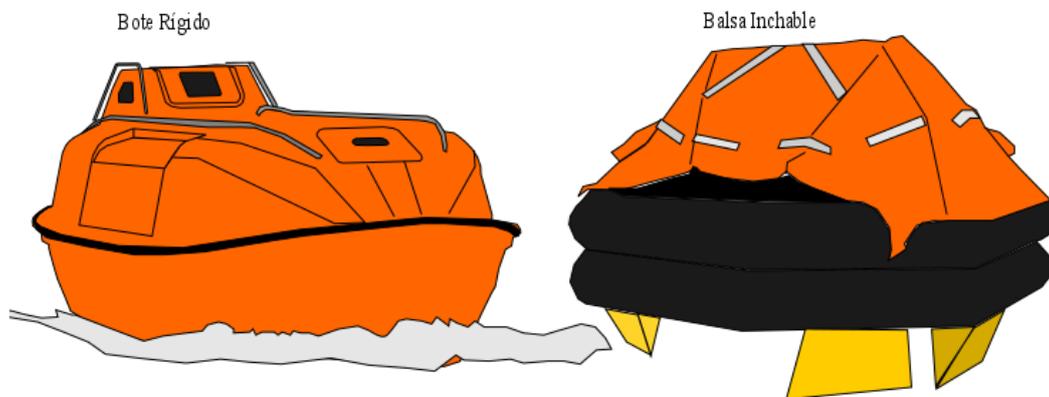
## 1. Diseño del sistema

De cara a demostrar la viabilidad técnica del sistema, resulta de particular interés la realización de una reconstrucción tridimensional de los distintos elementos: balsa salvavidas, placa fotovoltaica, batería y osmotizador. Para ello, se empleará la ayuda del software de diseño gráfico Siemens NX<sup>®</sup>, el cual permite llevar a cabo una reproducción realista del sistema, con el cual se estudiará la distribución espacial de los integrantes del mismo, así como la elaboración de los planos de estos.

### 1.1. Embarcaciones salvavidas

Existen numerosas normativas que tratan de garantizar la seguridad de las personas que navegan en las distintas embarcaciones, de todas ellas, quizá la más importante sea el *Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS)* [9]. En él se reflejan como uno de los aspectos más importantes que conciernen la seguridad en la mar, aquellos medios de emergencia para casos de abandono de buque o hundimiento.

Con objeto de aumentar las posibilidades de supervivencia, a medida que aumentaba el tonelaje y el número de personas que navegaba, en torno a principios del siglo XX comenzaron a emplearse embarcaciones auxiliares que serían el origen de las hoy llamadas balsas salvavidas. Las embarcaciones salvavidas pueden separarse en dos grupos: botes salvavidas rígidos y balsas salvavidas inflables, ilustradas en la Figura 4.



**Figura 4: Tipos de embarcaciones salvavidas**

- *Botes salvavidas rígidos*, son pequeños barcos que cuentan con medios para navegar que se encuentran bien protegidos. Pueden incorporar medios de propulsión: remos, motores e incluso velas. Al ser rígidos pueden estibar más medios dentro del propio barco, además suelen incluirse en un sistema de abandono que permite al personal abandonar el barco dentro de la propia balsa. Su principal desventaja es que ocupan bastante espacio dentro del buque, por lo que suelen emplearse en barcos grandes con poca dotación, como pueden ser los cargueros.
- *Balsas salvavidas inflables*, son balsas más precarias, cuentan con una enorme variedad de tamaños y formas. Su principal ventaja es que ocupan poco espacio en el barco. Su desventaja es que no pueden guardar mucho material en su estiba en el barco. Además en caso de abandono, es necesario lanzarlas al agua y luego embarcar, con el consiguiente riesgo para sus tripulantes.

En el caso de las marinas de guerra, debido al poco espacio disponible en los buques, se impone el empleo de las segundas. El modelo de balsa salvavidas de uso más común en la Armada Española es la *Zurvitec/Zodiac* [10] para 12 personas (Figura 5).



**Figura 5: Balsa salvavidas Zurvitec/Zodiac para 12 personas**

En lo referente al equipamiento de este tipo de balsas, los medios en su interior son escasos y los recursos a emplear una vez que los tripulantes se encuentren en la balsa suelen correr de parte de los mismos. Esto quiere decir que los tripulantes tendrán que llevar consigo agua, alimentos y medicamentos.

En países como Estados Unidos o Canadá, los botes salvavidas de la guardia costera y del ejército cuentan con sistemas que permiten generar agua potable. Concretamente en la Armada Española, no existe a día de hoy ningún sistema que garantice esta producción.

Para intentar suplir esta carencia, el procedimiento de doctrina de control de plataforma (D-CP-05) establece para casos de abandono de buque, que el personal recoja agua potable embotellada en su camino hacia las estaciones de abandono de buque.

En un abandono de buque, existen numerosos pasos a seguir y el personal debe estar adiestrado en la destrucción de equipos, paso de novedades y conocimientos básicos de supervivencia. Con objeto de simplificar estos pasos y de garantizar el suministro de agua potable casi de manera indefinida, en este trabajo se ha propuesto el uso de un sistema de supervivencia autónomo basado en un osmotizador portátil cuya energía es proporcionada por una placa fotovoltaica plegable y una batería. Todos ellos adaptados al medio marino.

Con ayuda del software Siemens NX<sup>®</sup>, se han reconstruido las distintas partes, a fin de visualizar las dimensiones y la posible ubicación de todos los elementos, con ello, se extraerán las conclusiones necesarias para adaptar de la mejor manera posible el sistema a las balsas de los buques de la Armada Española

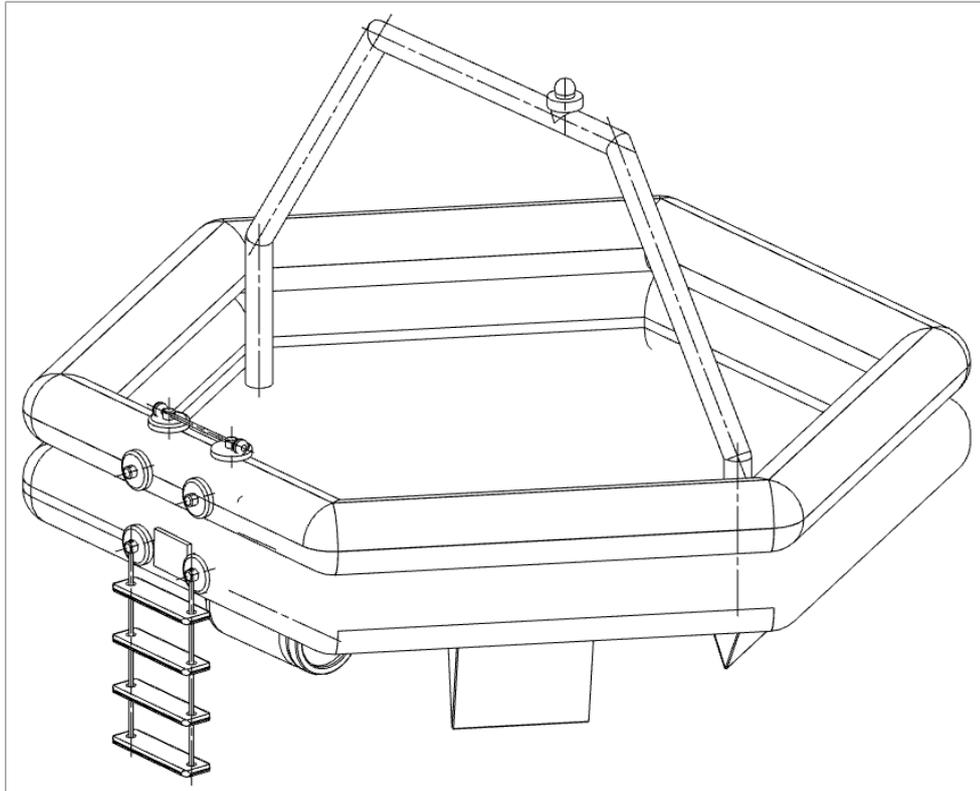
## *1.2. Diseño de la balsa salvavidas*

En el diseño de la balsa salvavidas, se han empleado los planos de la *Zurvitec/Zodiac* para 12 personas [10]. Es una balsa estándar y de uso común en los buques de la Armada. En la Escuela Naval existe una balsa de este tipo para realizar ejercicios y enseñar su uso a los alumnos.

Esta balsa, mientras el buque navega, se encuentra plegada en un bidón cerca de la borda, lo que permite su rápido despliegue e inflado en caso de emergencia. Estos bidones están especialmente diseñados para guardar la balsa. Lo que significa que para poder albergar los elementos del sistema de supervivencia aquí presentado resultaría necesario redimensionar estos bidones.

Teniendo esto en consideración, se ha optado en principio, por no redimensionar dichos bidones, pues el sistema podría estibarse fuera del mismo. Además, esto facilitaría las labores de comprobación y mantenimiento de los mismos.

En la Figura 6 se puede observar el diseño realizado en Siemens NX<sup>®</sup> en tres dimensiones de la balsa salvavidas de la casa Zurvitec/Zodiac.



**Figura 6: Vista tridimensional de la balsa salvavidas**

En el Anexo I se encuentran el resto de los planos, con las vistas planta, alzado y perfil, así como las cotas para el dimensionamiento de la balsa.

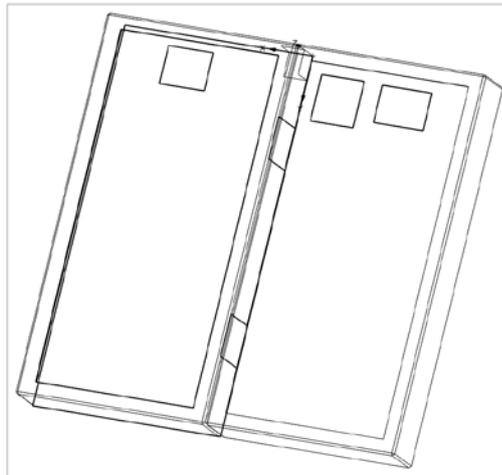
### *1.3. Diseño del panel fotovoltaico*

De cara al diseño de los paneles fotovoltaicos (Figura 7), se utilizan los datos ofrecidos por el fabricante, Eco-Worthy [11]. Una de las ventajas de este modelo de panel es su marco de aluminio. Los bordes metálicos lo hacen especialmente resistente mecánicamente. Lo cual es visto como punto positivo dada la naturaleza extrema de las situaciones en las que su uso sería requerido.

Durante un abandono de buque, las probabilidades de que los elementos sean golpeados contra el propio buque u otros objetos son muy altas. El panel es resistente al agua, esta característica es vital en el ambiente en que se pretende usar. Los flotadores de la balsa son perfectamente compatibles con el roce que pudiera generar el emplazamiento del panel. No habiendo riesgo de pinchazos o desgaste.

La colocación del panel debe ser normal a la radiación solar directa. Para facilitar su emplazamiento, sería conveniente diseñar unos atalajes que sostuvieran la placa unida a la borda de la balsa, permitiendo variar el ángulo del panel.

En relación a su estiba en el buque, es de gran valor diseño portátil. Esta placa puede plegarse como si de una carpeta se tratase. Adoptando unas dimensiones que facilitan su manejo.



**Figura 7: Vista tridimensional de la placa fotovoltaica**

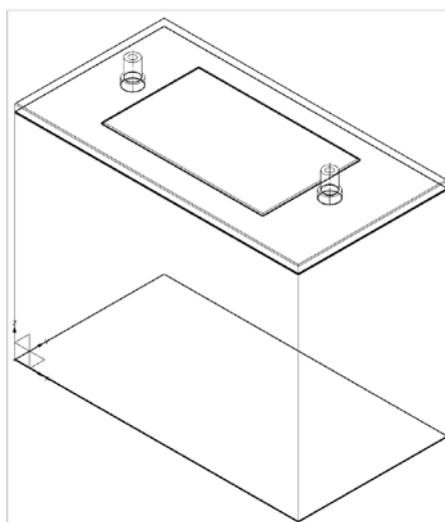
El resto vistas quedan definidas en los planos del Anexo I, con las cotas principales que dejan patente lo afirmado en torno a su portabilidad y facilidad de manejo.

#### *1.4. Diseño de la batería*

La batería seleccionada fue la 12V65A G31EXT CTRL200 de Lithionics Battery [12], cuyas dimensiones vienen reflejadas en la hoja de características que proporciona el fabricante.

Esta batería puede soportar salpicaduras, pero sería interesante dotarla de una carcasa impermeable de cara a soportar de forma más adecuada el nivel de exposición a los elementos al que se le pretende someter. Además de cara a mejorar las condiciones de generación de agua, la estiba de la misma debería ser fuera del bidón de la balsa. Ya que, para un correcto mantenimiento de la batería se debería llevar a cabo una carga periódica de la misma. Su estiba fuera del bidón facilitaría en gran medida esta operación.

En la siguiente Figura 8, se aprecia una vista isométrica de la batería, el resto de vistas se encuentran con el resto de planos de los elementos en el Anexo I.



**Figura 8: Vista tridimensional de la batería**

### 1.5. Diseño del osmotizador

El osmotizador que se empleará para el estudio es el Katadyn Powersurvivor 40E. Como se ha visto en apartados anteriores, Katadyn es la compañía que ya provee a otras instituciones de osmotizadores más sencillos, concretamente, el Katadyn Survivor 06. A continuación se presenta una tabla en la que se comparan ambos desalinizadores.

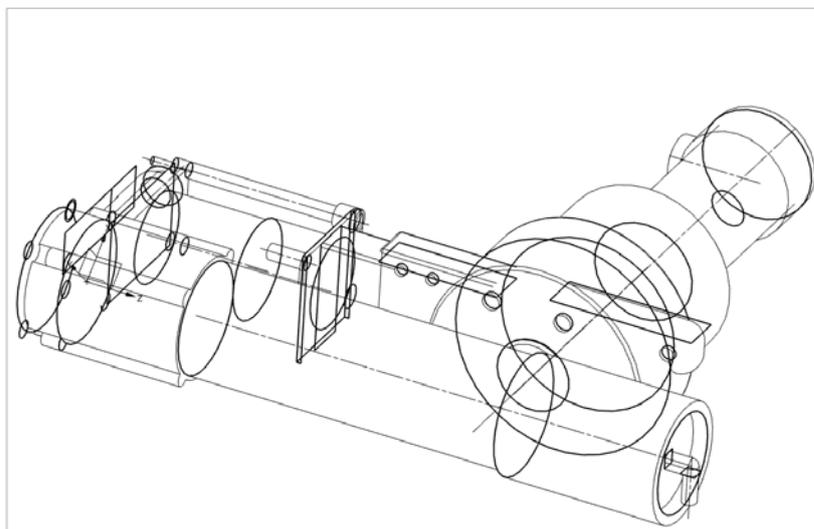
	<i>Katadyn Powersurvivor 40E</i> [13]	<i>Katadyn Survivor 06</i> [8]
Producción agua (litros/hora)	5,7	0,89
Peso (kg)	11,3	1,13
Dimensiones (L×H×B)(cm)	15,2×44,5×40,5	12,7×20,3×6,4
Eliminación de sal	98,4 % media (96 % mínimo)	
Presión de trabajo (bar)	55	
Resistente a humedad y sal	si	

**Tabla 1: Comparativa de osmotizadores Katadyn**

El uso del segundo está respaldado por la USN, la United States Coast Guard y la Armada Canadiense. Katadyn recomienda el uso de su modelo pequeño en balsas salvavidas para 1 a 6 personas. Teniendo esto en cuenta, para las balsas estándar de la Armada Española se requeriría un mínimo de dos de estos aparatos.

La idea original de este modelo de osmotizador era su uso precisamente en situaciones de emergencia. El aparato sigue manteniendo las características de resistencia mecánica y química que estas condiciones demandan. No obstante, hay que añadir que la tendencia de uso ha derivado en la generación de agua potable en embarcaciones deportivas y de recreo de tamaño medio. La mayoría de sus competidores se diseñan ex profeso para esta última aplicación. Es por ello que el nicho de mercado de desalinizadores de agua marina con garantías de funcionamiento en ambientes expuestos a los elementos se reduce casi exclusivamente a esta compañía.

El diseño, como se puede apreciar en la Figura 9, es compacto y libre de elementos que sobresalgan y puedan dañar al personal o los materiales de la balsa. En relación a su almacenamiento a bordo de los buques de la Armada, existen unos maletines para albergar el contenido.



**Figura 9: Vista tridimensional del Osmotizador Katadyn 40E**

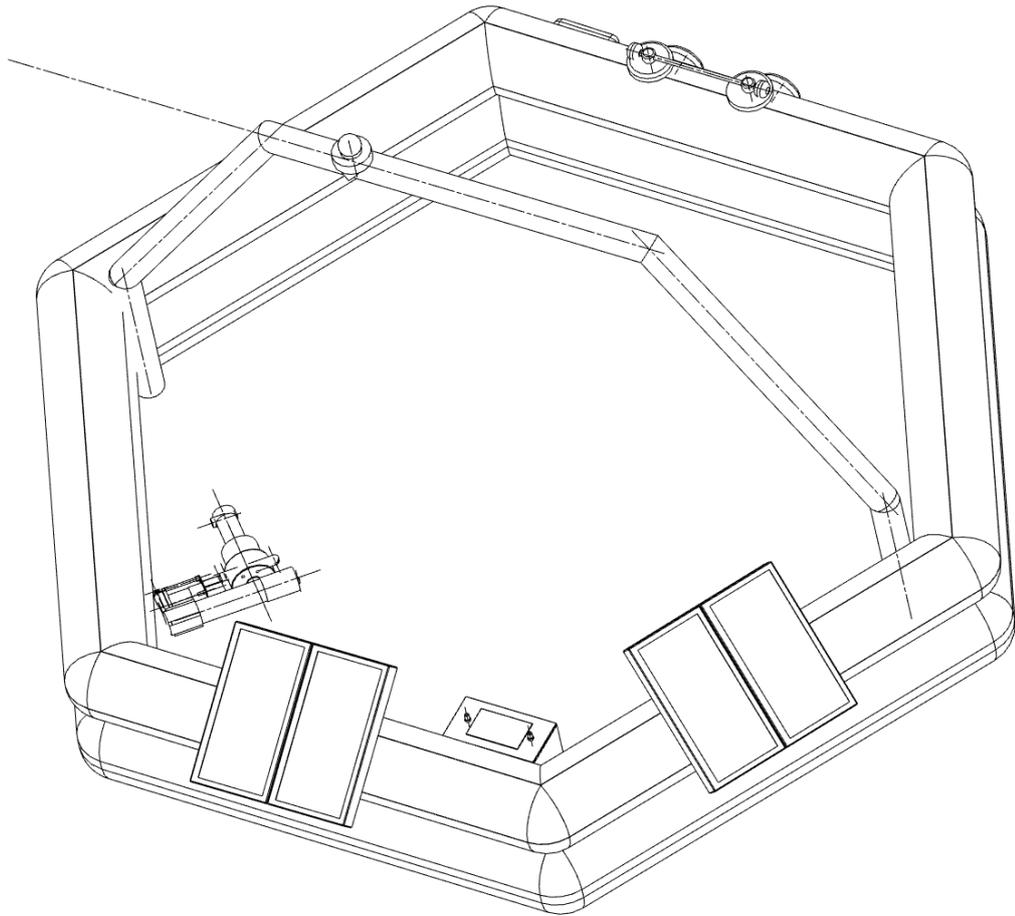
El aparato puede funcionar en parámetros adecuados si más elementos externos, de la forma en que se presenta en la Figura 9, no obstante, el fabricante también proporciona un sistema de prefiltrado que mejora la calidad del agua obtenida. No se estima necesario su uso, dada su aplicación, ya que por otra parte, implicaría llevar más elementos hasta la balsa y posteriormente montarlo en condiciones de estrés.

### 1.6. Sistema completo

Una vez realizado el diseño de todos los componentes en Siemens NX<sup>®</sup>, se procede al ensamble de todos estos elementos. Esto proporciona una visión global del espacio que requiere cada aparato dentro de la balsa.

Dados los pesos del osmotizador, batería y placa fotovoltaica; se desestima la necesidad de hacer estudios de estabilidad y reparto de pesos. Pues en ningún caso suponen un embarque de pesos considerable. Sí sería conveniente reparar en el posicionamiento de la placa fotovoltaica ya que éste tiene una repercusión directa en la potencia eléctrica generada.

En la siguiente Figura 10, se puede apreciar un posible emplazamiento de los elementos.



**Figura 10: Sistema montado**

Como se ha ido introduciendo, el factor que más debe condicionar el posicionamiento de los elementos es la buena captación de radiación por parte de los paneles. Ello puede llevarse a cabo de dos maneras: una sería el giro de la balsa por medio de algún elemento propulsor como espadillas o remos. Este sería el caso de colocar las placas en un punto de la balsa y posicionarla para lograr la mejor incidencia. Otra opción, quizás más costosa en términos de diseño, sería dotar a cada uno de los segmentos que componen la forma de hexágono de los flotadores de atalajes. Este sistema, requeriría de un mayor trabajo en las balsas, pero reportaría un abanico de posibilidades de emplazamiento mucho mayor.

En relación al posicionamiento del osmotizador y la batería, sería interesante instalar al menos un par de sujeciones para cada uno a fin de acortar lo máximo posible la longitud de los cables.



## 2. Placa fotovoltaica

El objetivo de este apartado es el modelado y simulación de un panel fotovoltaico utilizando como herramienta de simulación el software Matlab/Simulink®. El uso de esta herramienta permite la realización de simulaciones de un panel fotovoltaico monocristalino bajo unas condiciones de radiación y temperatura reales, todo ello gracias a la base de datos de Meteogalicia. Para esta labor se ha empleado un modelo altamente contrastado y que permite la simulación de un panel en base a los datos comúnmente proporcionados en la hoja de características de los fabricantes de paneles. La energía generada por el panel alimentará una batería, donde se almacenará dicha energía para su posterior uso en un sistema de osmosis inversa.

### 2.1. Energía fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica es una energía limpia y renovable, con una larga vida útil y una alta fiabilidad. A pesar de ello, el aporte energético producido mundialmente está muy por debajo del resto de fuentes de energía. Sin embargo, debido al progreso tecnológico y al compromiso medioambiental de los países desarrollados, se pronostica un rápido y significativo crecimiento de su aportación energética, tal y como se muestra en un informe elaborado por Greenpeace [14] y representado en la Figura 11.

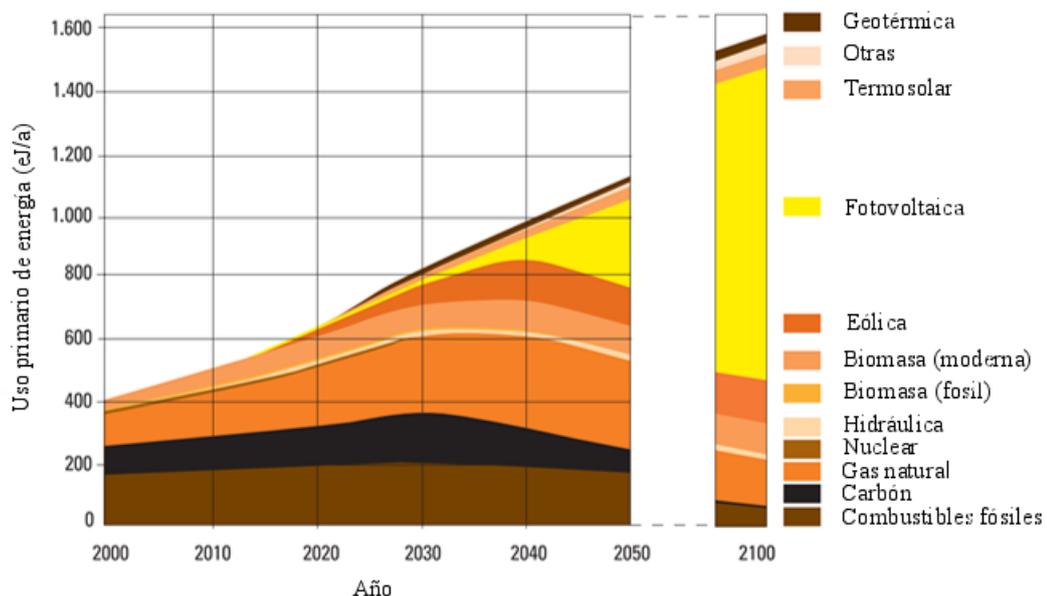


Figura 11: Aportación energética global (Greenpeace) [14]

Esta energía está fundamentada en el llamado efecto fotoeléctrico o fotovoltaico (Figura 12), que consiste en la transformación de luz solar en energía eléctrica. Este proceso se consigue con materiales que tienen la propiedad de absorber fotones y emitir electrones. Cuando estos electrones libres son capturados, el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como energía eléctrica [15].

