

## ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA DE UN DESALINIZADOR SOLAR DE AGUA MARINA

RAMIRO GONZÁLEZ, Antonio<sup>(1)</sup>; CALDERÓN GODOY, Manuel<sup>(2)</sup>

CÁRDENAS SORIANO, Carlos<sup>(2)</sup>; GONZÁLEZ GARCÍA, Carmen M<sup>a</sup><sup>(1)</sup>

aramiro@unex.es

<sup>(1)</sup>Universidad de Extremadura, Escuela de Ingenierías Industriales, Departamento de Física Aplicada

<sup>(2)</sup>Universidad de Extremadura, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática

### RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de viabilidad técnica de un equipo para la desalinización de agua de mar que utiliza un desalinizador convencional GEFICO AQ-1/2, de los empleados en la marina para producción de agua potable, alimentado mediante energía solar. Estos desalinizadores obtienen la energía térmica necesaria para la evaporación del agua a partir del calor residual de la refrigeración de los motores del barco. En nuestro caso, este tipo de energía se sustituye por la energía térmica suministrada por captadores solares de placa plana. Así mismo, la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento del desalinizador se suministra mediante paneles fotovoltaicos.

Para la realización del estudio se han utilizado datos de irradiancia global sobre plano inclinado y de temperatura ambiente obtenidos experimentalmente en el Laboratorio de Termodinámica Técnica de la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura, aunque la metodología utilizada es extrapolable a cualquier otra localización. Se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad de la instalación solar térmica para estudiar la influencia de distintos parámetros en la producción de agua desalinizada, comprobándose que el parámetro que más influye en dicha producción es el número de captadores térmicos en paralelo. Los resultados del estudio revelan que el sistema es viable técnicamente si se utilizan dos captadores en serie y un número variable en paralelo que depende del caudal de fluido caloportador a utilizar. El análisis de sensibilidad del sistema pone de manifiesto que la producción media de agua dulce es de 200 L/día cuando se utilizan 24 captadores solares térmicos CPD-ML2.0. Para cubrir la demanda de energía eléctrica se deben utilizar 18 paneles fotovoltaicos de 230 W de potencia pico.

Palabras clave: Desalinización, energía solar térmica, energía solar fotovoltaica.

## 1. Introducción

El agua es esencial para la vida. Alrededor del 97,5% del agua de nuestro planeta es agua salada; en tanto sólo un 2,5% es agua dulce que puede ser utilizada para el consumo humano [1]. Se calcula que para el año 2025, 1800 millones de personas estarán viviendo en países o regiones con escasez absoluta de agua y las dos terceras partes de la población mundial podrían estar bajo condiciones de estrés. La escasez de agua potable es, por tanto, uno de los graves problemas socioeconómicos y de salubridad para una gran parte de la humanidad, especialmente para los países del tercer mundo y para los que se encuentran en vías de desarrollo.

Esta escasez de agua dulce ha conducido a avances tecnológicos en la desalinización de agua salobre y marina. Este procedimiento de obtención de agua dulce es especialmente interesante en lugares situados cerca de la costa [2].

Los distintos métodos de desalinización pueden clasificarse en dos grandes grupos: métodos de membrana y métodos de destilación. Desde el año 2000 las plantas de desalinización por membrana han experimentado un crecimiento del 9% anual en tanto que las plantas de desalinización por destilación sólo han crecido en un 5% [1].

En la desalinización por destilación es necesario disponer de un fluido térmico caliente para provocar la evaporación del agua en el evaporador y de un condensador para favorecer la posterior condensación del agua dulce obtenida. El calentamiento del fluido puede hacerse mediante energías renovables, especialmente por aprovechamiento de la energía solar, en cuyo caso nos encontramos con plantas de desalinización solar. Estas plantas pueden aprovechar directamente la energía solar para evaporar el agua o bien de forma indirecta, combinando técnicas de desalinización convencional con captadores térmicos solares. En los sistemas indirectos la energía solar es usada para generar la energía térmica necesaria para la desalinización o bien para producir electricidad que se usa para suministrar la energía eléctrica requerida para plantas convencionales de desalinización como las plantas multi-efecto (ME), multietapa flash (MSF) o de ósmosis inversa (RO) [3].

El objeto de este trabajo es la realización de un estudio de viabilidad técnica de un equipo para la desalinización de agua de mar que utilice energía solar para su funcionamiento. Lo novedoso del sistema diseñado reside en emplear un desalinizador marino convencional (GEFICO AQ-1/2) que utilice el calor procedente de captadores solares planos en lugar del calor residual procedente de la refrigeración de los motores para producir la evaporación del agua. Así mismo, la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento se suministrará mediante paneles fotovoltaicos.

Los resultados del estudio revelan que el sistema es viable técnicamente si se utilizan dos captadores en serie y un número variable en paralelo que depende del caudal de fluido caloportador a utilizar. El análisis de sensibilidad del sistema pone de manifiesto que la producción media de agua dulce es de 200 L/día cuando se utilizan 24 captadores solares térmicos, en tanto que son necesarios 18 paneles PV de 230 W de potencia pico para cubrir la demanda de energía eléctrica del sistema.