Los paneles fotovoltaicos se componen de células fotovoltaicas, éstas consisten en una rejilla semiconductor con un tratamiento químico especial para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro.

Cuando la luz solar incide en la célula, los electrones son desplazados del material semiconductor. Conectando materiales conductores en ambos lados, el positivo y el negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de electricidad.

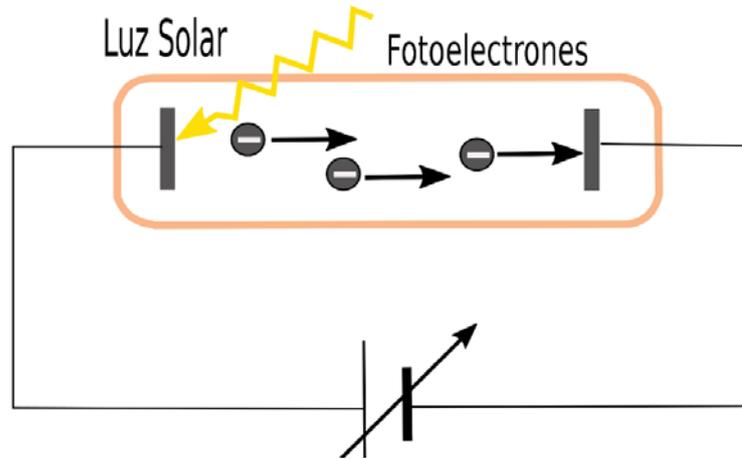


Figura 12 Efecto fotoeléctrico

La radiación solar que incide sobre la placa fotovoltaica está formada por tres componentes; directa, difusa y reflejada [16]:

- *Radiación directa*: es la radiación que se recibe desde el Sol cuya trayectoria no ha sido modificada por la atmósfera terrestre.
- *Radiación difusa*: es la parte de radiación que incide con una dirección distinta a la directa, este cambio se debe a las dispersiones que genera la atmósfera.
- *Componente reflejada*: es aquella radiación incidente que rebota en el terreno en función del factor de la reflectancia del suelo. Este valor es función del tipo de terreno.

Por esta razón, como se viene afirmando en apartados anteriores, es de vital importancia poder variar el emplazamiento de la placa, a fin de obtener la mayor irradiancia efectiva posible.

## 2.2. Tipos de sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos están formados por un conjunto de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos cuya funcionalidad principal es captar la energía solar disponible y transformarla en energía eléctrica útil.

Antes de abordar el funcionamiento de estos dispositivos, se realizarán unas clasificaciones tanto acerca del tipo de configuraciones existentes para el uso de la energía eléctrica generada como las diferentes tecnologías fotovoltaicas que se ofrecen en la actualidad.

Estos sistemas se pueden dividir en dos categorías en función de su conexión: sistemas conectados a la red eléctrica y sistemas autónomos o aislados [16].

- *Sistemas fotovoltaicos conectados a red*: generan electricidad a partir de la radiación solar, para luego alimentar directamente a la red de distribución. Este sistema es muy conocido y empleado en nuestro país, dadas las óptimas condiciones meteorológicas españolas.
- *Sistemas aislados de energía solar fotovoltaica*: Estos sistemas se componen de placas que alimentan sistemas autónomos, bien con sistemas de almacenamiento eléctrico como baterías o bien directamente. Como es evidente, la aplicación de la placa fotovoltaica que va a ser objeto de estudio en el presente trabajo, se encuentra encuadrada en este segundo grupo.

Otra posible clasificación atiende a los materiales empleados para su construcción [17]. Las principales tecnologías de células disponibles en el mercado son monocristalinas, policristalinas, con película fina de silicio y con estructura amorfa.

- *Células monocristalinas*: tienen una muy alta pureza y una estructura cristalina casi perfecta y por lo tanto ofrecen una mayor eficiencia. Debido a que son necesarias unas temperaturas altas para su fabricación, su precio es moderadamente más elevado que el resto.
- *Células policristalinas*: son fabricadas mediante un proceso de fundición en el cual silicio fundido es vertido en un molde y a continuación es dejado fraguar. El proceso de fundición disminuye los costes de fabricación considerablemente, pero a costa de incrementar las imperfecciones de la estructura cristalina y por lo tanto disminuyendo su eficiencia.
- *Células amorfas y con película fina de silicio*: tienen muchas ventajas, tales como su fácil deposición y montaje, la aptitud de ser depositadas bajo sustratos de bajo coste o materiales de construcción, la sencillez para su producción en masa, así como la idoneidad para aplicaciones de grandes dimensiones. El principal inconveniente de este tipo de células consiste en su baja eficiencia, cuando las comparamos con las tecnologías cristalinas.

El tipo de célula seleccionada para este trabajo ha sido la tecnología de célula monocristalina, dada su alta eficiencia, además de su alta relación potencia-tamaño, factor decisivo dada su aplicación en un espacio tan reducido como una balsa salvavidas.

Las aplicaciones marinas de las placas fotovoltaicas están muy extendidas en sistemas de balizamiento, como boyas o espeques, boyas meteorológicas, vehículos, centrales petrolíferas, etcétera. En la Figura 13 se muestran dos de estas aplicaciones de este tipo: una boya marina y unos paneles fotovoltaicos utilizados en plataformas petrolíferas.

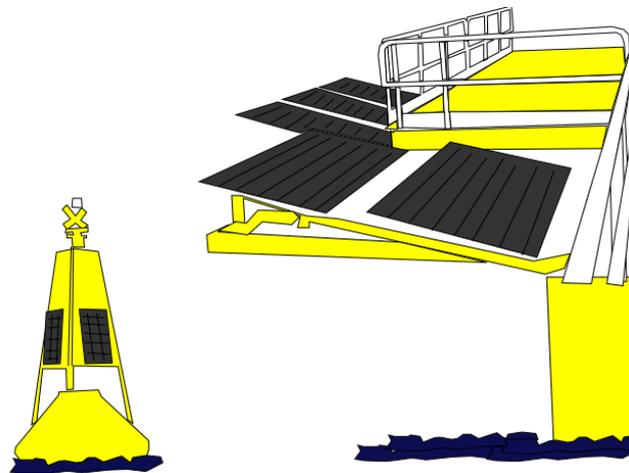


Figura 13 Aplicaciones marinas

### 2.3. Modelado

Una vez tratadas las generalidades y clasificaciones de las placas fotovoltaicas, se abarcará la teoría relacionada en lo referente a su simulación matemática, que es uno de los objetivos principales del presente trabajo. Para ello, es necesario relacionar potencia eléctrica con radiación solar y temperatura en términos de variables matemáticas:

La potencia entregada por los paneles fotovoltaicos depende generalmente de la radiación solar incidente, la temperatura de la celda y de la resistencia de carga. Por lo general, el fabricante ofrece los datos operacionales limitados del panel, como la tensión de circuito abierto  $V_{oc}$ , la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$ , los valores de tensión y corriente para la máxima potencia  $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ , y los coeficientes de temperaturas de tensión en circuito abierto  $\beta_{V_{oc}}$  y de la corriente de corto circuito  $\alpha_{I_{sc}}$ .

Estos datos suelen estar referidos a condiciones estándar de radiación ( $1000 \text{ W/m}^2$ ) y para una temperatura de célula de  $25^\circ\text{C}$ , condiciones que son raramente encontradas en la realidad. Por esta razón, tal y como se desarrollara en este apartado, es necesario referir estos parámetros a condiciones más próximas a la realidad.

El Sandia National Laboratory desarrolló en el 2002 un modelo posteriormente extendido, que permite determinar la producción de energía eléctrica para una carga determinada en cualquier condición de radiación solar y temperatura de celda [18]. El inconveniente a este modelo, es la necesidad de disponer de una gran cantidad de datos de entrada, comúnmente no proporcionados por el fabricante.

Para resolver este inconveniente, posteriormente se ha desarrollado el que se conoce como modelo de los cinco parámetros [19]. Dicho modelo emplea datos que los fabricantes suelen proporcionar en sus hojas de características. Además puede ser utilizado tanto para una celda individual como para el conjunto de celdas que constituyen el panel. Este será el modelo empleado en las simulaciones realizadas en este trabajo.

### 2.3.1. Ecuaciones modelo fotovoltaico

Como se ha mencionado anteriormente, para el modelado del comportamiento eléctrico de la placa, se ha empleado el desarrollado por Widaly de Soto, también conocido como modelo de los cinco parámetros [19].

Las ventajas de este modelo residen precisamente en que solo requiere cinco parámetros de entrada para lograr predicciones muy precisas del comportamiento de la celda o panel fotovoltaico. Los cinco parámetros que dan nombre al modelo son: el factor de idealidad  $\alpha$ , la corriente luminosa  $I_L$ , la corriente de saturación inversa del diodo  $I_0$ , la resistencia en serie  $R_S$  y la resistencia en paralelo  $R_{SH}$ .

El modelo de cálculo de los cinco parámetros ha sido sometido a rigurosos estudios por el NIST (National Instruments of Standard and Technologies) [20], comparando sus resultados con datos experimentales de paneles de distintos fabricantes. Sus resultados también fueron comparados en 2009 frente a modelos mucho más complejos, en los que eran necesarios muchos datos de entrada por los laboratorios de Sandia en Nuevo México [21]. El modelo de Soto se ha extendido por lograr cálculos mejores y más fieles a la realidad partiendo de una necesidad menor de datos de partida.

El modelado de la tensión y la intensidad se realiza a partir del siguiente circuito equivalente, y cuyo esquema (Figura 14) va a constar de: un generador de corriente, un diodo, una resistencia en serie y otra en paralelo. Además va a tener en cuenta factor  $a$  de idealidad del diodo modificado para un panel, que dependerá de la temperatura de celda (Duffie and Beckman, 1991) [22].

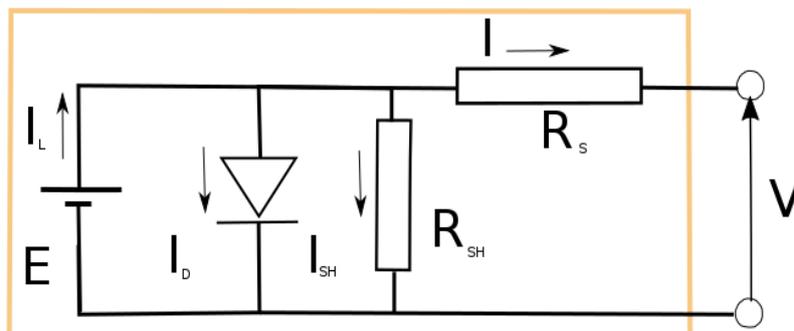


Figura 14: Circuito equivalente del modelo de los 5 parámetros

Junto con los datos de radiación solar absorbida y la temperatura de la celda, se combinan en ecuaciones semi-empíricas para predecir la curva Intensidad-Tensión (I-V) de la celda. Y por tanto se puede obtener la potencia que ofrece una placa en cada momento determinado [19].

Aplicando la Ley de Kirchhoff para la corriente para el circuito equivalente:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad \text{Ec. 3.1}$$

El desarrollo de los términos de corriente del diodo y corriente a través de la resistencia en paralelo ( $I_D$  e  $I_{sh}$ , respectivamente), da lugar a la ecuación 3.2.

$$I = I_L - I_0 \left[ e^{\frac{V+IR_s}{a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad \text{Ec. 3.2}$$

Por otra parte, la Ecuación 3.3 es la utilizada para el cálculo de la potencia ( $P$ ) según la siguiente expresión:

$$P = I \cdot V \quad \text{Ec. 3.3}$$

Para calcular los cinco parámetros de referencia ( $a_{ref}$ ,  $I_{L,ref}$ ,  $I_{0,ref}$ ,  $R_{s,ref}$  y  $R_{sh,ref}$ ), es necesario conocer unos determinados elementos de información bajo condiciones de referencia (normalmente bajo condiciones estándar, donde  $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $G_{eff} = 1000\text{W/m}^2$ )

Particularizando para este trabajo, hay que añadir que para placas del tipo monocristalinas pueden hacerse una serie de simplificaciones [19], ya que éstas tienden a tener una curva I-V en la cual, la pendiente para el cortocircuito es casi cero, dando un valor infinito para la resistencia en paralelo. Una vez que la resistencia en paralelo es infinita, el modelo de los 5-Parámetros se reduce al modelo de los 4-Parámetros:  $a_{ref}$ ,  $I_{L,ref}$ ,  $I_{0,ref}$  y  $R_{s,ref}$ .

Hasta ahora, se han tratado condiciones ideales. Con objeto de encontrar la ecuación correcta para que las condiciones de operación sean distintas a las SRC (*Standard Reporting Conditions*) son necesarias algunas derivaciones en las que no se ahondará, pues no son objeto del presente trabajo.

Las ecuaciones necesarias para el modelado de la simulación se extraen de desarrollar las anteriores. Quedando tres ecuaciones a partir de las cuales se modela la simulación:

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \frac{G_{eff}}{G_{eff,ref}} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + \beta_{voc}(T_c - T_{c,ref}) \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$P = I_{mp} \cdot V_{mp} \quad \text{Ec. 3.6}$$

Donde ( $I_{mp}$ ) es la intensidad máxima, ( $G_{eff}$ ) es la radiación efectiva, ( $V_{mp}$ ) es la tensión máxima, ( $\beta_{voc}$ ) es la corriente luminosa, ( $T_c$ ) la temperatura y ( $P$ ) la potencia fotovoltaica.

### 2.3.2. Selección del panel

A la hora de elegir una placa fotovoltaica, el mercado ofrece una gran variedad de opciones, es por ello que resulta vital definir de forma exacta todas las características que se requieren de ella.

Debido a las características de utilización, el panel debe ser liviano y de tamaño reducido, teniendo en cuenta su emplazamiento en el bote salvavidas. Además debe ser portátil, dado que es posible que no pueda incluirse dentro del propio bidón de la balsa. Todo ello sumado a que tiene que soportar situaciones extremas de humedad, temperatura y salinidad. Además, el panel tiene que proporcionar una tensión de 12V y sería adecuado que presente una alta eficiencia. En base a estos criterios, y desde el

punto de vista de que se va a realizar su simulación matemática, hay que añadir otro factor a tener en cuenta y es la disponibilidad de los datos para su modelado.

Por estos motivos, resulta de particular interés la selección de la tecnología placa de tipo monocristalina, dado que con los datos proporcionados por los fabricantes, es posible llevar a cabo una simulación bastante aproximada a la realidad, que junto a la su elevada eficiencia hacen de esta tecnología la idónea para el caso aquí planteado.

Teniendo en cuenta las necesidades tanto de operación como de simulación, como ya se establece en el apartado de diseño, la placa seleccionada es la Eco-Worthy 80W 12V Foldable Mono Solar Sanel [11](Figura 15).



**Figura 15: Eco-Worthy 80W 12V foldable mono solar panel [11]**

Las características proporcionadas por el fabricante de este tipo de paneles y que van a permitir el modelado del panel, se detallan a continuación en la siguiente tabla:

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
Potencia nominal ( $\pm 3\%$ de tolerancia) (W)	80
$V_{mp}$ : Tensión máxima (V)	17,9
$I_{mp}$ : Intensidad máxima (A)	4,44
Coefficiente de $T^a$ de Cortocircuito (%/ °C)	(010+/- 0,01)
Coefficiente de $T^a$ de Circuito Abierto (%/ °C)	- (0,38 +/-0,01)
Coefficiente de $T^a$ de Max. Potencia (%/ °C)	-0,47
Rango de temperaturas (°C)	-40 a +80
Marco y pata	Aluminio
Voltaje de Batería SLA (V)	12
Dimensiones (L x W x H)mm	555x540x70
Peso (kg)	10,7

**Tabla 2: Hoja de características del panel Eco-Worthy 80W 12V [11]**

Además, esta placa está diseñada para operar en ambientes marinos, siendo resistente a la corrosión provocada por la sal y a la humedad.

En ambientes extremos de supervivencia, como es el caso de la balsa salvavidas, es necesario limitar los pasos para el montaje de cualquier sistema. Su montaje se limita a tres sencillos pasos detallados a continuación, como se muestran de forma esquemática en la Figura 16:

1. Abrir el panel exponiéndolo a la radiación apuntando al sol, evitando sombras o cubrir las placas a fin de conseguir la mayor eficiencia.
2. Extender los cables y conectarlos, según su polaridad, con la batería.
3. Comprobar el display de la placa, si se está recibiendo radiación solar el led verde del display se iluminará.

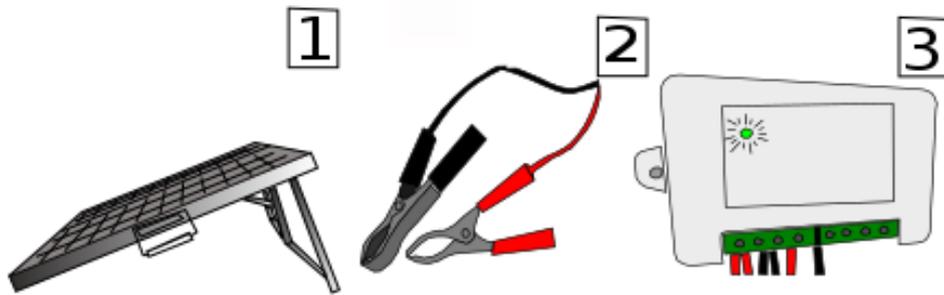


Figura 16: Montaje de la placa

### 2.3.3. Simulación en Matlab/Simulink®

El modelo desarrollado en Matlab/Simulink® emplea las ecuaciones que se han tratado en el apartado anterior, particularizando dichas ecuaciones con los valores proporcionados por el fabricante. De esta manera, los bloques empleados para el modelo de la placa fotovoltaica incluyen los siguientes parámetros:

- *Entrada de datos*
  - Radiación ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )
- *Bloques datos del fabricante:*
  - $I_{mp}$ : Intensidad máxima = 4,44 A
  - $V_{mp}$ : Tensión máxima = 17,9 V
  - $\beta_{V_{oc}}$ : Corriente luminosa = -0,38 %/ $^{\circ}\text{C}$
- *Bloques de referencia a SRC:*
  - $G_{eff,ref}$ : Radiación de referencia = 1000  $\text{W}/\text{m}^2$
  - $T_{ref}$ : Temperatura de referencia = 25  $^{\circ}\text{C}$
- *Bloque de salida:*
  - $P$ : Potencia (W)

En la Figura 17 se muestra la modelización realizada en Simulink® para el caso de un panel fotovoltaico del tipo monocristalino. En este modelo se puede apreciar que los valores de entrada de datos (inputs) son la radiación ( $W/m^2$ ) y la temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )

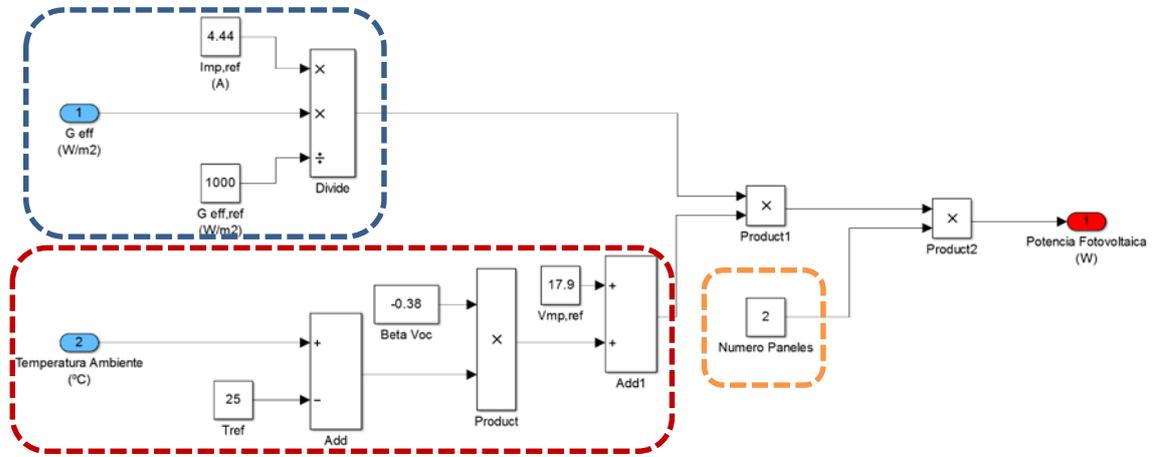


Figura 17: Diagrama de simulación de placa fotovoltaica en MATLAB/Simulink®

En el modelo se han resaltado dos partes importantes, por un lado, resaltada con línea azul, se encuentra representada la ecuación de la intensidad 3.4, que al sustituir con valores del fabricante resulta:

$$I_{mp} = I_{mp,ref} \frac{G_{eff}}{G_{eff,ref}} = 4,44 \times \frac{G_{eff}}{1000}; \quad \text{Ec. 3.7}$$

Por otra parte, resaltada en línea discontinua roja, se puede ver modelada la ecuación de la tensión 3.8, resultante de sustituir valores en la ecuación 3.5:

$$V_{mp} = V_{mp,ref} + \beta_{V_{oc}}(T_c - T_{c,ref}) = 17,9 - 0,38 \times (T_c - 25) \quad \text{Ec. 3.8}$$

De esta manera, se obtienen los términos de intensidad y tensión, que se multiplican para dar lugar a la potencia fotovoltaica. El número de paneles es un valor (resaltado en verde) directamente proporcional a la potencia, por lo que en este caso, dos paneles duplican la potencia fotovoltaica generada. El valor de salida será la potencia fotovoltaica para el instante determinado de los datos de radiación y temperatura. Esta potencia fotovoltaica alimentará la batería para luego producir el agua en el osmotizador.

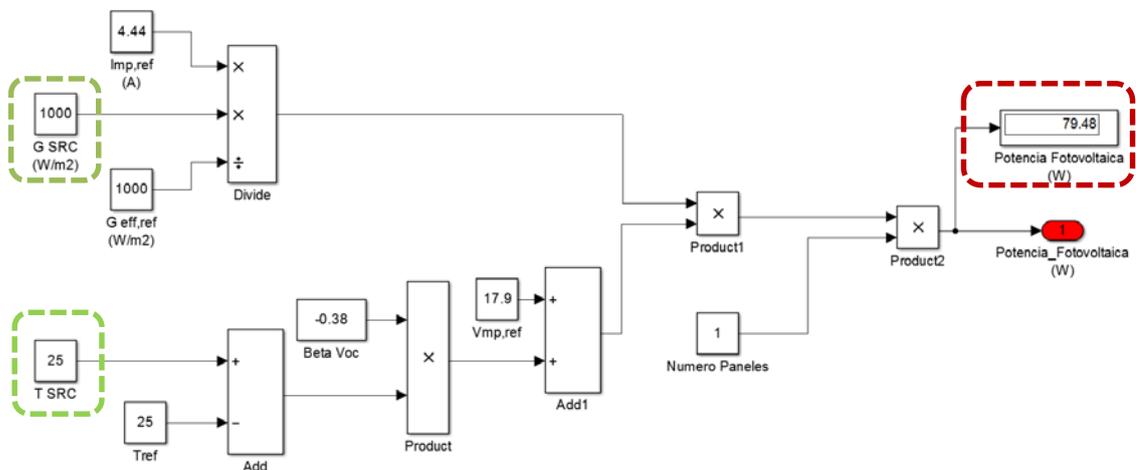


Figura 18: Ensayo de verificación

Se realiza un ensayo de cara a verificar el correcto funcionamiento del modelo (Figura 18). Para ello, se introducen datos de entrada las condiciones SRC, el resultado debería ser igual o similar a la potencia fotovoltaica nominal que el fabricante afirma en su hoja de características.

Introduciendo los datos estándar de radiación y temperatura ambiente (en verde), se comprueba que la potencia fotovoltaica obtenida (en rojo) se ajusta bastante bien a los 80W que el fabricante refleja en su hoja de características [11].



### 3. Baterías

La finalidad de este apartado es el modelado y simulación de una batería utilizando como herramienta el software Matlab/Simulink®. Se desarrollará un modelo general para poder ser utilizado con casi cualquier tipo de batería, para posteriormente ser adaptado a una tecnología concreta. La energía proveniente de la placa solar alimentará la batería que a su vez alimentará el osmotizador.

#### 3.1. Almacenamiento de energía

Una batería es un elemento que almacena energía. Las baterías no producen energía, se cargan o descargan según reacciones electroquímicas de oxidación y reducción. En las reacciones de oxidación-reducción, también conocidas como redox, un agente oxidante (átomo, molécula o ión) produce la oxidación de otro, llamado reductor. [23].

Para que una sustancia oxide a otra tiene que captar electrones, que provienen de esa otra sustancia, por lo que disminuirá su número de oxidación (se reduce). El reductor, por su parte, tiene que ceder electrones (se oxida).

Las reacciones electroquímicas se producen en celdas o pilas electroquímicas. Éstas se componen de tres elementos principales: el ánodo, o electrodo negativo; el cátodo, o electrodo positivo; y el electrolito, conductor iónico que proporciona el medio físico para la transferencia de carga. Los dos electrodos pueden ser bien metálicos o bien de grafito.

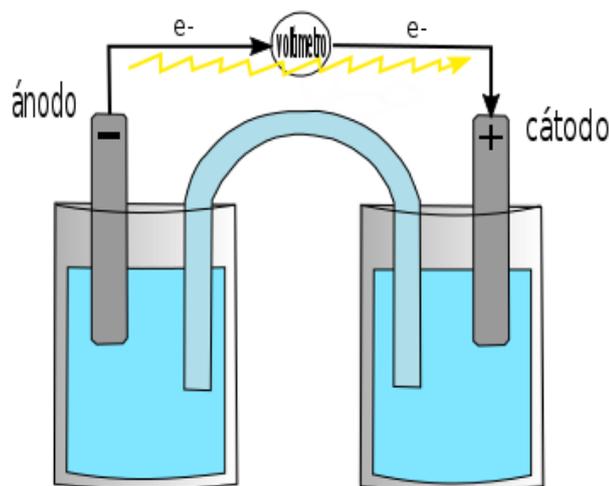


Figura 19 Esquema de una celda electroquímica

El electrolito es, por lo general una disolución salina, pero puede ser compuestos iónicos fundidos o, incluso, un sólido. Los dos electrodos suelen compartir el electrolito. Si no es el caso, el circuito se cierra con un puente salino. En la Figura 19 se puede apreciar todo este proceso [24].

### 3.2. Tipos de Tecnologías de Baterías

La clasificación de baterías más común atiende a las tecnologías y materiales empleados. A continuación se detallan algunas de las tecnologías más utilizadas (Tabla 3) [25].

	<i>Baterías de plomo-ácido</i>	<i>Níquel-Cadmio</i>	<i>Baterías de hidruro metálico de níquel</i>	<i>Baterías de litio</i>
Capacidad de descarga	Alta durante breve período	Media	Media	Media
Ciclos de vida medios	300	1500	500	>1000
Voltaje por celda (datos medios nominales)	2V	1,25V	1,25V	3,2V
Necesidad de mantenimiento	Si	Si	Si	No
Toxicidad	Alta	Muy alta	Baja	Baja

**Tabla 3: Comparativa de tecnologías en baterías**

Las baterías de plomo son las que llevan más tiempo empleándose, hoy en día su uso se limita al arranque de vehículos o en aplicaciones estacionarias, ya que soportan muy bien las descargas profundas y el peso en estas aplicaciones no resulta un inconveniente. La tendencia en baterías con tecnología de Níquel Cadmio es a su desaparición, si bien su uso llegó a estar muy extendido a nivel industrial y doméstico, la alta toxicidad del cadmio unida al efecto memoria que sufren, ha dado paso a una sustitución paulatina por las de hidruro metálico de níquel. En las últimas, el efecto memoria se ve reducido de manera considerable por una parte, y por otra la ausencia de cadmio reduce enormemente su toxicidad. Las baterías de litio han resultado ser una opción muy interesante en los últimos años, pues en ellas el efecto memoria puede ser considerado nulo, soportan bien descargas profundas, ofreciendo una vida larga y la mejor relación capacidad-peso hasta la fecha.

### 3.3. Modelado

A continuación, de manera análoga al apartado de la placa fotovoltaica, se estudiarán las variables y consideraciones necesarias para construir un modelo matemático que simule el comportamiento de una batería.

El rendimiento de una batería depende de muchos parámetros, unos fácilmente medibles, tales como su temperatura y tensión. Otros, sin embargo, son mucho más difíciles de especificar con precisión, como la edad o la forma en que la batería ha sido tratada en el pasado. En términos eléctricos, el problema para el modelado de la batería reside en determinar la tensión de circuito abierto (*OCV*, *Open Circuit Voltage*) o tensión en bornes en ausencia de carga eléctrica. Dicha tensión no es constante, ni lineal y

varía en función del tipo de batería y del porcentaje de carga en que se encuentre en un momento determinado.

Para caracterizar este porcentaje de carga se utilizará el término determinado como profundidad de descarga (*DoD*, *Deep of Discharge*); y que es complementario del estado de carga (*SoC*, *State of Charge*), ambos términos relacionados con el total de la carga de la batería.

En los siguientes apartados, se tratará de explicar las ecuaciones que pretenden relacionar estos dos términos.

Por otra parte, la capacidad de descarga de una batería no es la misma si descargamos a distintas intensidades; siendo menor cuanto mayor sea la intensidad en la descarga, resultando que la capacidad de la batería es menor que la esperada, en términos poco ingenieriles, es igual a decir que la batería dura menos. El modelo de Peukert [26] trata de predecir dicho efecto, y lo caracteriza en función del tipo de tecnología utilizado.

### 3.3.1. Modelado de la tensión de circuito abierto (OCV)

Con objeto de establecer las ecuaciones que modelen el comportamiento de la batería, y en concreto la tensión de circuito abierto de esta, debe construirse en primer lugar el circuito equivalente simple formado por una resistencia interna y una fuente de tensión (Figura 20):

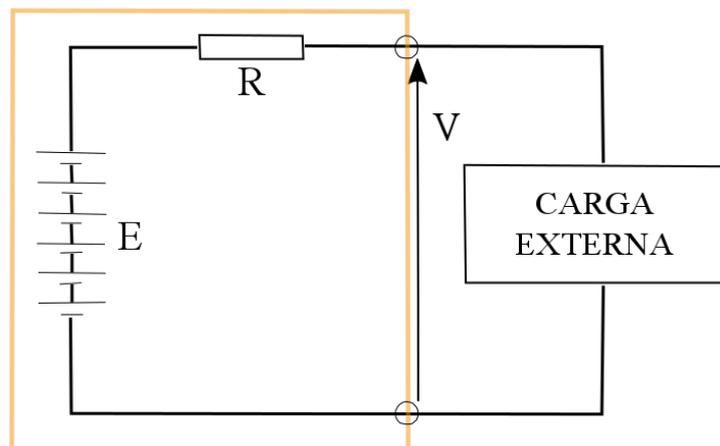


Figura 20: Circuito equivalente de una batería de 6 celdas

En este esquema  $E$  se corresponde con la tensión de circuito abierto y  $R$  se corresponde con la resistencia interna de la batería. Por lo tanto la ecuación que modela la tensión entre bornes de una celda quedaría definida en función de estos dos parámetros y la intensidad, tal y como se relaciona en la siguiente ecuación:

$$V = E - I \times R \quad \text{Ec. 3.9}$$

Como se ha introducido en el apartado anterior, el comportamiento de la batería es dinámico, siendo  $E$  variable en función de la *DoD* o el *SoC*. Esto obliga a conocer la relación entre ambas de cara a la simulación. Cada tecnología cuenta con curvas propias que relacionan tensión de circuito abierto en función de la profundidad de descarga.

En lo que se refiere al término de la resistencia interna, también denominado impedancia, suele ser un parámetro común a las baterías de una misma tecnología. No obstante, suele ser dado por el fabricante. Por tanto, de cara a la simulación, este valor se tomará de la ficha de especificaciones de la batería seleccionada.

### 3.3.2. Modelado de la Capacidad. Coeficiente de Peukert

Con el fin de obtener valores más próximos a la realidad, resulta necesario incorporar el efecto de variabilidad de capacidad de descarga en función de la intensidad. Peukert [26] previó este efecto, para lo que introdujo su conocido coeficiente, que se calcula según la siguiente expresión:

$$k = \frac{\log t_2 - \log t_1}{\log C_1/t_1 - \log C_2/t_2} \quad \text{Ec. 3.10}$$

Para aplicarla, serán necesarios los siguientes parámetros del fabricante: las máximas capacidades de descarga de dicha batería ( $C_1, C_2$ ) para dos tiempos distintos ( $t_1, t_2$ ); comúnmente suele ser la máxima capacidad de descarga a 1 hora y la máxima capacidad de descarga a 20 horas. Para baterías de Litio-Ion puede tomarse el valor 1,05. [27]

Con la constante de Peukert ( $k$ ), se calcula la capacidad de Peukert ( $C_p$ ) para las distintas intensidades de corriente:

$$C_p = I^k \times t \quad \text{Ec. 3.11}$$

Donde  $I$  corresponde con la intensidad de corriente medida en Amperios,  $t$  será el tiempo medido en horas y  $k$  es la constante de Peukert calculada con la ecuación 3.10.

Para introducir la capacidad de Peukert en cada instante, se tomará un diferencial del tiempo  $\delta t$  segundos. Que representará el tiempo en cada paso de la simulación. Por tanto, la carga eliminada de la batería en amperios hora ( $CR_n$ ) se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$CR_{n+1} = CR_n \pm \frac{I^k \times \delta t}{3600} \quad \text{Ec. 3.12}$$

El símbolo ( $\pm$ ) hace referencia a la posibilidad de carga o descarga de la batería. Donde (+) se emplea para la descarga y (-) para la carga.

La profundidad de descarga de la batería ( $DoD$ ) es el cociente entre la carga eliminada y la capacidad original de la batería. Es decir, para el  $n$ -ésimo paso de una simulación paso a paso se podría poner como:

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p} \quad \text{Ec. 3.13}$$

La profundidad de descarga se relaciona  $DoD$  con el  $SoC$ , o estado de carga de la batería, quizá un término más intuitivo que representa la cantidad de batería que queda almacenada. En la ecuación 3.14 se establece su relación:

$$SoC_n = 1 - DoD_n \quad \text{Ec. 3.14}$$

Hasta el momento, se han visto las ecuaciones que permitirán conocer el estado de carga de la batería. A continuación se relacionarán los términos de potencia, intensidad, resistencia interna y tensión.

Partiendo de la misma ecuación de potencia que en el modelo de la placa fotovoltaica (Ec. 3.3) y combinándola con la ecuación básica de tensión de la batería (Ec. 3.9) se obtiene la siguiente expresión:

$$P = E \cdot I - R \cdot I^2 \quad \text{Ec. 3.15}$$

Esta ecuación se despeja en función de la intensidad, de manera que se obtiene la siguiente expresión:

$$I = \frac{(\sqrt{E^2 - 4 \cdot R \cdot P}) \pm E}{2 \cdot R} \quad \text{Ec. 3.16}$$

El símbolo  $\pm$  corresponde con la posibilidad de carga o descarga de la batería. De este modo se tendrán las siguientes ecuaciones para ambos procesos:(+) se emplea para la descarga y (-) para la carga

### 3.3.3. Selección de la batería

A la hora de seleccionar una batería apta para el sistema de desalinización, se ha considerado por un lado, peso y dimensiones, que han de ser lo más reducido posible, dada su instalación final dentro de la balsa. Por otro lado, desde el punto de vista eléctrico, se ha seleccionado una batería con una tensión entre bornes de 12 V, una intensidad de salida de corriente de al menos 4 A y una capacidad mínima de 60 Ah. Además, deben existir datos del fabricante suficientes para modelar el sistema.

Para finalizar, dada la naturaleza extrema de la mar, son importantes la resistencia al agua, mínimo o nulo mantenimiento y facilidad de montaje.

Dadas estas premisas, se consideran más indicadas las baterías de litio para el uso requerido. El mercado de baterías resulta extremadamente amplio, existe un enorme abanico de posibilidades que se ajustan a los requerimientos del sistema de supervivencia. La batería 12V65A G31EXT CTRL200 [12], cumple con todos ellos y las características principales vienen reflejadas en la siguiente tabla:

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
Capacidad (Ah)	65
Ciclos de vida (ciclos)	2000-3000
Capacidad máxima de carga continua de batería (A)	30
Capacidad máxima de descarga continua de batería (A)	120
Capacidad máxima de descarga de pico de batería (A en 1 s)	600
Rango de temperaturas de carga (°C)	0 a +40
Rango de temperaturas de descarga (°C)	-10 a +60
Tensión Nominal (V)	12,8
Resistencia Interna ( $\Omega$ )	$< 8 \times 10^{-3}$
Dimensiones (L x W x H) mm	304 x 170 x 410
Peso (kg)	12,25

**Tabla 2: Hoja de características de la batería**

Esta batería (Figura 21), resulta de particular interés frente a otras de características similares por ser sencilla, no cuenta con más elementos que puedan mojarse o dificultar su instalación. La batería es resistente a salpicaduras, pero debería ser empleada en la balsa con alguna protección para asegurar su estanqueidad.



Figura 21: batería 12V65A G31EXT CTRL200

En la Figura 22 se muestra la gráfica que relaciona tensión de circuito abierto en función de la profundidad de descarga para una celda de Litio-Ion [26]. A partir de esta curva se ha obtenido un polinomio mediante el ajuste de datos de Matlab®, en concreto con la herramienta CurveExpert [28] y que posteriormente se empleará en las simulaciones con Simulink®, utilizando el bloque MatlabFCN, que permite interpretar dichos polinomios como una función de Matlab.

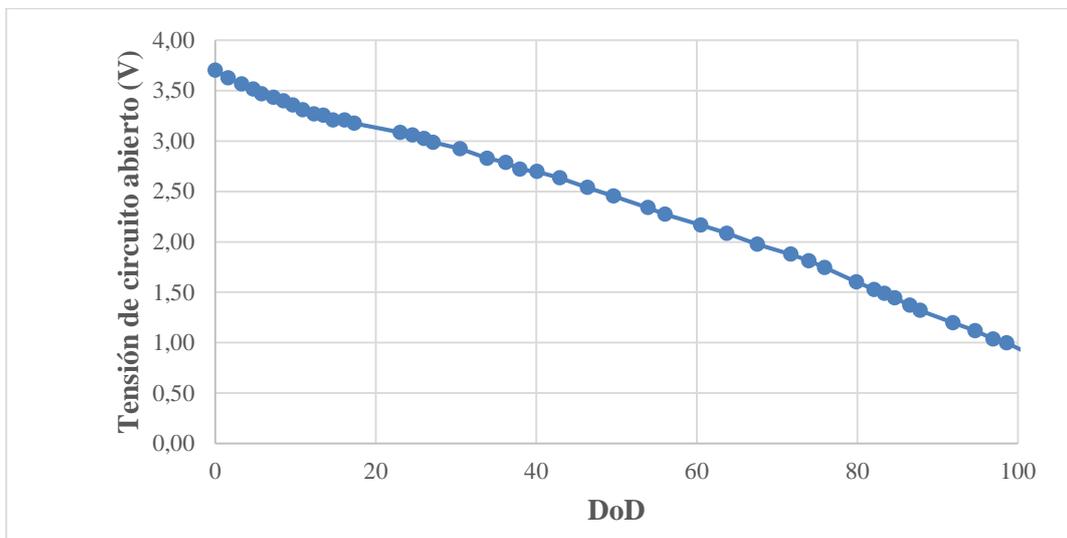


Figura 22: Tensión de circuito abierto de una celda de Litio-Ion en función de DoD

La gráfica se aproximaría al siguiente polinomio de grado 10, donde  $E_0$  sería la tensión de circuito abierto (OCV),  $n$  el número de celdas y  $DoD$  la profundidad de descarga:

$$E_0 = n(89DoD^{10} - 420DoD^9 + 760DoD^8 - 640DoD^7 + 180DoD^6 + 82DoD^5 - 73DoD^4 + 15DoD^3 + 0,62DoD^2 - 0,91DoD + 4,2) \quad \text{Ec. 3.17}$$

### 3.3.4. Simulación en Matlab/Simulink®

El modelo en Matlab/Simulink® emplea las ecuaciones que se han descrito en el apartado anterior particularizando los valores ofrecidos por el fabricante para el modelo seleccionado. En la Figura 23 se muestran los bloques del nivel superior del modelado de la batería realizado en Simulink®.

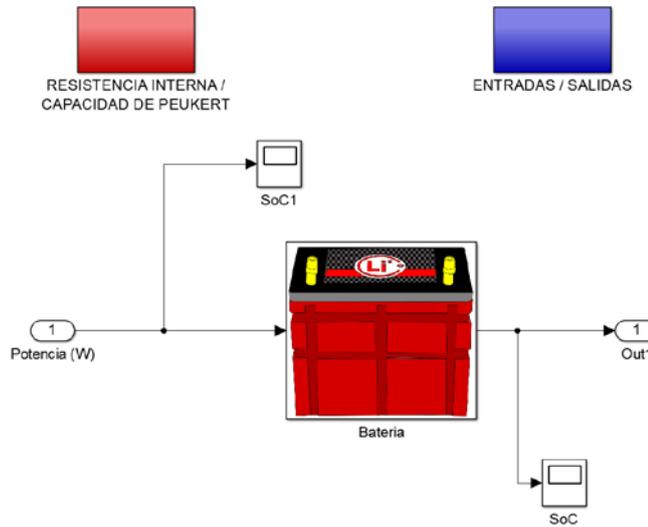


Figura 23: Esquema general del modelo de la batería

En esta figura que muestra el modelo de la batería se aprecia la entrada de datos: Potencia (W), la salida de (*SoC*, %), así como el bloque de la batería. Esta configuración permite la implementación de este modelo con el del sistema fotovoltaico. Además en este modelo se pueden apreciar los bloques de entrada/salida de datos que sirven para la configuración de la batería, y la implementación de la resistencia interna. En el bloque ENTRADA/SALIDA se almacenan datos propios de la batería dados por el fabricante y salida de datos que se emplearán para el osmotizador (Figura 24 (a) y (b)).

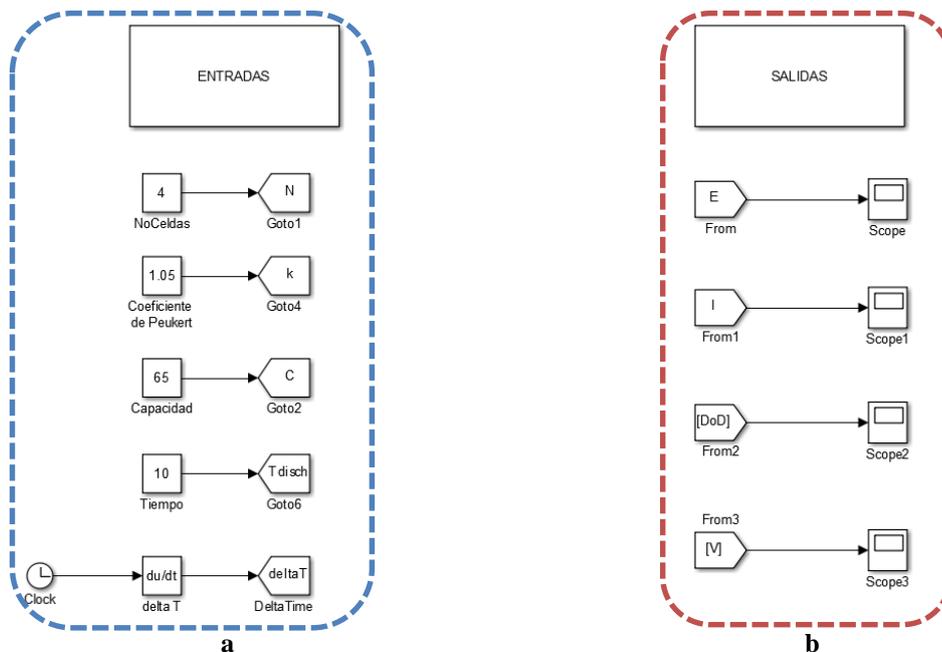


Figura 24: Bloques de entrada (a) y salida (b) del modelo

Donde  $E$  es la tensión de circuito abierto (*OCV*) en voltios,  $I$  es la intensidad en Amperios,  $DoD$  es la profundidad de descarga de la batería y  $V$  es la tensión con carga.

En la (Figura 24 (a)) se aprecian los datos de entrada. La idea de este modelo es poder adaptarlo fácilmente a cualquier batería, para ello solo hay que introducir en este bloque los datos del fabricante. En el caso de la batería elegida, 12V65A G31EXT CTRL200, se introducen 4 celdas ( $4 \times 3,2V = 12,8 V$ ), una capacidad de 65 amperios hora y el coeficiente de Peukert, que para este tipo de batería se tomará el estándar 1,05 [27]. Los bloques de salida (Figura 24 (b)) varían en función de la batería. Los bloques resultan de particular interés ordenados de esta forma, ya que resulta mucho más claro y limpio para operar con el resto de bloques.

Entrando en el bloque de la batería, se pueden apreciar, a su vez, cuatro bloques en el nivel inferior tal y como se muestra en la Figura 25. Cada bloque emplea datos de los que se introdujeron en la entrada para operar según las ecuaciones vistas y generar los datos y gráficas de salida. Para llevar a cabo la simulación, se ha empleado un recurso novedoso con respecto al del panel fotovoltaico, con objeto de reducir bloques de Simulink®, se usan bloques que llaman ecuaciones de MATLAB®. Por supuesto, estas ecuaciones podrían construirse a base de bloques tal y como se ha realizado anteriormente, pero este trabajo resultaría complejo y los diagramas no serían claros.

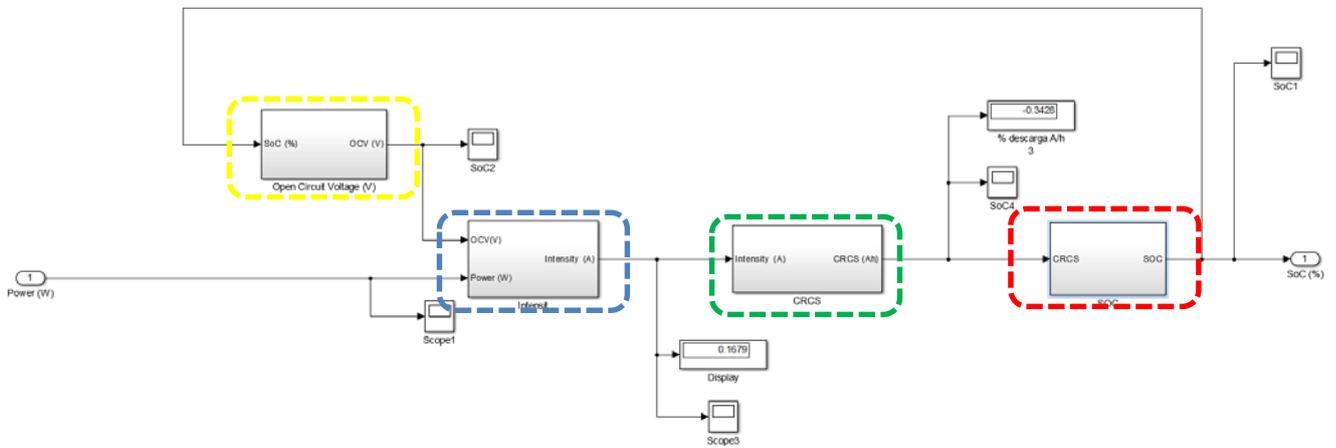


Figura 25: Bloques de operación

Siguiendo el esquema, el primer bloque, señalado con línea discontinua azul, es el de intensidad, este bloque corresponde con la ecuación (3.15). Como se vio en el apartado de ecuaciones, esta fórmula varía en caso de que la batería este cargándose o descargándose, para representar las posibilidades se emplean nexos lógicos, que escrito en lenguaje de MATLAB® resulta (Figura 26):

```
function out=Intens(E,Power,Rin)

if Power>0 % Se descarga la batería
    Intens = (((E*E) - (4*Rin*Power))^0.5)+ E)/(2*Rin);
elseif Power<1% Se carga
    Intens = (((E*E) - (4*Rin*Power))^0.5)- E)/(2*Rin);
else
    Intens=0;
end

out=[Intens];
```

Figura 26 ecuación (3.15) en MATLAB®

El siguiente bloque llamado CRCS, marcado en verde, corresponde con la ecuación (3.11), en la que entra a jugar el coeficiente de Peukert para obtener la carga eliminada. De manera análoga al bloque anterior, el modelo requiere de conectores lógicos para representar las posibilidades de carga o descarga, Figura 27:

```
function out=CRCS(I,Kp,deltaT)

if I>0 % Se descarga la batería (se elimina carga)
    CRCS=(I^Kp)*deltaT/3600;
elseif I<0 %se carga la batería (se suministra carga)
    CRCS=I*deltaT/3600;
else
    CRCS=0;
end

out=CRCS;
```

Figura 27 ecuación (3.11) en MATLAB®

Resaltado en línea discontinua roja, se encuentra el tercer bloque, que representa el SOC o estado de carga, ecuación 3.14; que al ser una ecuación sencilla puede modelarse directamente con bloques de Simulink® (Figura 28).

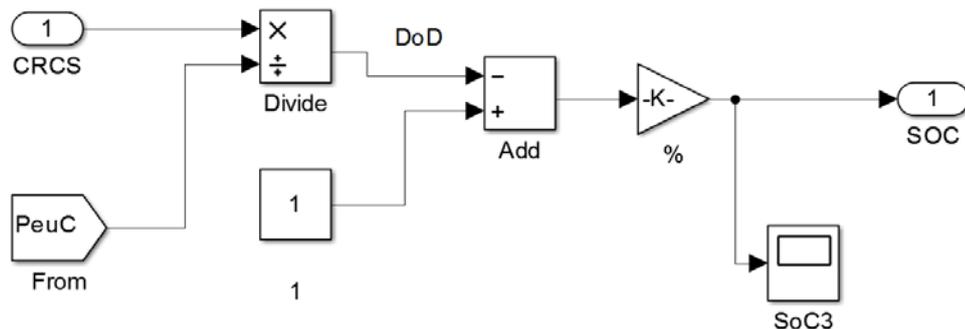


Figura 28: Cálculo del SOC

El último bloque es una realimentación (marcada en amarillo) esto quiere decir que los datos de salida se emplean en el siguiente paso para cada simulación. Este bloque contiene la ecuación 3.7 llamada desde MATLAB®. La realimentación sirve, por tanto, para calcular la tensión de circuito abierto para el estado de carga en el que se encuentre la batería.



## 4. Osmotizador

En el presente apartado se reflejará como se ha llevado a cabo el modelado y simulación del osmotizador portátil, utilizando como herramienta de simulación el software Matlab/Simulink®. La simulación de un osmotizador puede ser una tarea muy compleja, ya que se trata de un equipo que integra a su vez diferentes elementos: motor eléctrico, bomba hidráulica, filtros, etcétera. Por ello, se puede modelar cada elemento, o bien tomarlos como un conjunto para simplificar los cálculos. Esta última es la opción tomada en este trabajo.

El modelado de cada uno de los elementos que componen un desalinizador basado en la osmosis inversa es una tarea realizada en tesis doctorales como la de Murray Thomson [6]. Los datos requeridos para modelar un osmotizador de este tipo no están al alcance del público, ya que los fabricantes son reticentes a proporcionar el modelo de sus motores eléctricos, sus filtros, válvulas, etcétera. Es por ello que en trabajos como la tesis mencionada, los autores suelen optar por diseñar desde cero el sistema. Esta tarea lleva consigo una carga de trabajo que no se ha podido asumir en este trabajo de final de grado.

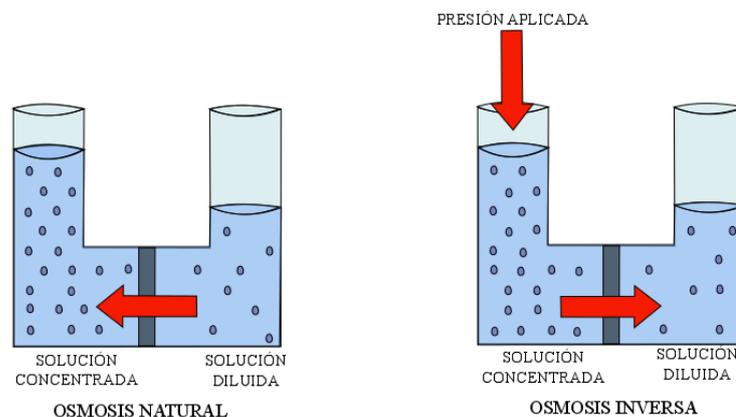
Se consideró por tanto tomar un sistema completo comercial como es el Katadyn Power Survivor 40E. Los datos de consumos energéticos y producción de agua nominales sí se proporcionan y son tomados para su análisis en la simulación. En los apartados de resultados se podrá apreciar que los resultados obtenidos tras el modelado son más que suficientes y no se considera vital un modelado más detallado del desalinizador.

### 4.1. Osmosis Inversa

Para explicar el proceso de osmosis inversa, tradicionalmente se explica primero el proceso de osmosis natural, pues el inverso consiste precisamente en la reversión de aquel.

Se llama osmosis al fenómeno natural que se produce cuando dos disoluciones, de distinta concentración salina se ponen en contacto a través de una membrana semipermeable. Ambas concentraciones tienden a igualar sus concentraciones, por lo que se produce un flujo de agua de la disolución más concentrada a la más diluida.

Este proceso continuará hasta que las concentraciones de ambas disoluciones se igualen. La fuerza que genera este movimiento se denomina presión osmótica y está relacionada con la concentración de sales en el interior de ambas soluciones [6]. Esta presión viene determinada por la cantidad total de sólidos disueltos al lado concentrado de la solución. A mayor cantidad de sólidos disueltos, mayor presión osmótica.



**Figura 29: Procesos de osmosis**

La osmosis inversa es el proceso artificial por el cual se revierte el fenómeno anterior. Reduciendo la salinidad de la disolución hasta entrar, normalmente, en parámetros que permitan el consumo de la misma por parte de los humanos [29]. En la Figura 29 puede observarse un esquema que refleja la osmosis natural (a la izquierda), en el que la disolución más diluida cede agua a la concentrada. En la derecha, se aprecia el proceso inverso, en el cual se aplica una presión, llamada presión osmótica, para diluir aún más la disolución.

El proceso de osmosis inversa es por tanto un sistema de filtrado por el cual se reducen las sales del agua. Para poder llevarlo a cabo en agua de mar, la presión necesaria ronda los 26 bar. Con objeto de lograr un flujo aceptable de agua dulce, se suele aplicar una presión significativamente mayor: entre 50 y 70 bar [6]. Los osmotizadores de pequeño tamaño, como es el caso objeto de estudio, suelen emplear presiones en torno a los 55 bar (aproximadamente 800 psi).

#### 4.2. Osmotizadores

Un osmotizador es un tipo de desalinizador, es decir, un equipo que convierte agua con gran concentración de sal en una disolución apta para el consumo humano, tal y como se ha explicado en el apartado anterior.

Los osmotizadores constan de tres partes fundamentalmente: Una fuente motora (motor eléctrico), una bomba hidráulica y un sistema de filtrado.

En la Figura 30 se muestra un esquema sencillo, el agua del mar entra a un sistema de filtrado bombeada a alta presión. La mayor parte del agua sale de las membranas en forma de agua dulce, mientras una parte es expulsada como una disolución con exceso de sal o salmuera. Es común que este flujo de agua no se desaproveche, si no que se emplee para ayudar a bombear más agua, como se explicará posteriormente.

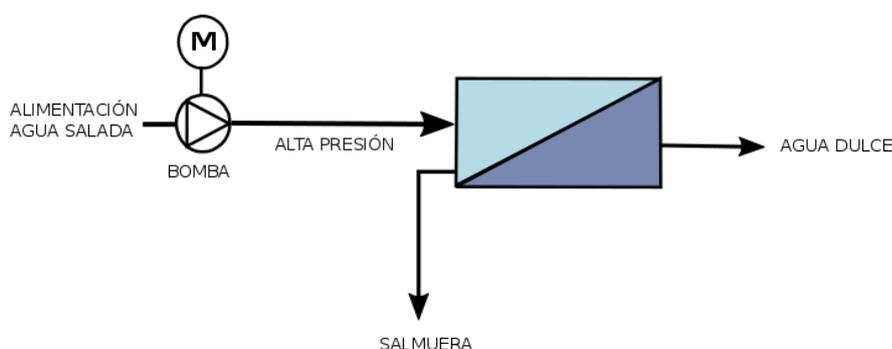


Figura 30: Esquema osmotizador

Las membranas de un osmotizador deben presentar un alto grado de permeabilidad y alto rechazo de sales. Por ello, es determinante la selección de los materiales para fabricarlas. Existen dos tipos de membrana atendiendo a sus materiales, aquellas que emplean polímeros altamente ordenados, como el acetato de celulosa, y las que emplean derivados de termoplásticos:

- *Membranas de acetato de celulosa:* se componen de una mezcla de diacetato y triacetato de celulosa. El rechazo de sales y flujo de agua característicos se establece en el proceso de fabricación. Trabajan a máximo rendimiento con presiones superiores a las 27 atmósferas, esto las hace óptimas para aplicaciones de desalinización de agua con altas concentraciones de sal.
- *Membranas compuestas de poliamida:* son membranas fabricadas en dos etapas. Estas membranas permiten un alto flujo de agua con bajo paso de sales, mejorando sustancialmente con respecto a las de acetato de celulosa. La parte negativa es que se degradan rápidamente al entrar en contacto con cloro libre. Por otra parte, resisten mejor el ataque microbiano. [30]

Uno de los factores más determinantes en un osmotizador es la disposición de sus membranas, atendiendo a este factor pueden distinguirse membranas de tipo plano, tubulares, de fibra hueca y de enrollamiento en espiral. No obstante, hoy en día se fabrican casi en exclusividad los dos últimos tipos:

- *Membranas de fibra hueca:* Son tubos de pequeño diámetro a través de los cuales circula el agua a alta presión. Son compactas y las que más agua pueden llegar a filtrar. A pesar de ello, hay que contar con que el agua que se introduce para su filtrado no puede tener una concentración tan alta como las de enrollamiento. Son las primeras membranas que se fabricaron y a día de hoy se siguen utilizando, aun cuando, las más empleadas hoy en día son las de enrollamiento en espiral.
- *Membranas de enrollamiento en espiral:* Son las membranas de uso más extendido por su tamaño compacto y coste de producción es relativamente bajo. Además son fáciles de limpiar y pueden trabajar con aguas más cargadas de partículas. No obstante, siguen produciendo menos cantidad de agua que las de fibra hueca. Se componen de láminas rectangulares apiladas que, como su propio nombre indica, se enrollan para formar un cilindro. El agua a alta presión se introduce por uno de sus extremos, saliendo por el centro del otro el agua dulce y la concentrada por su periferia [31]. En la Figura 31 se puede observar un dispositivo de osmosis con este tipo de disposición de las membranas en forma de espiral. Se puede apreciar como el flujo de agua salada circula en sentido axial.

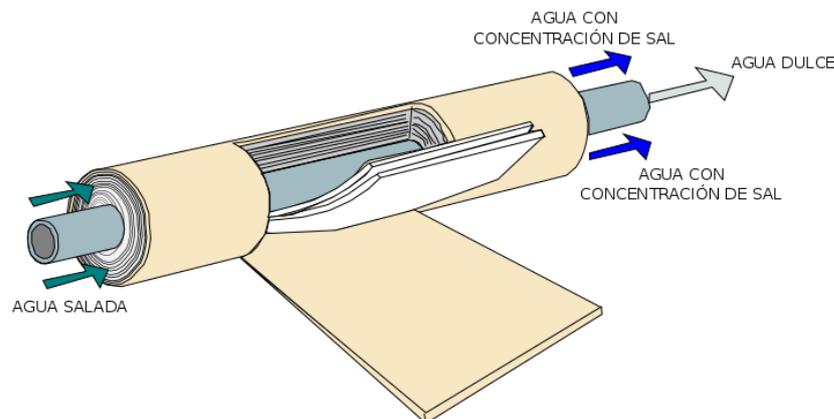


Figura 31: Esquema membrana de enrollamiento

### 4.3. Modelado

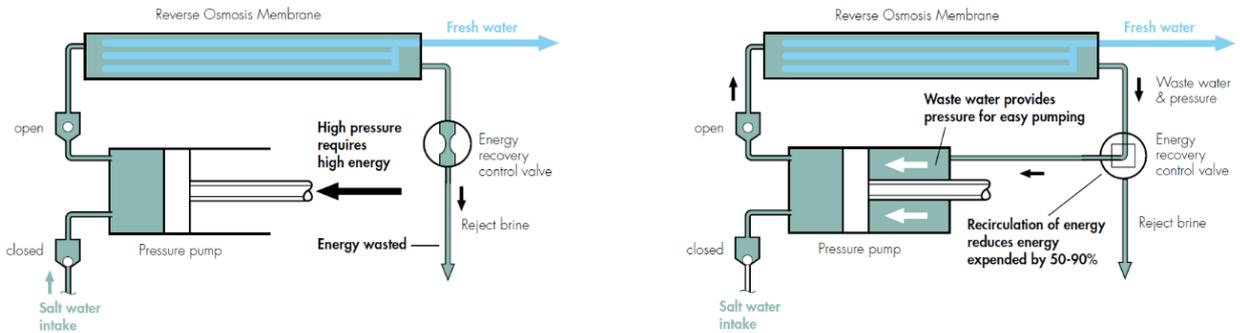
De cara a modelar un desalinizador de ósmosis inversa, hay que tener en cuenta diversos factores. A nivel energético, hay que comprender los distintos elementos que conforman la máquina y que llevan asociado un consumo energético. A nivel de características del agua, hay que seleccionar aquellas que afectan de forma significativa a la generación de agua dulce.

#### 4.3.1. Modelado de los componentes del osmotizador

De cara al modelado del osmotizador, se distinguen tres componentes principales: motor eléctrico, bomba y sistema de filtrado.

- *Motor eléctrico:* en el caso del modelo seleccionado para este proyecto, el Katadyn Power Survivor 40E, el motor eléctrico empleado es de corriente continua, con escobillas. Este dispositivo requiere poca demanda de potencia, lo cual es importante dada las características de la aplicación de este sistema, donde el consumo energético va a ser uno de los factores decisivos en el estudio de viabilidad técnica. Con una corriente de 4 amperios y una tensión de 12 voltios, demanda una potencia nominal de 48 vatios.

- *Bomba hidráulica:* la bomba hidráulica empleada es una bomba de alta presión de pistón simple con un sistema de recuperación energética, y patente pertenece a la propia compañía fabricante. Estos sistemas comenzaron a patentarse con el desarrollo de los osmotizadores. Otras bombas también utilizadas para este tipo de aplicaciones son las de tipo Clark y las centrífugas. Tal y como se puede apreciar en la Figura 32, para este osmotizador, la bomba consiste en un cilindro con pistón simple, que emplea el agua con alta concentración de sal para empujar durante la carrera por el otro lado de la cabeza del pistón.



**Figura 32 Sistema de recuperación de energía Katadyn. Hoja de características del Katadyn Power Survivor 40E [13].**

- *Membrana:* los sistemas de filtración han sido explicados con detalle en el apartado 4.2. Cabe añadir, que es común el empleo de sistemas de pre-filtrado. El fabricante los suele suministrar como complemento al osmotizador. Además de posibles tratamientos posteriores del agua para adecuarla al consumo humano. Posteriormente se hablará con más detalle del tratamiento de agua y las consideraciones para este sistema de supervivencia.

De cara a la simulación matemática, puede ser interesante tener en cuenta las eficiencias de estos componentes. El problema es que los fabricantes no suelen proporcionar información muy detallada sobre los componentes de sus máquinas. En este caso, se despreciarán estos rendimientos, dado que las variaciones en la producción de agua se consideran mínimas con respecto a la nominal, que sí es dada por el fabricante.

La relación matemática entre el flujo real y el nominal se modelará como:

$$F_R = \alpha \times F_N \tag{Ec. 3.18}$$

Donde  $F_R$  es el flujo real de agua potable en litros por cada hora,  $\alpha$  es el factor de productividad en función de la temperatura del agua  $F_N$  es el flujo nominal de agua en litros/hora. De esta forma, se evaluará el conjunto del osmotizador como una demanda energética de 48 voltios que producirá 5,7 litros/hora de agua potable.

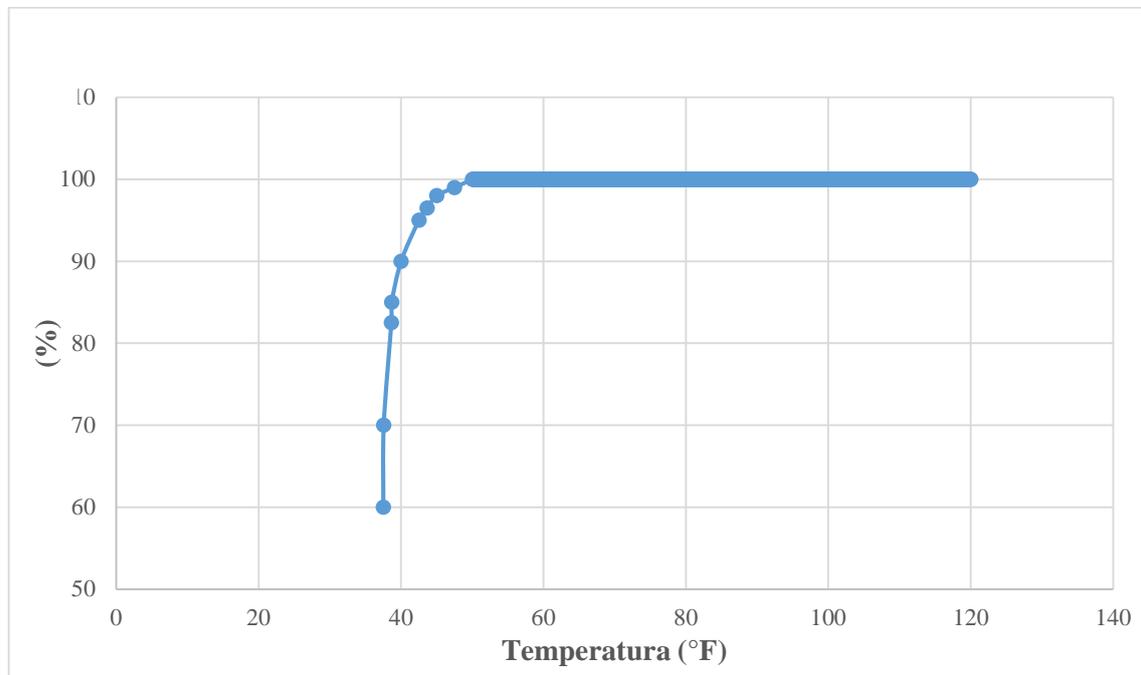
#### 4.3.2. Producción de agua en función de sus características

Si bien las características del agua salada: composición, pH, dureza, turbidez, densidad de sedimentos, etc., afectan principalmente a la calidad del agua desalinizada; hay uno que afecta directamente a la cantidad de agua producida y es la temperatura.

La temperatura del agua varía bastante no sólo en función de la zona, sino también según las corrientes y profundidades de donde sea extraída. La temperatura afecta al funcionamiento de la membrana de tres formas. Por una parte, a menor temperatura, el flujo de agua dulce es menor; pues existe un mayor riesgo de precipitación. Además la temperatura afecta a la viscosidad del agua y, por consiguiente, a su paso por las membranas. Por último, también ha de tenerse en cuenta, que temperaturas mayores propician la aparición de microbios

Todo ello se resume en que el flujo de permeado se incrementa alrededor de 3% por cada grado centígrado de incremento de temperatura [32].

El fabricante proporciona una tabla en la que se relaciona el porcentaje de flujo nominal producido en función de la temperatura expresada en Fahrenheit.



**Tabla 4:** capacidad de producción de agua en función de la temperatura (°F) [13].

Esta curva se puede ajustar a una ecuación para introducirlo en el modelo matemático, como un coeficiente que multiplicará al flujo nominal de agua dulce en función de la temperatura. Para ajustar los puntos extraídos de la gráfica del fabricante se emplea el programa Curve Expert<sup>®</sup> [28], que ajusta la curva a la siguiente ecuación:

$$y = a \times e^{-e^{b-cx}} \quad \text{Ec. 3.19}$$

Donde:

- $y$  = porcentaje de agua producido
- $x$  = temperatura del agua en F°
- $a = 99,5463912498$
- $b = 21,6560242752$
- $c = 0,600211529306$

#### 4.3.3. Selección del osmotizador

Llegado este apartado, ya se conoce que el osmotizador utilizado es el Katadyn Power Survivor 40E, ya que para acotar las explicaciones de los apartados previos resultaba de interés conocerlo. A continuación se explicarán los criterios valorados a la hora de elegir dicho equipo.

Por un lado, como viene siendo recurrente, uno de los factores primordiales para elegir el osmotizador es la portabilidad, el tamaño y peso reducidos. Por otro lado debe ser resistente a la intemperie. Y por último, debe tener una demanda energética reducida.

Tomando estos factores en consideración el abanico de mercado se reduce de forma sustancial hasta el punto en que se valoraron solo dos osmotizadores: el Katadyn Power Survivor 40E y el Seafari mini 170. En la siguiente tabla pueden compararse sus características:

	<i>Katadyn Power Survivor 40E</i> [13]	<i>Seafari mini 170</i> [33]
Tensión nominal (V)	12 V	12 V
Intensidad nominal (A)	4 A	29 A
Potencia nominal (W)	48 W	348 W
Producción agua (litros/hora)	5,7 l/h	26,0 l/h
Peso (kg)	11,3 kg	32,0 kg
Dimensiones (L×H×B)(cm)	15,2×44,5×40,5	31,0×66,1×45,1
Eliminación de sal	98,4% media (96% mínimo)	99,4% media (99,2% mínimo)
Presión de trabajo	55 bar	57 bar
Resistente a humedad y sal	si	no

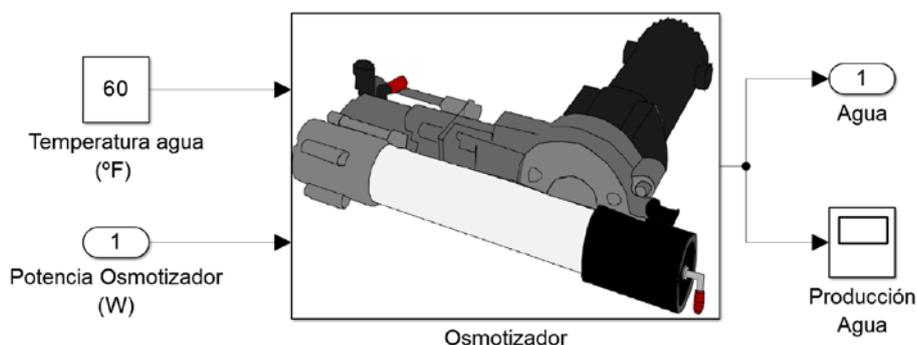
**Tabla 3: Comparativa de osmotizadores**

Las dos opciones tienen puntos a favor y en contra, como se puede ver, el Katadyn tiene unas dimensiones más contenidas y es resistente a las condiciones ambientales. El Seafari en cambio produce más agua a cambio de un aumento de peso y tamaño. La potencia reclamada es un factor determinante, ya que a pesar de que el Seafari casi quintuplica el flujo de agua potable, reclama una potencia que dadas las condiciones, sería difícil de proporcionar de forma continua.

El aparato de Katadyn, se ha diseñado contemplando la posibilidad de que no se le pueda proporcionar energía eléctrica. Para este caso, se le ha dotado de un sistema manual con el que mover la bomba. Se estima por tanto la opción de Katadyn como la mejor solución.

**4.3.4. Simulación en Matlab/Simulink®**

El diseño del modelo en Matlab/Simulink® se ha elaborado de forma acorde a las consideraciones que se han tratado en los apartados anteriores. En la Figura 33 se aprecia el nivel superior del modelo del osmotizador. Las entradas o “inputs” de este bloque serían la potencia entregada por la batería y la temperatura del agua del mar. La salida o “output” sería el caudal de agua osmotizada.



**Figura 33: Osmotizador en Matlab/Simulink®**

A su vez, este bloque principal (osmotizador) estaría a su vez dividido en dos términos (Figura 34).

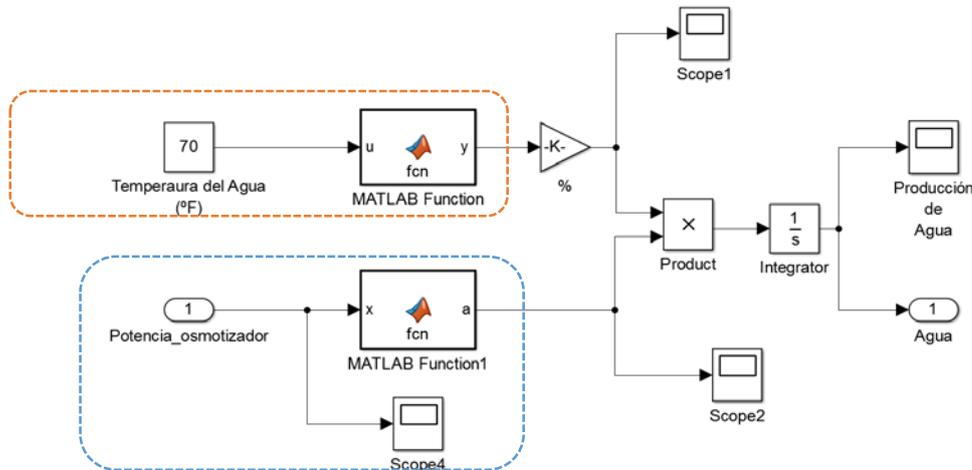


Figura 34: Bloque del osmotizador en Matlab/Simulink®

La parte superior del esquema (marcado en naranja), contiene la ecuación de producción de agua en función de la temperatura del agua del mar. La cual se ha modelado como una función de Matlab® (Figura 35) de la siguiente manera:

```
function y = fcn(u)
%Coeficientes
a=9.95463912498E+001
b=2.16560242752E+001
c=6.00211529306E-001
y=a*exp(-exp(b-(c*u)))
```

Figura 35: Coeficiente de producción de agua

Posteriormente se empleará este coeficiente para multiplicar al flujo nominal de agua, modelado con los bloques marcados en azul. De esta manera, se obtendrá de manera bastante precisa el flujo de agua en cada momento dependiendo de la temperatura del agua. Con ello, se incorpora un integrador de forma que el resultado sea el agua acumulada.



## 5. Control

De cara a implementar los distintos modelos correspondientes a cada uno de los componentes del sistema de supervivencia, resulta necesario modelar un cuarto elemento y que va a servir de nexo de unión entre ellos. Este elemento es el denominado como controlador lógico. Además de servir de nexo entre los distintos componentes va a interactuar para los diferentes escenarios posibles tomando una serie de decisiones lógicas. El modelo matemático aquí empleado representa un controlador físico que establece dichas decisiones lógicas (algoritmo de control) y/o bien simplemente la conexión eléctrica. En el segundo caso se puede asumir que la batería hace las veces de controlador.

A continuación se analizará la posibilidad de instalar un controlador del primer tipo en función de los resultados obtenidos tras la integración de todo el sistema.

### 5.1. Descripción del control

El modelado de un control se basa en el establecimiento de una serie de premisas lógicas y unas acciones condicionadas por las primeras. Esto es, una serie de condiciones que dan lugar a unas acciones. Para ello se emplea de nuevo el software Matlab/Simulink®, en el que se llamará a una función que establecerá todas las relaciones entre los elementos.

El primer paso antes de programar la función es la elaboración de un diagrama de flujo que contempla las distintas posibilidades (Figura 36).

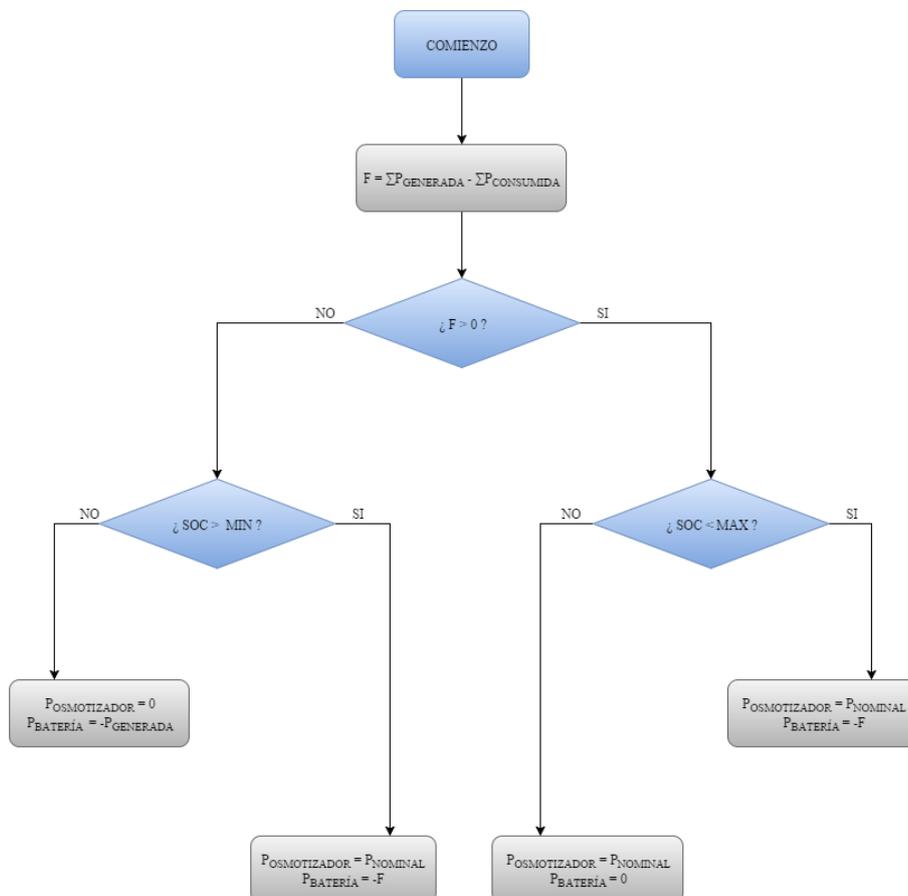


Figura 36: Diagrama de flujo del controlador

Al comienzo del diagrama, se lleva a cabo un balance de energía. Es decir, una resta de la energía generada menos la consumida en el sistema. En el caso que ocupa este trabajo la energía generada corresponde con la potencia que entrega el panel fotovoltaico mientras que la consumida, corresponde con la potencia que reclama el osmotizador.

Además de estas variables, es necesario tener en cuenta el estado de carga (*SOC*) y la potencia de la batería (*POTENCIA<sub>BATERÍA</sub>*). Cabe establecer un estado de carga mínimo para poder dar energía al osmotizador y un máximo, típicamente el 100% de carga. Este último parámetro se deja en forma de variable de tal forma que se pueda decidir si se quiere cargar la batería del todo o dejar de cargar antes.

Nótese que se ha introducido un signo (-) a los valores que tomará la potencia de la batería, esto se debe al criterio elegido para las ecuaciones del modelo de la misma. En el que se interpretan los valores positivos de potencia como descarga y los negativos como carga.

Una vez definidas las variables, surgen tres premisas y cuatro conclusiones. La primera premisa viene tras el balance de energía: ¿Se está produciendo más energía de la consumida, o es al revés?

En caso de que la producción de energía sea inferior a la demanda del osmotizador se dan dos conclusiones en función de si el estado de carga está por encima del mínimo o no: Si hay carga suficiente de batería, se empleará la reserva para alimentar al osmotizador, en caso negativo, no se producirá agua.

En el supuesto de que la producción de energía sea mayor que la demanda, hay que comprobar si la batería está cargada hasta el máximo establecido o no, lo cual da lugar a otras dos posibilidades: si la batería está cargada al máximo, se dará potencia al osmotizador y se desperdiciará energía. En caso de que la batería se encuentre en un estado de carga inferior al máximo, se dará la potencia reclamada al osmotizador y se cargará la batería al mismo tiempo.

### 5.2. Modelado

Una vez se han definido las premisas y conclusiones a través de un diagrama de flujo, se procede a realizar el modelo en Matlab/Simulink®, resultando el siguiente esquema (Figura 37):

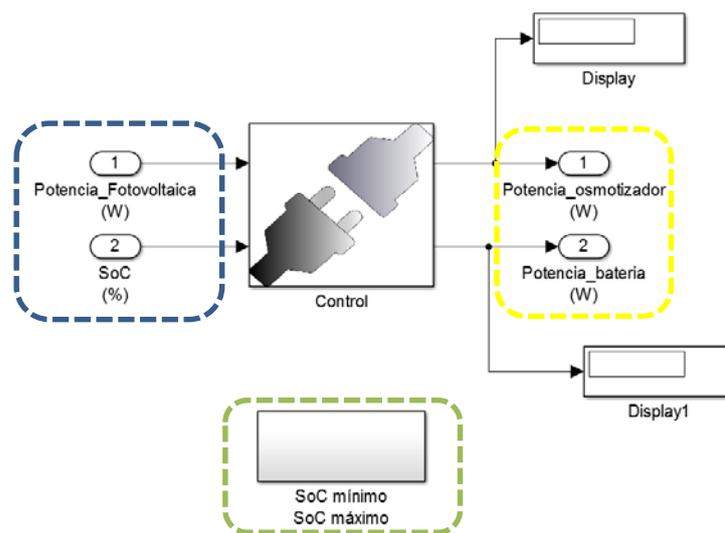


Figura 37 Esquema general del control

Marcadas en línea discontinua azul, se aprecian las entradas de potencia fotovoltaica y estado carga de la batería. Por otra parte, se ha decidido modelar la entrada de estados de carga máximo y mínimo como variables a introducir (dentro del bloque marcado con línea discontinua verde). De tal forma que se pueda variar estos valores en busca de distintos resultados.

A la salida del bloque controlador se encuentran (marcadas en amarillo) las salidas de potencia de la batería y del osmotizador. En la capa inferior se aprecia el contenido del control (Figura 38).

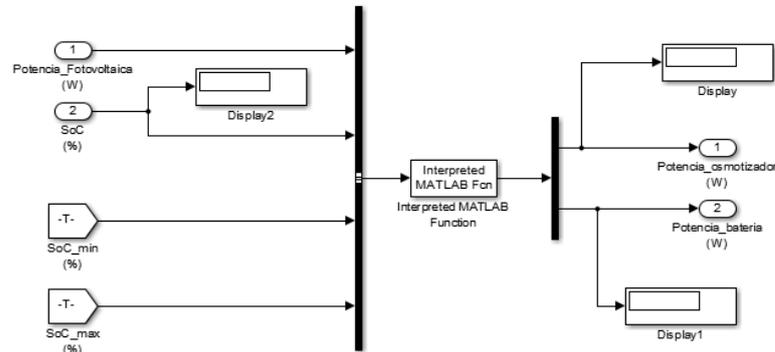


Figura 38: Esquema del control

Este bloque recurre a una función de Matlab® (Figura 39), que será la encargada de establecer propiamente las leyes lógicas (Figura 36) para relacionar todos los componentes.

```
function Salida = control(Potencia_fotovoltaica,SoC,SoC_min,SoC_max)
%CONTROL balance energético
Potencia_osmotizador = 48;
F=Potencia_fotovoltaica - Potencia_osmotizador;

if F>0
    if SoC < SoC_max
        Potencia_osmotizador = 48;
        Potencia_bateria = F;
    else
        Potencia_osmotizador = 48;
        Potencia_bateria = 0;
    end
else
    if SoC > SoC_min
        Potencia_osmotizador = 48;
        Potencia_bateria = F;
    else
        Potencia_osmotizador = 0;
        Potencia_bateria = Potencia_fotovoltaica;
    end
end

Salida = [ Potencia_osmotizador,Potencia_bateria ]
```

Figura 39: Función de control

A partir de este punto se elaborará el montaje de todo el sistema.



## 6. Sistema integrado

Una vez modelados cada uno de los elementos del sistema de supervivencia, se procede a montar el sistema en otro modelo de Matlab/Simulink®.

El esquema final se muestra en la Figura 40. Las entradas se encuentran resaltadas en línea azul, por un lado para la placa, se introducen radiación y temperatura ambiente. Por otro, la temperatura del agua del mar será entrada del osmotizador. Por coherencia de unidades de entrada, a la hora de montar el sistema completo se ha creado un conversor de unidades de tal manera que se introduzca como variable en grados Celsius y entre en el osmotizador como Fahrenheit. Además, se ha incorporado un bloque en la placa fotovoltaica para medir la energía obtenida además de la potencia fotovoltaica.

Las entradas de radiación y temperatura ambiente llaman a sendas matrices que contienen cada una de las dos variables en función del tiempo. En cuanto a la temperatura del agua, no se consideró necesario, pues es un valor generalmente estable para períodos relativamente largos (meses o estaciones). Con lo que se introducirá únicamente un valor para cada simulación.

En el centro del sistema se encuentra el control (marcado en marrón), constituyendo el cerebro que determina las entradas y salidas de potencia. La potencia fotovoltaica, que alimentará a todo el sistema, es entregada por el modelo de la placa (marcada en amarillo).

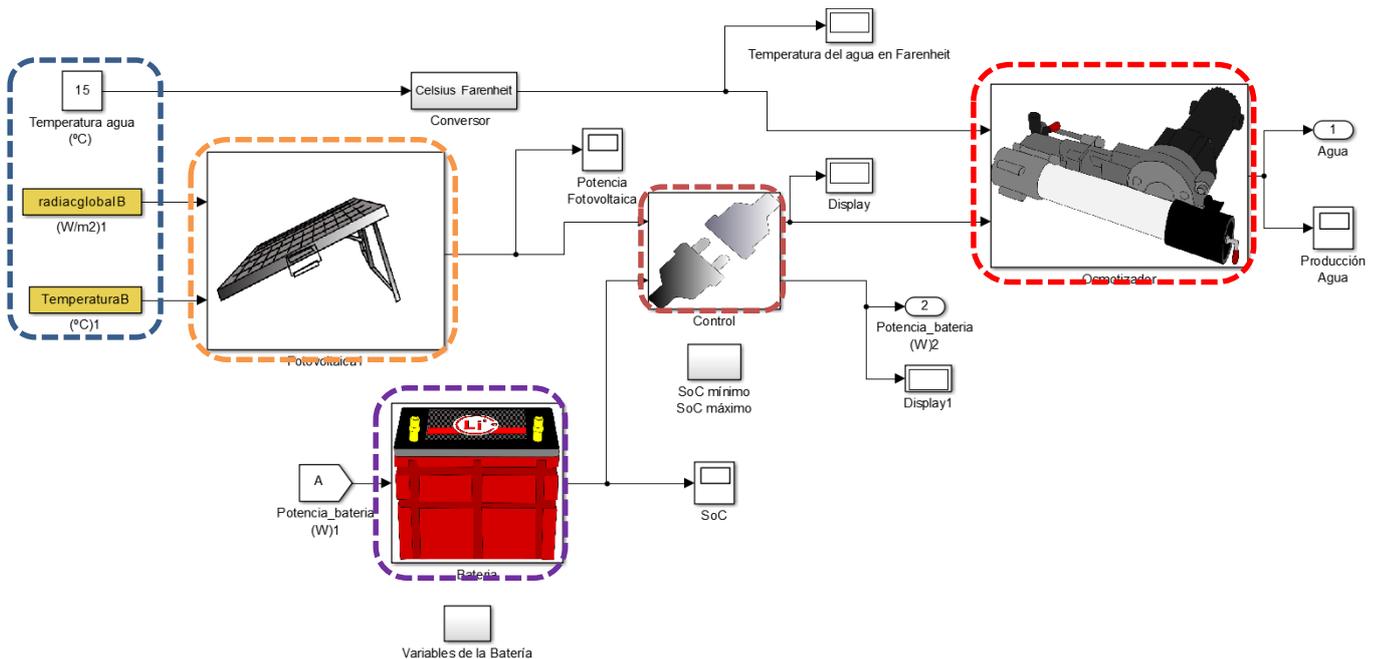


Figura 40: Esquema del sistema

La energía se almacena en la batería (marcada en morado). Es importante reseñar que el modelo de la batería necesita que el control le transmita la potencia que se demanda o que se le proporciona. La salida de la batería hacia el control es su estado de carga. A partir de esto, funciona según lo desarrollado en el apartado 3 de la batería.

Por último, se encuentra el modelo del osmotizador (marcado en rojo), que tomará como entrada la potencia que se le proporciona y la temperatura del agua.



## **SIMULACIONES**



## 1. Introducción de datos

A partir de la radiación efectiva y la temperatura ambiente se calculará la potencia fotovoltaica generada para diferentes periodos de tiempo. Esta potencia circulará hacia el osmotizador y la batería atendiendo a las premisas lógico-matemáticas que han sido establecidas en el control. En este apartado se mostrarán las simulaciones que se han llevado a cabo para el sistema completo objeto de este proyecto y posteriormente se discutirán los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo el estudio, se toman los datos disponibles de una boya de Meteogalicia [34], situada en latitud:  $42^{\circ}10,69'$  N y longitud  $008^{\circ}53,59'$  W, próxima a las islas Cíes, Vigo, en la región de Pontevedra (Figura 41).

La toma de datos comienza en junio de 2012 y continúa durante un año dado que se proporcionan muestras cada diez minutos para los 365 días. Los datos de radiación y temperatura ambiente se toman diez minutales, mientras que para la temperatura del agua se han tomado datos mensuales, por su poca variabilidad.

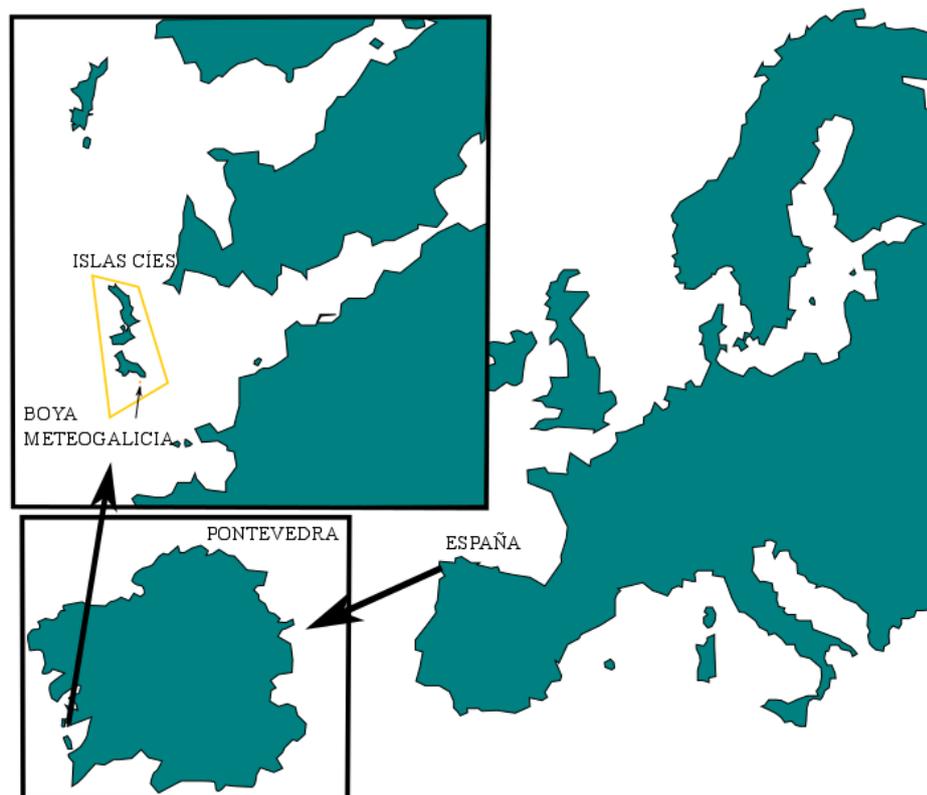
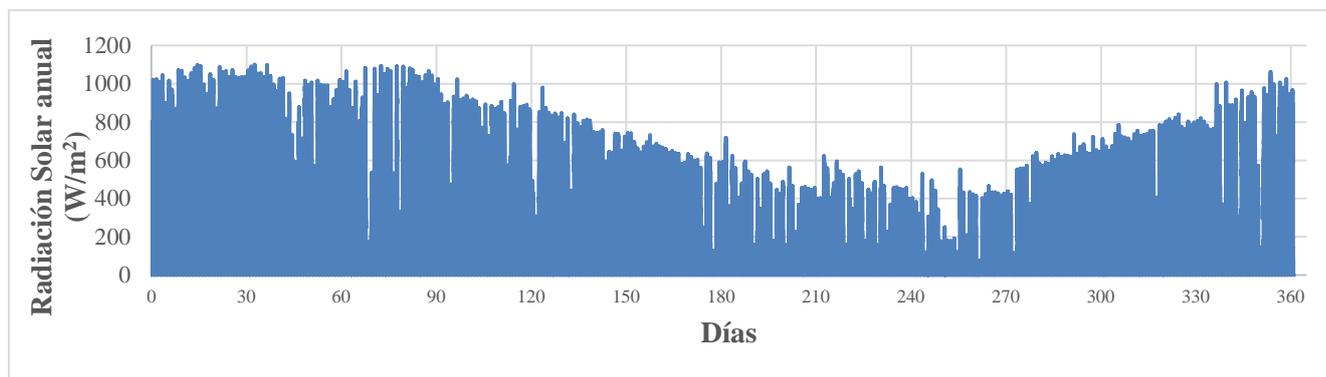


Figura 41: Localización de la boya de Meteogalicia

A continuación (Figura 42) se presentan las gráficas anuales de radiación. La radiación solar incidente depende, como es lógico, de la estación del año por la posición relativa de la Tierra con respecto al Sol, pero también de las condiciones ambientales locales.

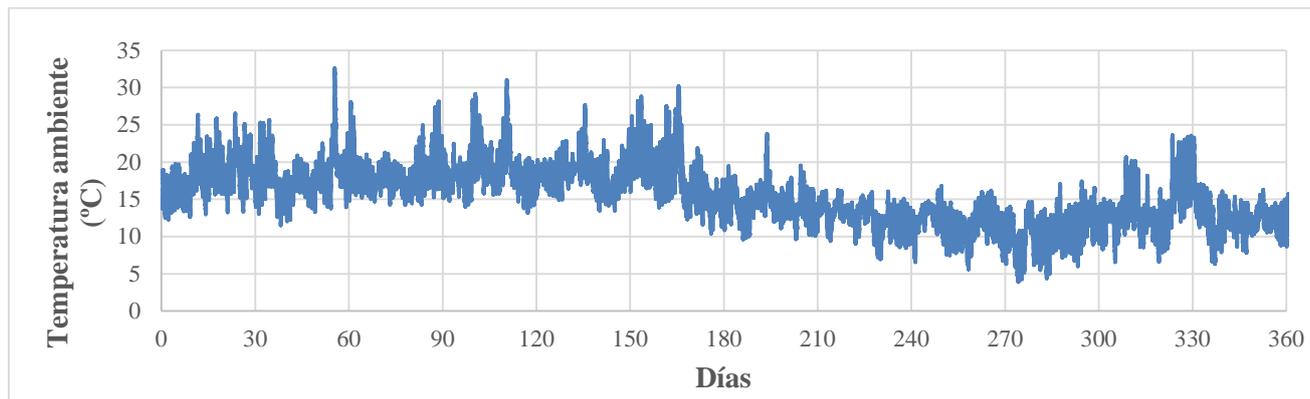
En zonas del Atlántico Norte, como es el caso, la presencia de nubosidad que bloquee la radiación resulta crítica.



**Figura 42: Radiación solar anual (W/m<sup>2</sup>)**

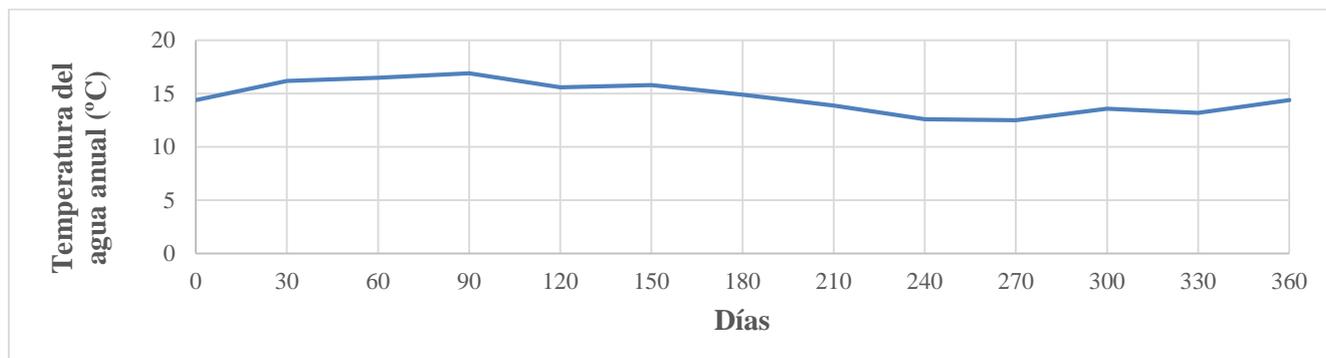
En el invierno tomado como muestra, se aprecia una bajada de la radiación entre los meses de diciembre (día 180) y marzo (día 270), debido a una gran presencia de nubosidad y chubascos durante los mismos, tal y como era de esperar, dada la ubicación de la boya.

En la Figura 43 se muestra como varía la temperatura para esta misma ubicación. La temperatura ambiente sigue, de forma coherente, la tendencia de la radiación según las estaciones. Siendo, como resulta normal en el Hemisferio Norte, mayor durante verano y primavera, bajando a partir del otoño.



**Figura 43: Temperatura ambiente anual (°C)**

Como se puede apreciar en la Figura 44, donde se representa la temperatura del agua, la diferencia máxima de temperatura superficial del mar entre verano e invierno es de tan solo 5°C. El mar se conoce como un excelente regulador de temperatura, esto es debido entre otros factores, a la gran estabilidad de la misma a través de las estaciones.

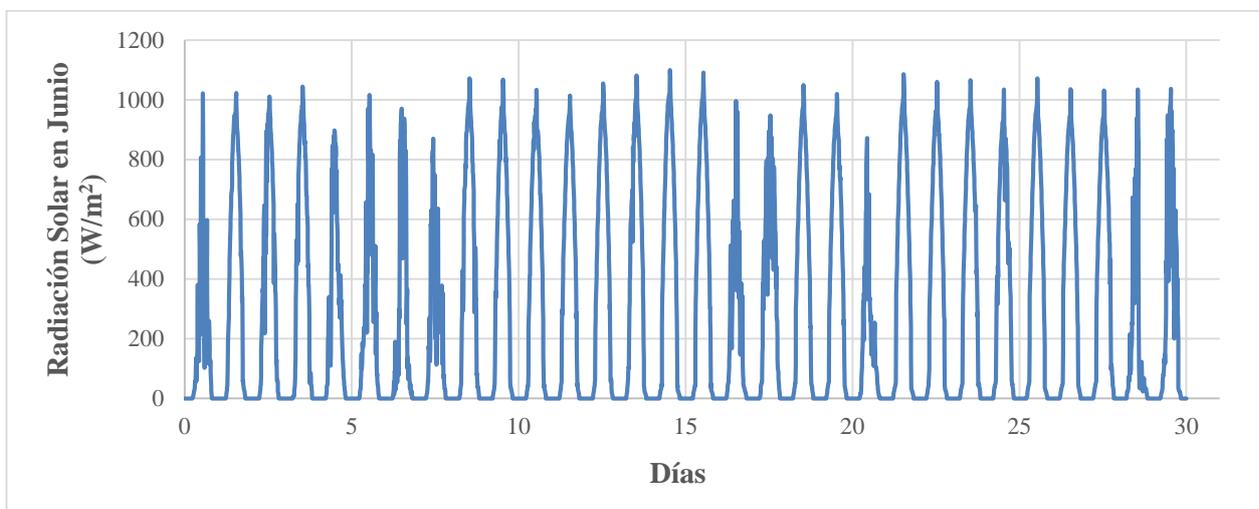


**Figura 44: Temperatura del agua anual (°C)**

Tras llevar a cabo diferentes ensayos, tanto anuales como por meses, se decide presentar a modo de ejemplo los resultados del mes de junio, como muestra del mes con las condiciones más favorables para la producción de agua potable; y enero como mes más desfavorable.

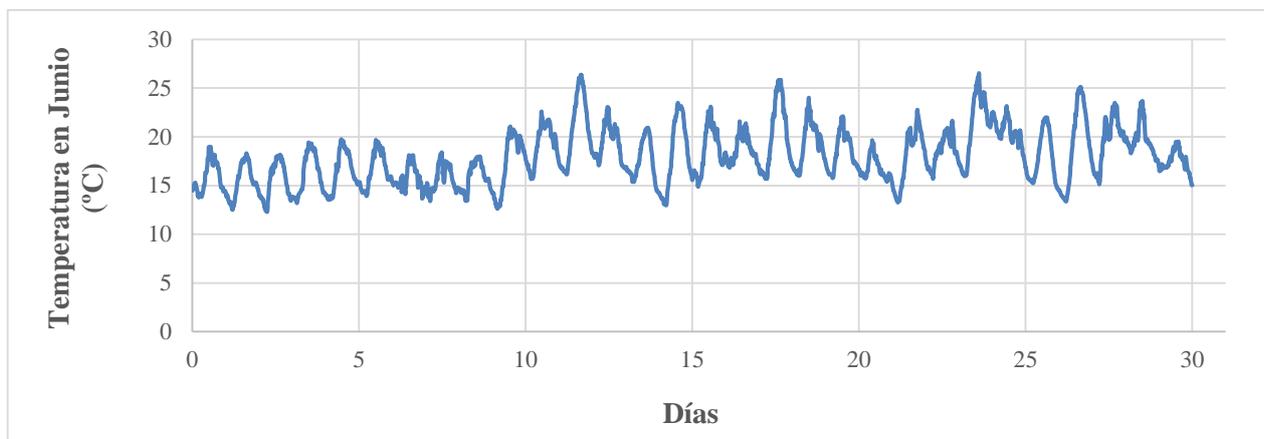
### 1.1. Ensayos en el mes de junio

A la vista de los datos meteorológicos, se ha seleccionado el mes de Junio de 2012 como muestra de condiciones óptimas de radiación incidente y temperaturas tanto ambientales como del agua del mar en su superficie. Por una parte, la radiación solar y la temperatura ambiente que se presentan a continuación en la Figura 45, darán lugar a una buena generación energética. Este gráfico representa claramente dos momentos del día: por una parte, durante el período diurno, se recibe radiación solar, que en casos puntuales supera los  $1000 \text{ W/m}^2$ , este es un dato muy bueno de radiación solar que, por lo general, solo se da en condiciones veraniegas.



**Figura 45: Radiación solar en Junio ( $\text{W/m}^2$ )**

Por otra parte, como resulta lógico, a medida que avanza el día la radiación solar incidente decae hasta ser nula en los períodos nocturnos. Momento en el que la batería pasará a jugar un papel fundamental para continuar con la producción de agua.

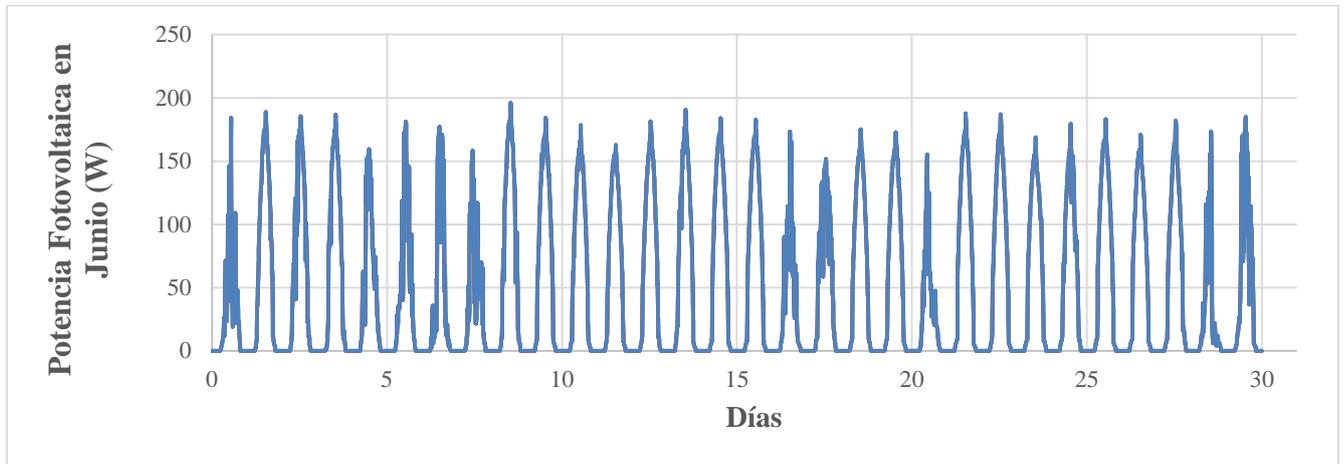


**Figura 46: Temperatura en Junio ( $^{\circ}\text{C}$ )**

En el gráfico superior (Figura 46), se puede apreciar el rango de temperaturas durante el mes de junio. Como se desarrolló en el apartado 2.2 de la Placa fotovoltaica, la temperatura ambiente ideal para

una placa es de 25 °C. Si bien, la temperatura ambiente media no es exactamente esta, la muestra se mueve en valores cercanos a los ideales. Lo cual se traducirá en una buena generación.

Con estas variables de entrada, se recogen los resultados de potencia fotovoltaica que alimentará a la batería y por ende, al osmotizador. Estos datos se recogen a continuación.



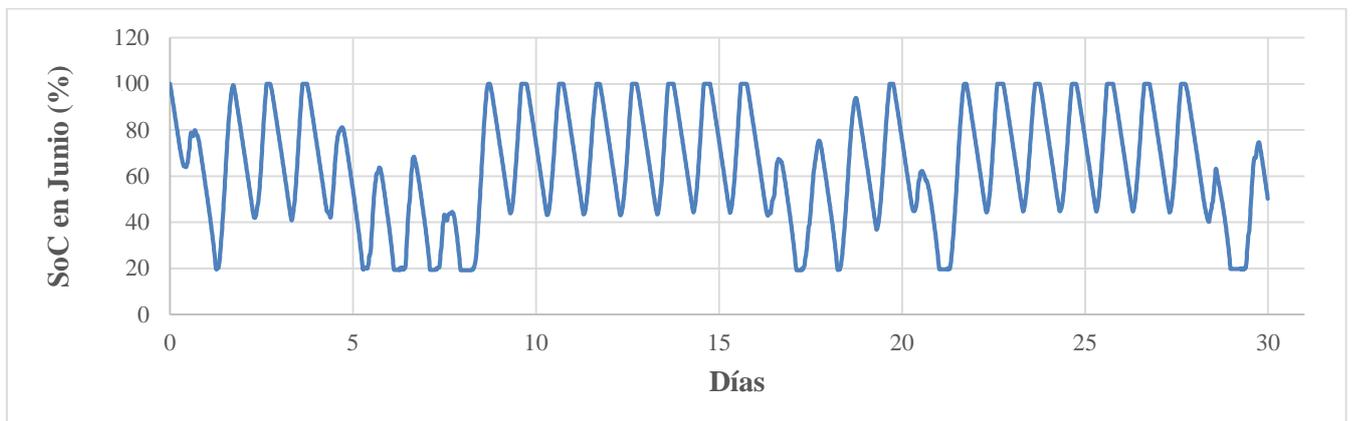
**Figura 47: Potencia fotovoltaica en Junio (W)**

En esta gráfica se muestran datos de potencia en vátios, coherentes con las entradas de radiación y temperatura ya presentadas. La energía total generada para todo este período resulta de 1,18 kWh.

Como se puede observar, los valores de pico de potencia entregada durante el día se mueven entre los 150 y los 200 W. El sistema trabaja con 12 V. En el caso de la batería se cuenta con una intensidad máxima de carga de 30 A, pudiendo cargar con potencias de hasta 360 W esto quiere decir que no se desaprovecharan estos máximos de potencia.

En cambio, el osmotizador trabaja con 12 V y 4 A, lo que supone una potencia de 48 W. De tal manera que en caso de que la batería se encuentre completamente cargada y el osmotizador se alimente directamente de la placa fotovoltaica, se desperdiciará energía.

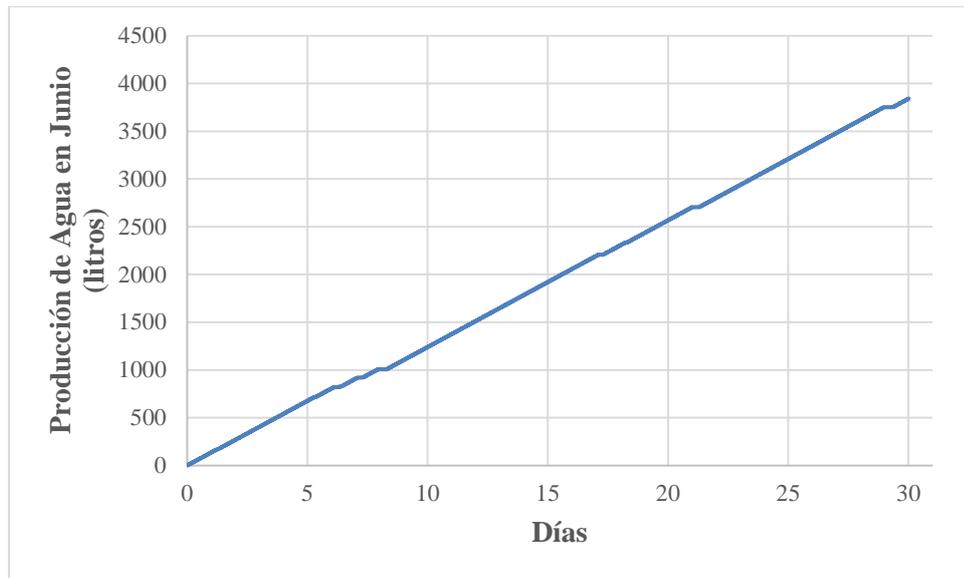
A continuación, en la Figura 48, se muestra la gráfica de estado de carga de la batería con estas entradas.



**Figura 48: SoC en Junio (%)**

La carga de la batería se mantiene por encima del 20% ya que se estableció este valor como *SoC* mínimo en el control por seguridad de la batería. Este valor, puede cambiarse para las distintas simulaciones a criterio del usuario.

Para finalizar, se muestran los resultados de agua potable obtenida con el osmotizador. Tomando 15 grados centígrados como referencia para todo el mes, valor con que se produce el flujo de agua nominal.

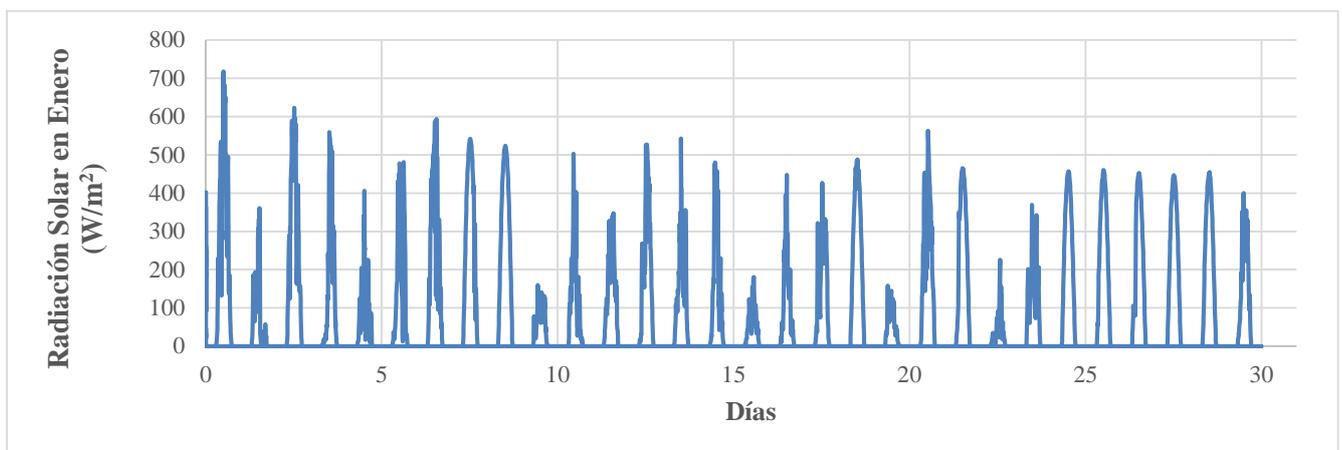


**Figura 49: Producción de agua en Junio (litros)**

La producción de agua resulta una función lineal. La media operando con el osmotizador las 24 horas es de unos 120 litros. A razón de 12 personas en la balsa, da lugar a 10 litros de agua potable por persona al día. Los resultados se muestran por tanto muy satisfactorios.

### 1.2. Ensayos en el mes de enero

Se selecciona enero como prototipo de mes con malas condiciones meteorológicas para la generación de energía. La posición relativa de la Tierra y el Sol, en el afelio, o posición más alejada, además de la presencia de nubosidad y borrascas en la zona, dan lugar a una menor radiación solar y temperaturas ambientales más bajas. Todo ello se traduce en una menor potencia fotovoltaica generada. A continuación se muestran los datos de entrada para la placa (Figura 50 y Figura 51).



**Figura 50: Radiación solar en Enero (W/m²)**

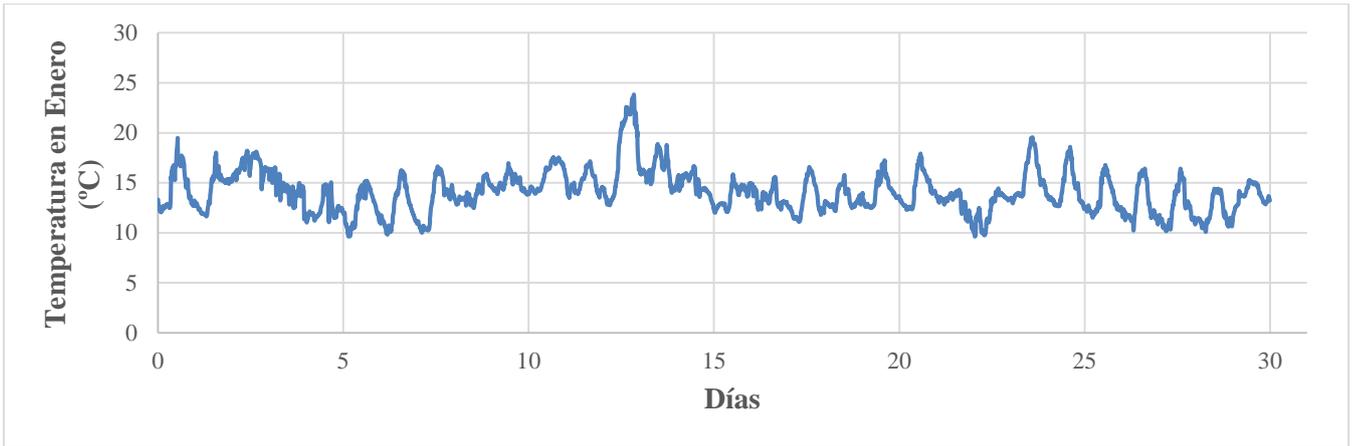


Figura 51: Temperatura en Enero (°C)

Con estas entradas, se genera la potencia que se detalla a continuación (Figura 52).

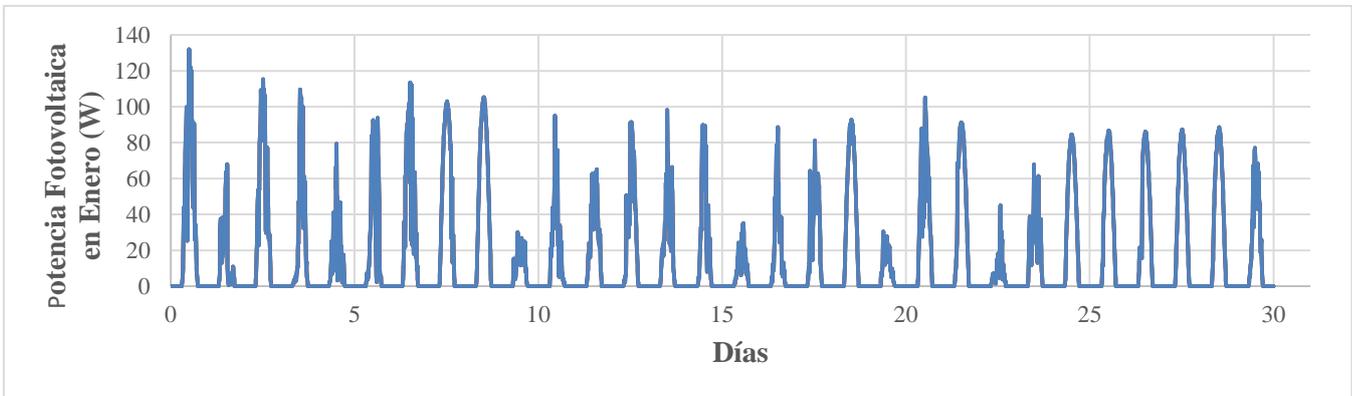


Figura 52: Potencia Fotovoltaica en Enero (W)

Si se comparan estos resultados con los obtenidos para el mes de junio, se aprecia una considerable disminución de potencia fotovoltaica. La energía en este caso resulta de 387 Wh Que dará lugar a un flujo de agua menor.

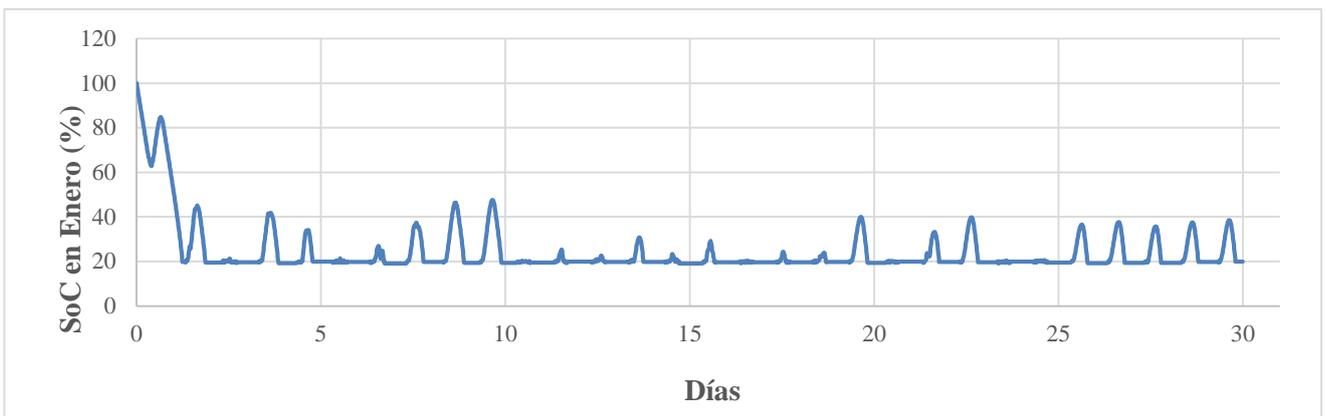
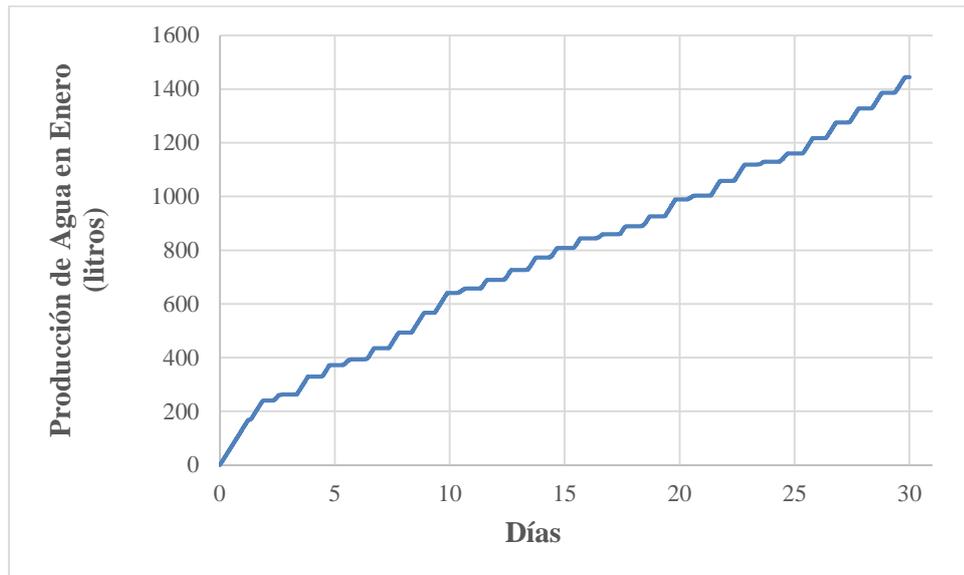


Figura 53: SoC en Enero (%)

Partiendo de la batería cargada, como se puede interpretar en la Figura 53, resulta notoria la disminución del estado de carga medio con respecto a la situación más favorable. En estas condiciones se hace más evidente la utilidad de la batería para una mayor producción de agua.



**Figura 54: Producción de Agua en Enero (litros)**

Con todo lo anterior, se llega a obtener el gráfico superior (Figura 54). Tomando como temperatura del agua 12 grados centígrados. La generación de agua potable decae visiblemente hasta una media de 46 litros diarios lo que se traduce en casi 4 litros de agua por tripulante de la embarcación salvavidas.



## 2. Modelos alternativos

A la vista de los resultados detallados en el apartado anterior, se decide llevar a cabo dos experimentos más. Uno en el que se reducirán las dimensiones de la placa fotovoltaica y la batería. Y otro en el que se modelará el mismo sistema sin contar con batería, de forma que la producción de agua dependa únicamente de la placa solar. A fin de no redundar en resultados, los que se presentan a continuación serán los del mes de enero (condiciones más desfavorables de la muestra) para ambos casos.

### 2.1. Modelo con dimensiones reducidas

Para reducir el modelo, se deciden llevar a cabo dos modificaciones sobre el original. Por una parte, se reducirá el número de paneles fotovoltaicos de 2 a 1. Esto se traduce en la entrega de la mitad de potencia fotovoltaica.

Por otra parte, se selecciona una batería con dimensiones más reducidas. Lo cual implica una disminución de la capacidad. Con esto en cuenta, el modelo fotovoltaico queda presentado, en su capa más baja, como se muestra en la Figura 55.

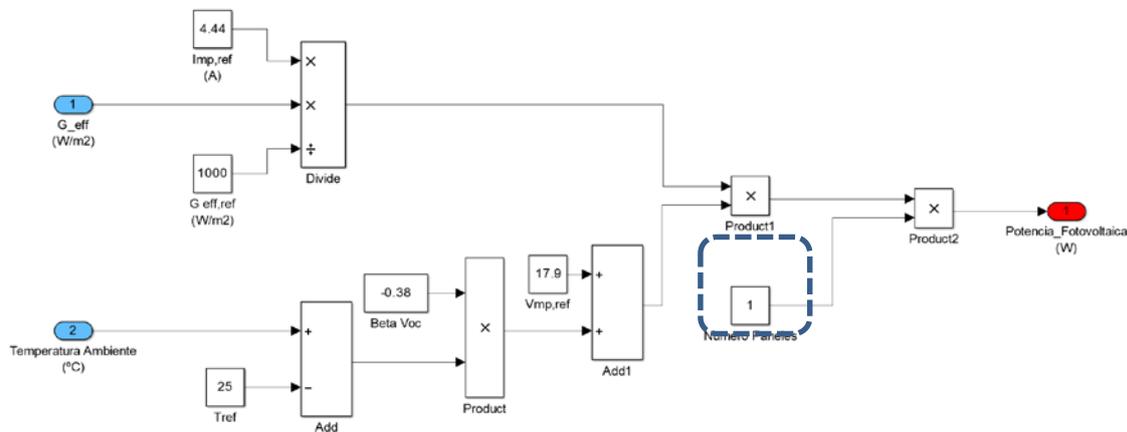


Figura 55: Esquema de 1 panel fotovoltaico

El cambio en este modelo es menor, pues solo requiere cambiar el valor del número de paneles (resaltado en línea discontinua azul). En relación al cambio de batería, se ha seleccionado una notoriamente más pequeña. Se ha decidido cambiar de fabricante, pues el de la batería original no trabaja con baterías de litio con menor capacidad de 45 Ah.

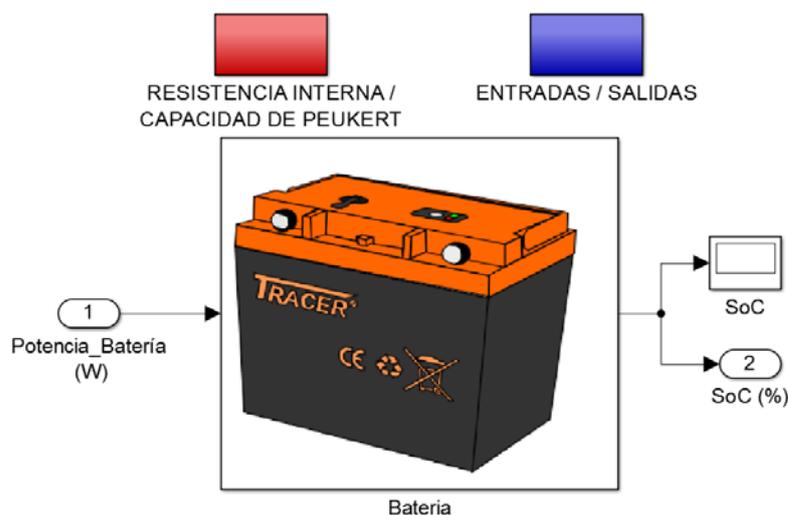
De este modo, se selecciona la TRACER LiFePO4 Battery Pack [35], con las siguientes especificaciones:

<i>Características</i>	<i>Valores</i>
Capacidad (Ah)	16
Ciclos de vida (ciclos)	1400
Capacidad máxima de carga continua de batería (A)	10
Capacidad máxima de descarga continua de batería (A)	30
Capacidad máxima de descarga de pico de batería (A en 1 s)	90
Rango de temperaturas de carga (°C)	De 0 a +40
Rango de temperaturas de descarga (°C)	De -10 a +60
Tensión Nominal (V)	12,8
Resistencia Interna ( $\Omega$ )	< 0,04
Dimensiones (L x W x H) mm	165 x 110 x 125
Peso (kg)	2

**Tabla 4: TRACER LiFePO4 Battery Pack**

Si se comparan las especificaciones de las dos baterías, las dimensiones se reducen notoriamente y el peso baja de 12,25 kg a 2 kg. A cambio, la capacidad de la batería se reduce a una cuarta parte de la original, de 65Ah a 16 Ah. Esta batería es resistente al agua y cuenta con un display led que indica el estado de carga.

A continuación se muestra el esquema del modelo en Matlab/Simulink® (Figura 56).



**Figura 56: Esquema de la Batería**

Para llevar a cabo la simulación del nuevo modelo, hay que cambiar las entradas proporcionadas por el propio fabricante. Además de la ecuación de la tensión de circuito abierto en función de la profundidad de descarga. Ya que la batería original empleaba la ecuación de Ion-Litio y la actual emplea la ecuación de Litio Hierro Fosfato. La obtención de la ecuación se realiza de forma análoga a como se detalla en el apartado 3.3.1 [26]. Quedando una ecuación que puede modelarse como función de Matlab (Figura 57):

```
function E_oc=open_circuit_voltage_LiFePO4(SoC,N)
DoD=1-SoC;

if DoD<=0
    DoD=0;
elseif DoD>1
    DoD=1;
end

p1 = 11.47 ;
p2 = -51.21 ;
p3 = 82.38 ;
p4 = -63.02 ;
p5 = 24.31 ;
p6 = -4.614 ;
p7 = 3.723 ;

E_oc = (p1*DoD^6 + p2*DoD^5 + p3*DoD^4 + p4*DoD^3 + p5*DoD^2 + p6*DoD + p7)*N;
```

Figura 57: Tensión de circuito abierto para batería de LiFePO<sub>4</sub> en Matlab®

A partir de este punto se llevan a cabo diferentes ensayos con los mismos datos e intervalos que se han empleado para el primer modelo. Con estos datos, la potencia fotovoltaica obtenida para el mes de enero resulta la mitad que para el modelo con dos placas (Figura 58). Esto se debe a que, como se ve en la Figura 55, el número de paneles es directamente proporcional a la potencia fotovoltaica obtenida.

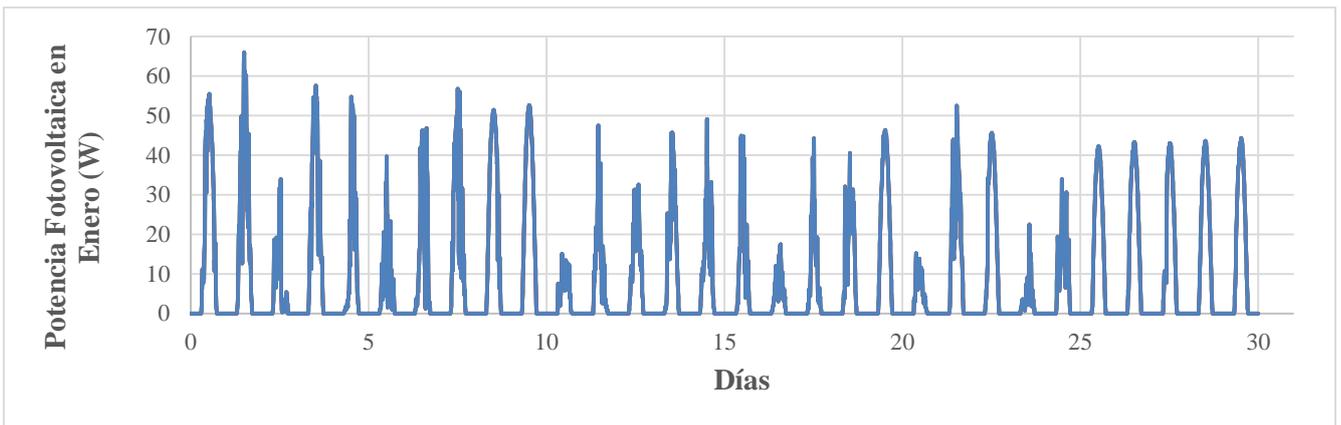


Figura 58: Potencia Fotovoltaica en Enero (W)

De la reducción en la energía entregada al sistema, ahora de 193 vatios hora, se deriva un mayor uso de la batería y un estado de carga medio mucho menor, como se aprecia en el siguiente gráfico (Figura 59). Conviene recordar que el estado de carga mínimo sigue establecido en el 20%.

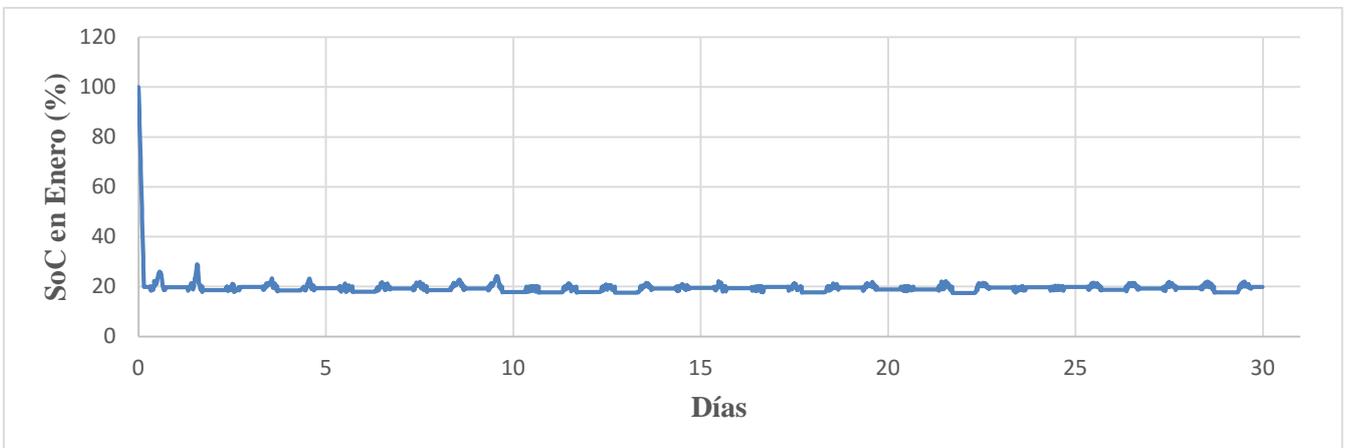
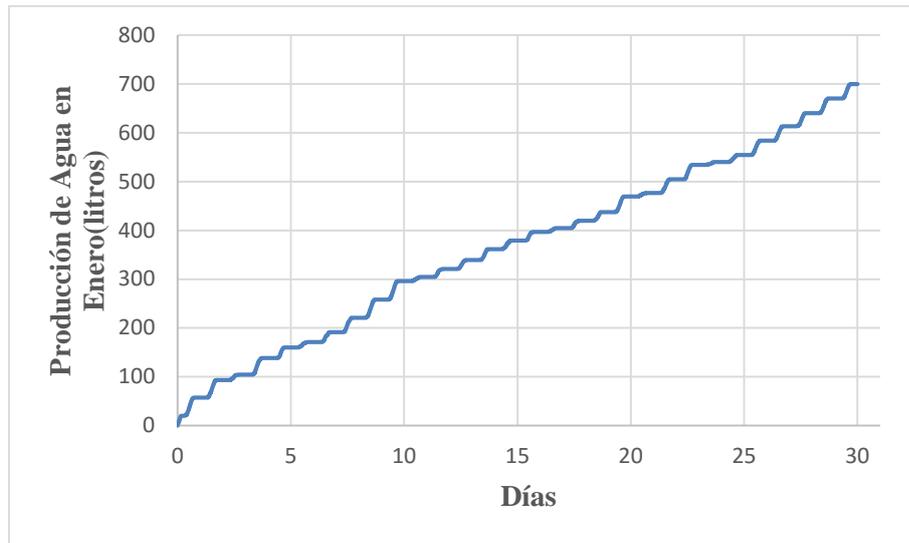


Figura 59: SoC en Enero (%)

Todo ello tiene un impacto en la producción de agua, como se aprecia en el siguiente gráfico (Figura 60). En el que aumentan los intervalos de inactividad del osmotizador.



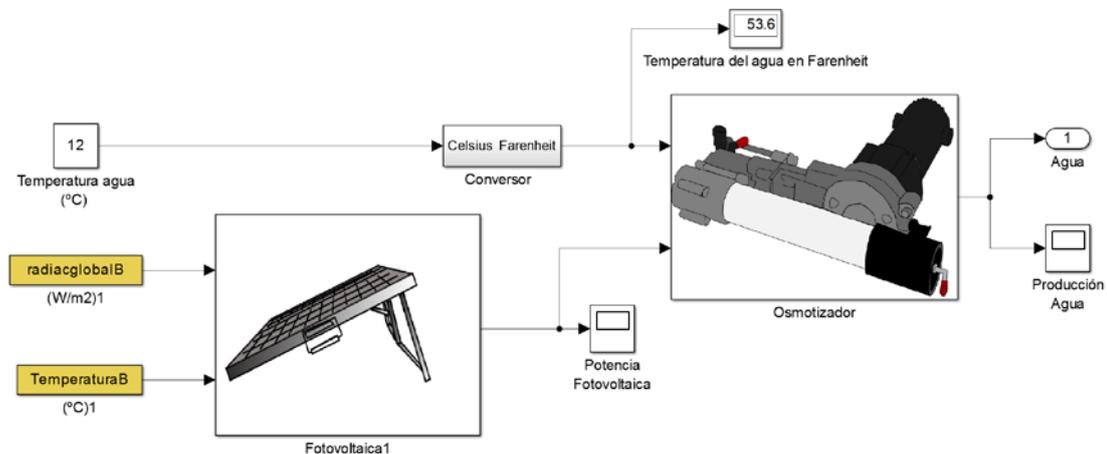
**Figura 60: Producción de agua en Enero (litros)**

Estos resultados se traducen en una producción media de 23 litros de agua al día para una balsa de 12 personas. Algo menos de 2 litros de agua por tripulante. Este resultado sigue siendo el doble de la ración de agua recomendada por Frank Golden y Michael Tipton en su libro [4]. Lo cual indica un resultado muy bueno incluso con esta disminución considerable del sistema.

## 2.2. Modelo sin batería

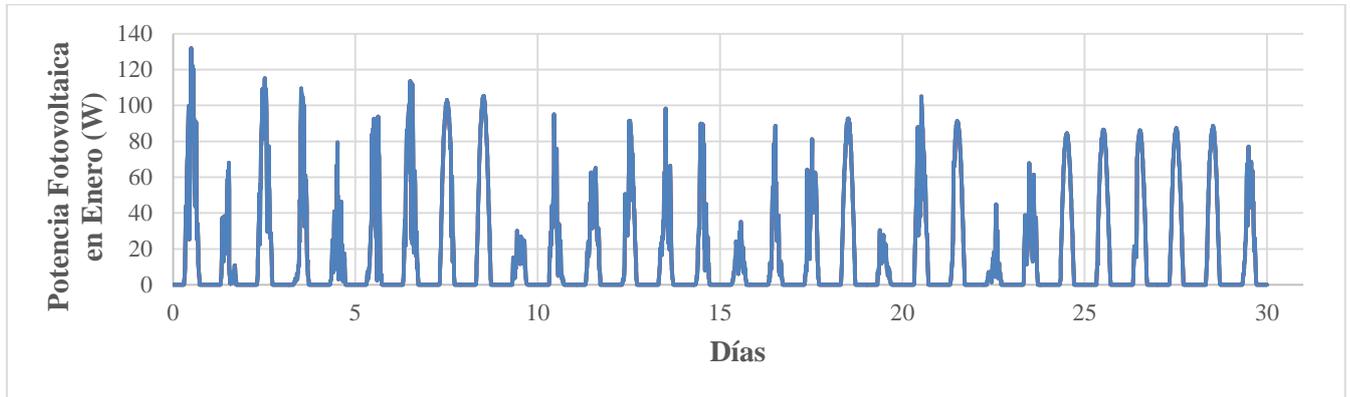
Para terminar los ensayos, se decide ir un paso más allá. Tomando como ejemplo las tesis doctorales de D. Francisco Javier García Latorre [32] y de Murray Thomson [6], en las que ambos doctores afirman que no son necesarias baterías para un sistema de osmosis basado en energía fotovoltaica en tierra, se pasa a comprobar si esta idea es extrapolable al presente sistema en la mar.

Para ello, no hay más que suprimir el modelo de la batería en Matlab/Simulink®. Tomando de nuevo la misma situación ambiental y geográfica anterior, se conectan los dos paneles fotovoltaicos directamente a la entrada del osmotizador. Resultando el diagrama que se presenta en la Figura 61.



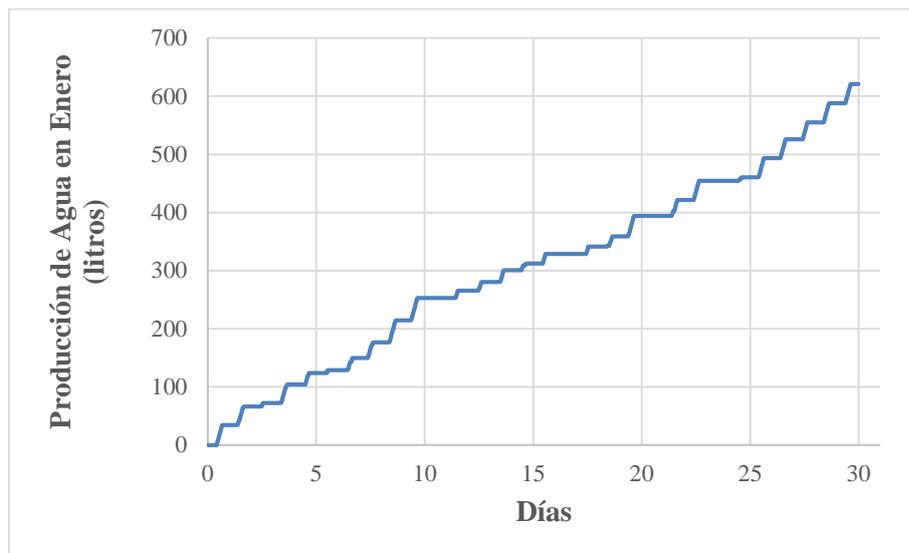
**Figura 61: Esquema general del modelo sin batería**

A partir de las condiciones ya especificadas, la producción energética en forma de potencia entregada por dos paneles es la siguiente (Figura 62).



**Figura 62: Potencia fotovoltaica en Enero (W)**

Como resulta claro, es la misma que para el modelo original, dado que emplea la misma configuración de paneles, así como la energía generada: 387 vatios hora. El flujo de agua potable en este caso, solo se produce si la potencia fotovoltaica que entrega la placa supera el consumo del osmotizador (48W). Con ello, resulta la siguiente Figura 63.



**Figura 63: Producción de agua en Enero (litros)**

De los presentados, este es el caso con menor producción de agua, unos 20 litros de agua al día de media. Lo cual continúa siendo una ración diaria media aceptable por persona (algo más de 1,5 litros). No obstante, si se mira con mayor detenimiento la gráfica, el flujo es mucho más inestable y habría días en los que la producción sería nula. Se ha llevado a cabo un último ensayo con una sola placa fotovoltaica. La producción cae considerablemente, por debajo de la recomendada. Por lo cual se descarta este caso.



### 3. Evaluación de resultados

De cara a la evaluación de los resultados, conviene recordar por qué se eligió cada opción y en qué medida cumple con las expectativas.

Por una parte, el modelo originalmente propuesto, emplea dos placas fotovoltaicas con una potencia nominal coherente con la demanda del resto de elementos. Según el manual del osmotizador objeto de estudio [13], la batería a emplear debe contar con una capacidad no inferior a 60 Ah. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, esta opción parece estar sobredimensionada. No obstante, se presentan dos ideas de manera paralela: por una parte, esta capacidad garantiza la producción de agua aun cuando las condiciones de radiación sean malas. Se ha demostrado que en días en los que la radiación es baja, la batería se continúa cargando para luego producir agua de una manera más continua. Teniendo esto en cuenta, este sistema ofrece mayor fiabilidad si en lugar de las 24 horas, se decide usar en intervalos de tiempo más cortos. Además, este sobredimensionamiento puede ser aprovechado como una oportunidad para alimentar otros equipos electrónicos como una radiobaliza o luces de bajo consumo.

En cuanto al sistema de dimensiones reducidas (1 sola placa y batería de 16Ah), se puede decir que es el sistema más útil atendiendo únicamente al punto de vista de producción de agua potable. Ya que genera la mitad de agua con un tercio del peso de los equipos. Este sistema es más eficiente, aunque no ofrece tantas garantías de producción continua de agua con malas condiciones meteorológicas.

Por último, se evalúa el sistema sin baterías. Este sistema cuenta con la gran ventaja de reducción en equipamiento con los consiguientes ahorros no solo económicos, sino de espacio y carga de trabajo al personal que deberá encargarse de cargar periódicamente las baterías a bordo y de cambiarlas cuando terminen sus ciclos de vida. No obstante, esta idea cuenta con el aspecto negativo de la discontinuidad en el flujo de agua potable. Ya que tiene una dependencia directa de las condiciones de radiación, y se expone a una producción nula en caso de mal tiempo.

A partir de lo expuesto, se evalúan los resultados con objeto de cuantificar los puntos fuertes y débiles de cada una de las propuestas. Para ello servirá de ayuda una tabla comparativa en la que se enfrentaran las propuestas (Tabla 5). En ella, se establecen las dimensiones, el peso la potencia fotovoltaica y el agua generada con ella. Además se contempla un último factor, la posibilidad de emplear parte de la potencia generada para mejorar el sistema con otros equipos.

	<i>2 Placas fotovoltaicas, batería de 65 Ah</i>		<i>1 Placa fotovoltaica, batería de 16 Ah</i>		<i>2 Placas fotovoltaicas, sin batería</i>	
Peso de la batería / Dimensiones (L x W x H) mm	12,25 kg	304 x 170 x 410	2 kg	165 x 110 x 125	No	
Peso de la placa / Dimensiones (L x W x H) mm	21,4 kg	1110×1080×140	10,7 kg	555×540×70	21,4 kg	1110×1080×140
Peso total (batería + placa)	33,65 kg		12,7 kg		21,4 kg	
Potencia fotovoltaica generada nominal	160 W		80 W		160 W	
Producción de agua por persona en 24h (enero)	4 L		2 L		1,5 L	
Posibilidad de alimentar otros equipos	Si		No		No	

**Tabla 5: Comparativa de modelos propuestos**

La posibilidad de alimentar otros equipos, es entendida como el empleo de parte de la energía para otros usos: posibilidad de instalación de radiobalizas, teléfono satélite u otros aparatos. La razón por la cual se entiende que sólo el sistema con más producción de agua podría soportar esta idea, es básicamente su capacidad de almacenamiento de energía. La batería de 65 Ah tiene una capacidad más que suficiente para esta labor mientras que una de 16 Ah, no debería emplearse para más usos. En la opción sin batería, no se contempla la posibilidad, no por falta de potencia generada, sino por la inestabilidad en el servicio que supone no tener ningún elemento que almacene energía. Si bien para la generación de agua puede permitirse cierta irregularidad, no es así para otros aparatos electrónicos.

## **CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS**



## 1. Conclusiones

Atendiendo a los resultados que se han ido presentando a lo largo de este trabajo, se considera cumplido el objetivo de demostración de la viabilidad del sistema aquí presentado, tanto técnica como energética.

En primer lugar, en relación al diseño del sistema, ha quedado demostrada la compatibilidad dimensional de los elementos, así como las distintas opciones de posicionamiento para garantizar la máxima radiación incidente. Asegurando así la viabilidad técnica de cara a la implementación del sistema de purificación de agua mediante ósmosis inversa y paneles fotovoltaicos aplicado a una balsa salvavidas.

En segundo lugar, tras el modelado de los sistemas de forma individual, se ha conseguido integrar cada uno de ellos en un modelo global funcional. Este modelo ha permitido el estudio del sistema completo para distintas condiciones ambientales.

Finalmente, se han realizado simulaciones, para diferentes configuraciones y una ubicación real para un caso de naufragio. A partir de los datos de radiación y temperatura reales de esta ubicación, se han obtenido resultados óptimos en cuanto a la producción de agua del sistema aquí presentado.

## 2. Líneas futuras

El modelado del osmotizador se presenta como un método fiable y realista, una línea de trabajo futura muy interesante podría ser el diseño de un modelo matemático más pormenorizado. Esto es, llevar a cabo el modelado de cada uno de los elementos que componen un osmotizador de este tipo. Para ello, dado el hermetismo de las compañías fabricantes de osmotizadores, sería interesante reconstruir el desalinizador a partir de cada uno de sus elementos por separado. Además, siguiendo el ejemplo que sientan trabajos como el de Murray Thomson [6], podría construirse un osmotizador para llevar a cabo ensayos de laboratorio a partir de las conclusiones obtenidas del software.

Por otra parte, se estima que una manera de reducir el espacio necesario para la estiba de la placa solar, sería el empleo de células amorfas en lugar de monocristalinas. Esta tecnología es menos eficiente en términos energéticos y su simulación resulta más compleja desde un punto de vista matemático. No obstante, esta tecnología emplea materiales flexibles que permiten el enrollado de la placa como si de una esterilla se tratase, lo cual simplificaría su almacenaje, permitiendo incluso su estiba dentro del propio bidón contenedor de la balsa.

Otra línea futura interesante podría ser la investigación de compatibilidad energética del desalinizador con otros elementos como luces, radiobalizas u otros componentes, que aporten más garantías de supervivencia al sistema.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. J. J. J. LauraChekli, «A comprehensive review of hybrid forward osmosis systems,» *Journal of Membrane Science*, 2015.
- [2] F. B. Q. A.-N. Hazim Qiblawey, «Performance of reverse osmosis pilot plant powered by Photovoltaic in Jordan,» *Renewable Energy an international Journal*, 2010.
- [3] R. W. A. A. S. M. Z. S. D. Amy M. Bilton, «On the feasibility of community-scale photovoltaic-powered reverse osmosis,» *Renewable Energy al international Journal*, 2010.
- [4] M. T. Frank Golden, *The Essentials of Sea Survival*, Human Kinetics, 2002.
- [5] «Guidelines for Drinking-water Quality, Fourth Edition,» World Health Organisation, 2011.
- [6] A. M. Thomson, *Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries*, Loughborough University, 2003.
- [7] M. i. o. technology, «Field and Space Robotics Laboratory,» Department of Mechanical Engineering, 1995-2002. [En línea]. Available: <http://robots.mit.edu/projects/KFUPM/index.html>. [Último acceso: 28 Febrero 2016].
- [8] Katadyn, *KATADYN SURVIVOR 06\* - The world's smallest desalinator - User's Manual*.
- [9] *SOLAS: Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar*, 1974.
- [10] S. Group, «Survitec/Zodiac,» Survitec/Zodiac, [En línea]. Available: <http://www.surviteczodiac.com/>. [Último acceso: 20 diciembre 2015].
- [11] «www.eco-worthy.com,» eco-worthy, [En línea]. Available: [www.eco-worthy.com](http://www.eco-worthy.com). [Último acceso: 25 enero 2015].
- [12] L. Batteries, *12V65A G31EXT CTRL200 Data Sheet*.
- [13] K. P. Inc, *PowerSurvivor™ 40E Owner's Manual*.
- [14] J. D. B. (. Xavier García Casals (IIT), «Renovables 2050,» Greenpeace, 2005.
- [15] S. H. Antonio Luque, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, John Wiley & Sons, 2011.
- [16] J. Alonso, A. Fernández, C. Jiménez, A. Lecuona, F. Mallado, J. Plaza, V. Ramos y G. Sala, «Energía Solar Fotovoltaica,» Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, Madrid, 2002.
- [17] T. M. L. C. Augustin McEvoy, *Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications*, Academic Press, 2011.
- [18] C. K. S. B. W. a. D. J. Livermore, «Photovoltaic Array Performance Model,» Sandia National Laboratories, 2002.

- [19] W. DE SOTO, Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance., 2004.
- [20] N. I. o. S. a. Technologies, «[www.nist.gov](http://www.nist.gov),» U.S. Department of Commerce, 2010. [En línea]. Available: [www.nist.gov](http://www.nist.gov). [Último acceso: 15 enero 2016].
- [21] J. S. S. Geoffrey T. Klise, Models Used to Assess the Performance of Photovoltaic Systems, Sandia Reports, 2009.
- [22] W. A. B. John A. Duffie, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1991.
- [23] C. V. Calahorro, Química general. Introducción a la Química Teórica, Universidad de Salamanca, 1995.
- [24] L. J. Malone, Introducción a la química, Limusa S.A., 2004.
- [25] G.-A. N. Christian Julien, Solid State Batteries: Materials Design and Optimization, Springer Science & Business Media, 2013.
- [26] T. B. R. David Linden, Handook of Batteries, McGraw-Hill, 2002.
- [27] D. Andrea, Battery Management Systems for Large Lithium-ion Battery Packs, Artech House, 2010.
- [28] D. G. Hyams, «Curve Expert,» 2013. [En línea]. Available: <http://www.curveexpert.net/>. [Último acceso: 15 Febrero 2015].
- [29] Diseños y Soluciones Sostenibles DSS.S.A., Osmosis Inversa (RO), Diseños y Soluciones Sostenibles DSS.S.A..
- [30] A. Hernández, Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa, Editum, 1990.
- [31] A. M. Thomson, «Reverse-Osmosis Desalination of Seawater Powered by Photovoltaics Without Batteries,» Loughborough University, 2003.
- [32] F. J. García Latorre, Análisis y Simulación de la Tecnología de Osmosis Inversa con Fuentes Energéticas No Convecionales, Las Palmas de Gran Canaria: Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2012.
- [33] H. R. Osmosis, Horizon Seafari Mini 170, 350, 550 and 750 Owner's Manual.
- [34] C. d. M. A. e. O. d. Territorio, «<http://www.meteogalicia.es/>,» MeteoGalicia - Consellería de Medio Ambiente e Ordenación do Territorio, 2012. [En línea]. Available: <http://www2.meteogalicia.es/galego/observacion/plataformas/platHistorico.asp?Nest=15002&x=67&y=106&tipo=1#>. [Último acceso: 28 Febrero 2015].
- [35] Tracer, 12v 16Ah LiFePO4 Battery Pack Data Sheet, Deben Group Industries Ltd.
- [36] M. Stopford, Maritime Economics, Psychology Press, 1997.
- [37] P. C. D. H. S. H. L. J. Richard Bulliet, The Earth and Its Peoples, Cengage Learning, 2010.
- [38] M. A. M. Carlos Martínez Shaw, España en El Comercio Marítimo Internacional, Editorial UNED, 2010.

## **ANEXO I: PLANOS DE LOS COMPONENTES**



**Contenido:**

- Plano 1: Placa fotovoltaica.
- Plano 2: Batería.
- Plano 3: Balsa salvavidas.



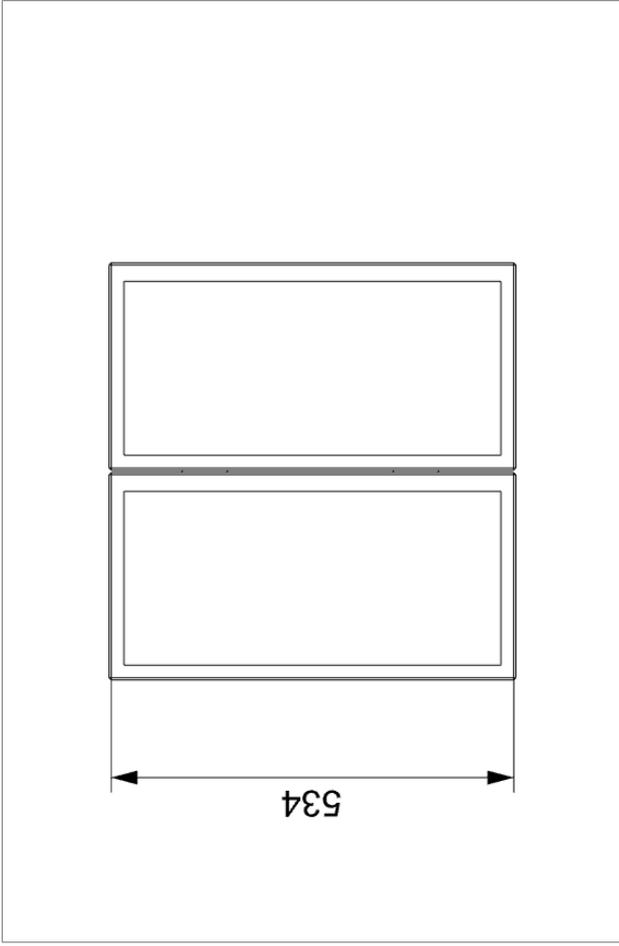
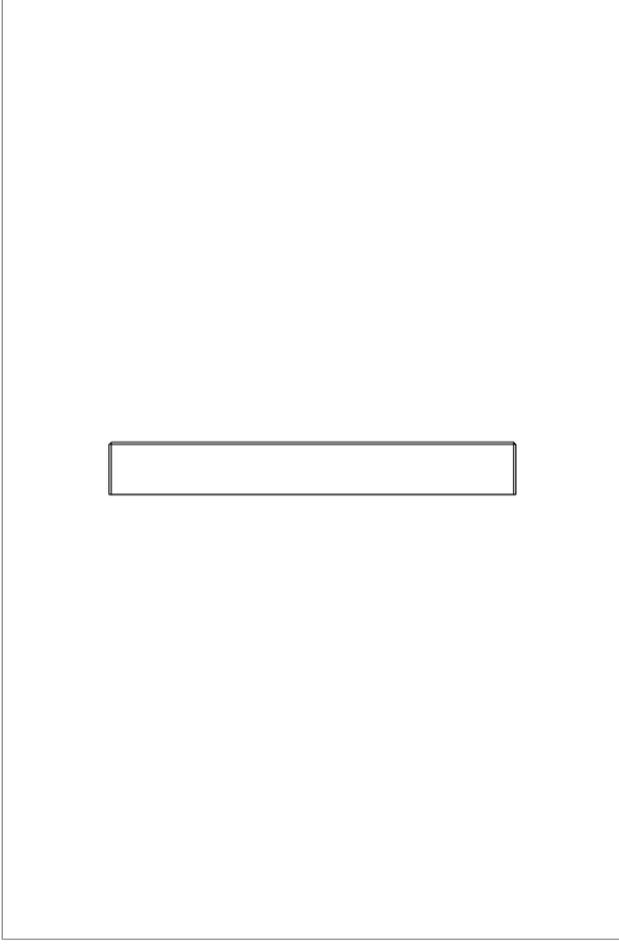
4

3

2

1

A



A

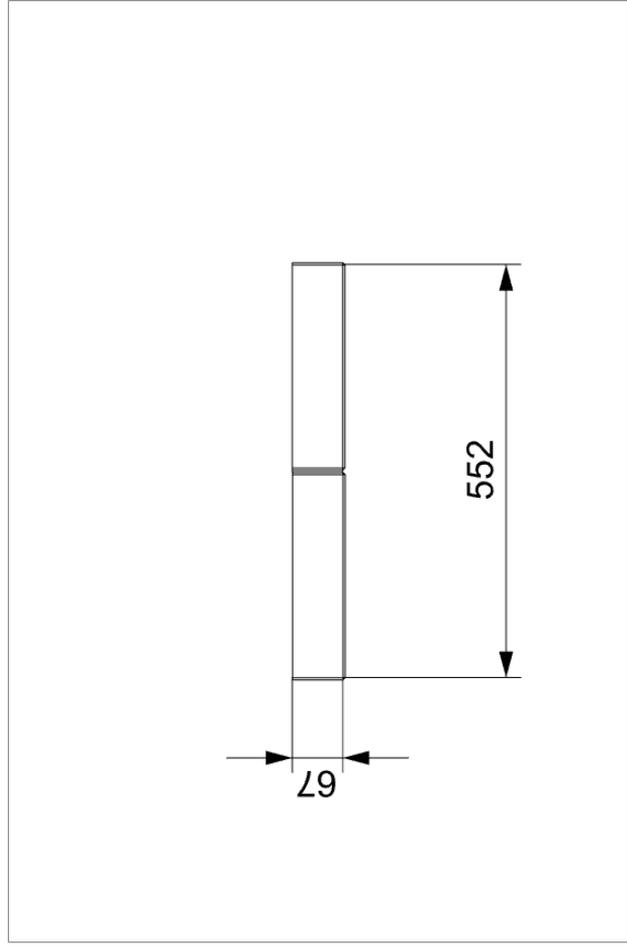
B

4

3

2

1



B



<b>NOMBRE DE LA PIEZA</b>			
Dimensiones generales de la Placa Fotovoltaica			
AUTOR: JUAN PEDRO IBÁÑEZ LISSEN			
<b>EMISION</b>	20/02/16	<b>ESCALA</b>	1:10
<b>FORMATO</b>	A4	<b>Nº PLANO</b>	1

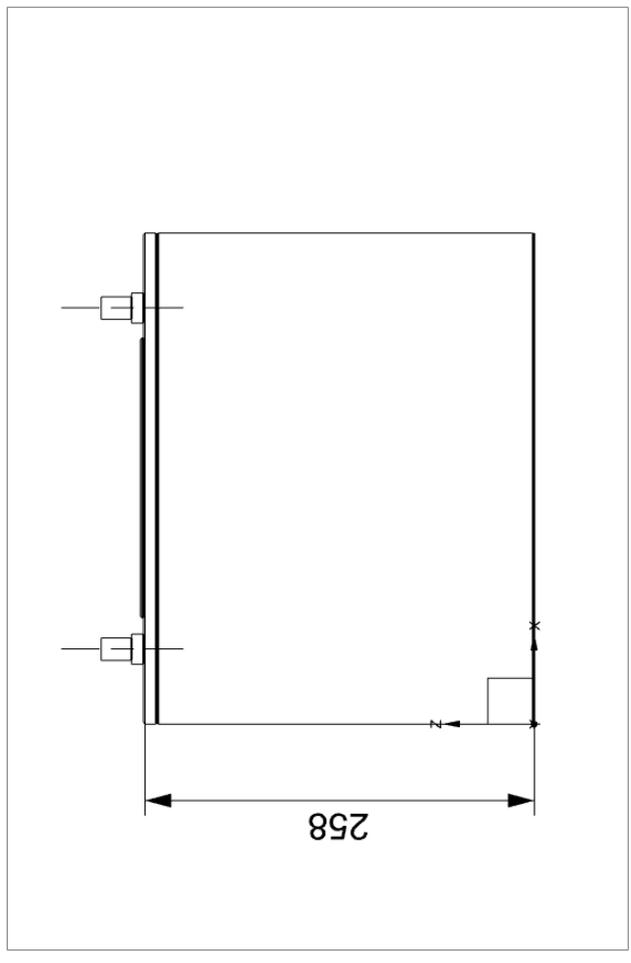
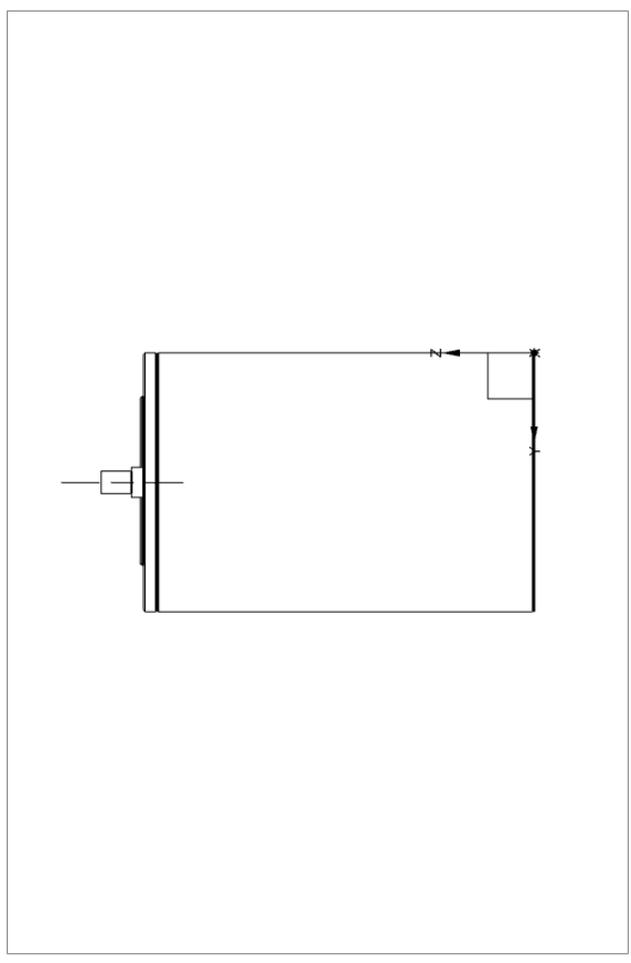
4

3

2

1

A



A

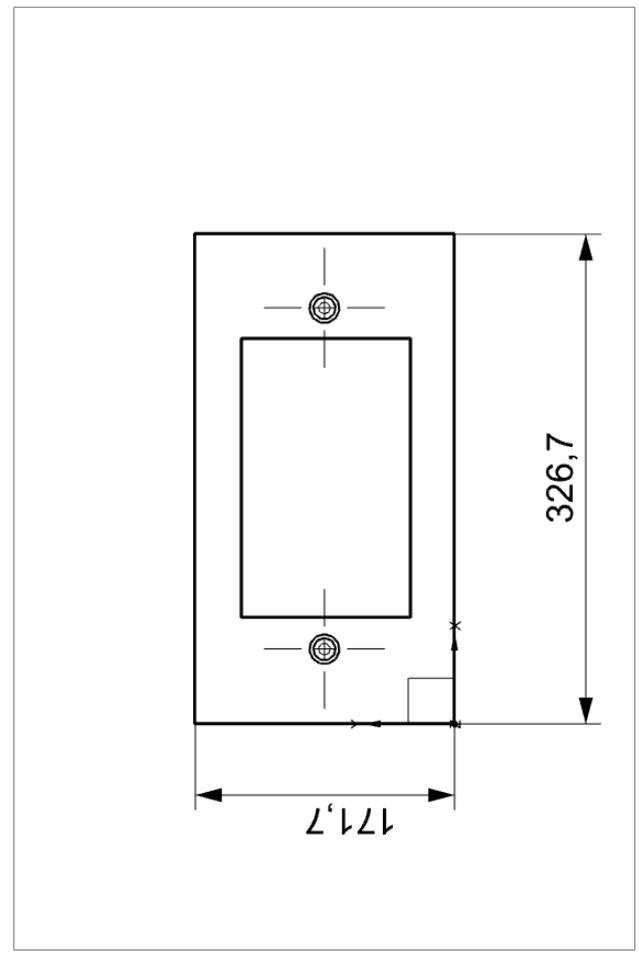
B

4

3

2

1



B



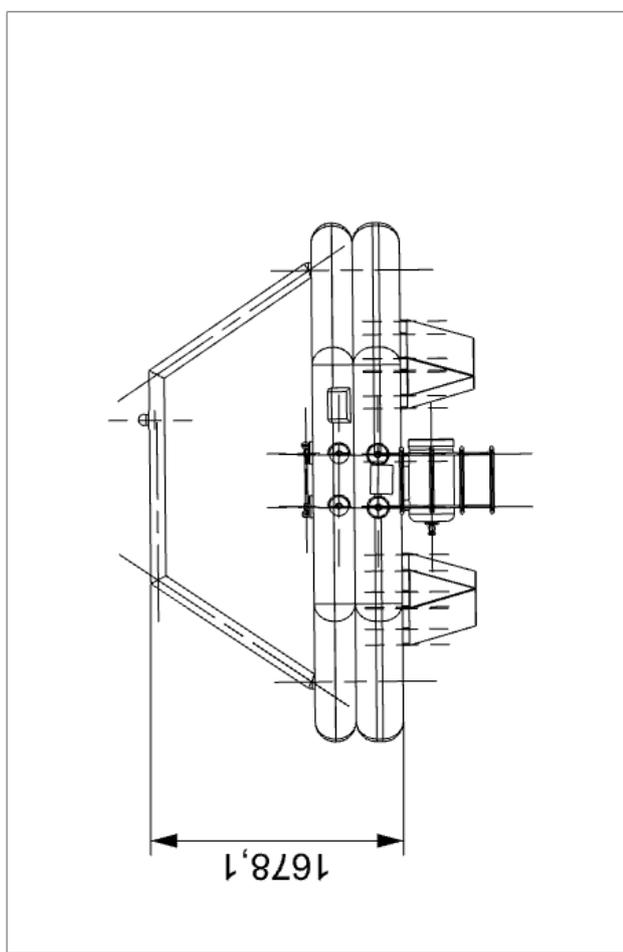
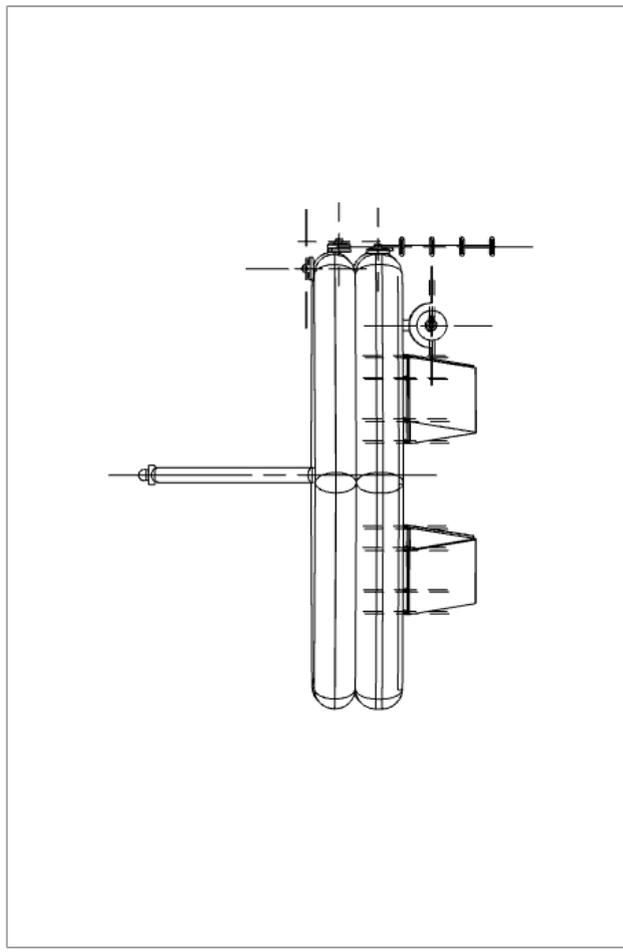
<b>NOMBRE DE LA PIEZA</b>			
Dimensiones generales de la Bateria			
AUTOR: JUAN PEDRO IBÁÑEZ LISSEN			
EMISIÓN	20/02/16	ESCALA	1:5
FORMATO	A4	Nº PLANO	2

4

3

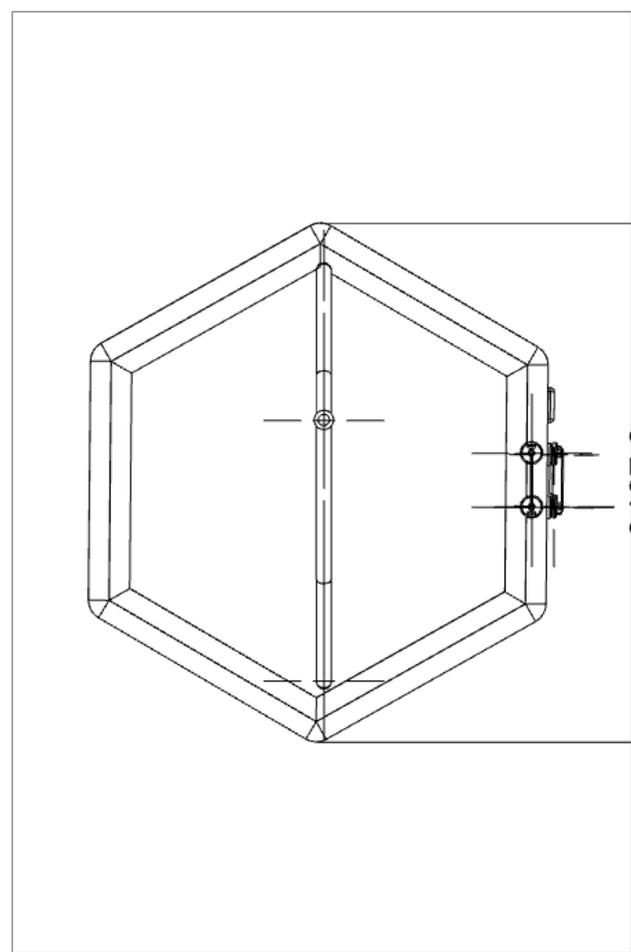
2

1



A

B



1

4

2

3

4



NOMBRE DE LA PIEZA

Dimensiones generales de la Balsa Salvavidas

AUTOR: JUAN PEDRO IBÁÑEZ LISSEN

20/02/16

ESCALA

1:50

A4

Nº PLANO

4

EMISIÓN

FORMATO