## 2. Materiales

### 2.1. Planta desalinizadora

El desalinizador GEFICO, utilizado para este trabajo aparece en la Figura 1. Se trata de un desalinizador de los utilizados en las flotas navales militares y mercantes para la obtención de agua dulce a partir de la desalinización del agua de mar. La energía térmica para la destilación del agua suele provenir del calor residual de los fluidos de condensación o refrigeración de motores o condensadores de instalaciones de máquinas

de vapor o turbinas de propulsión. En el mercado se encuentran multitud de modelos y fabricantes con distinta capacidad de producción. El modelo utilizado por nosotros es el AQ-1/2 que tiene una capacidad de producción de  $1 \text{ m}^3/\text{día}$  de agua dulce producida por evaporación del agua salada a  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  lo que exige bajar la presión en el evaporador a  $0,07384 \text{ bar}$ . Ello se consigue mediante un eyector que disminuye la presión en el interior del desalinizador extrayendo el agua de mar sobrante (Figura 2).

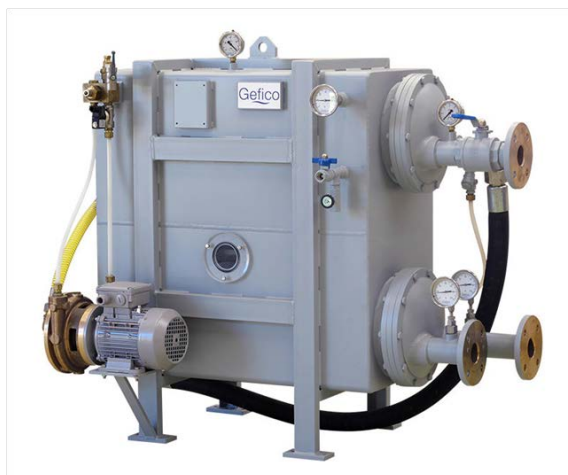


Figura 1. Desalinizador GEFICO AQ-1/2.

Otros elementos que forman parte de la planta de desalinización (Figura 2), además del evaporador y del eyector citados, son los siguientes:

- Condensador, por el que circula el agua de mar
- Bomba de agua salada
- Bomba de fluido caloportador
- Bomba de agua destilada
- Salinómetro

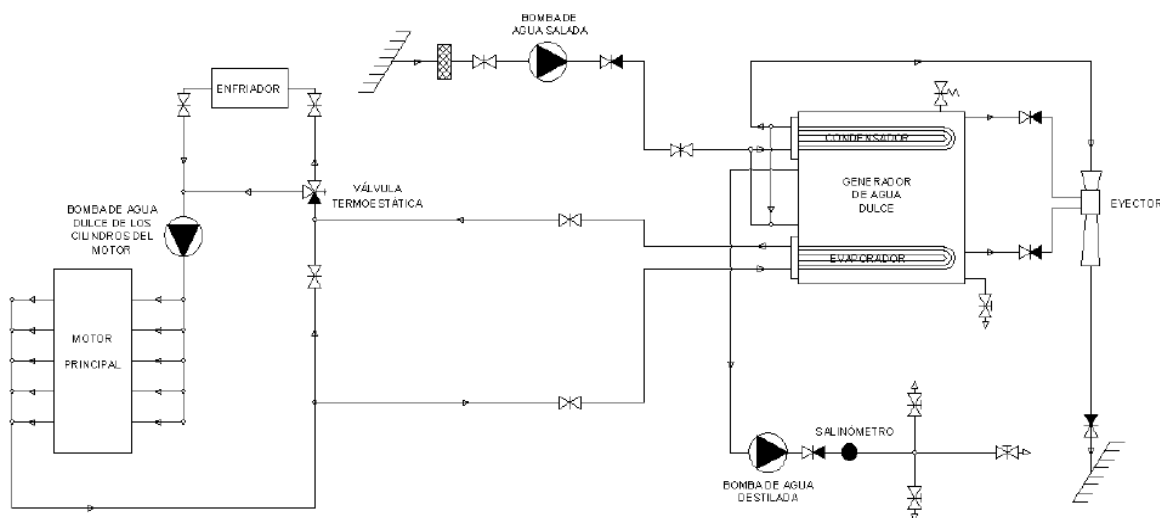


Figura 2. Esquema de la planta desalinizadora convencional.

## 2.2. Captador solar plano

El tipo de captador solar plano que se propone para el suministro de energía térmica al desalinizador es el CPC ML2.0. Se trata de un captador de placa plana de una sola

cubierta con una superficie útil de 1.79 m<sup>2</sup>, de aletas de cobre y que admite un caudal máximo de 128 L/h. Su ecuación de rendimiento viene dada por la expresión (1):

$$\eta = 0.77 - 3.2 \frac{T_e - T_a}{G} \quad (1)$$

en donde  $T_e$  es la temperatura de entrada del fluido caloportador al captador,  $T_a$ , la temperatura ambiente y  $G$  la irradiancia solar incidente sobre la cara expuesta del captador.

### 2.3. Instalación fotovoltaica

Para el suministro de energía eléctrica a la planta desalinizadora se proponen módulos fotovoltaicos ISOFOTON IS-230, monocristalinos de 230 W de potencia eléctrica máxima ( $P_{m\acute{a}x}$ ).

Los módulos se conectarán en 9 series en paralelo de dos módulos cada una, para conseguir una corriente máxima del generador de 47.07 A a una tensión máxima de 118.2 V. Para estos valores de corriente y tensión del generador fotovoltaico, se ha elegido un regulador de la marca Atersa, concretamente el MPPT80-C de hasta 80 A de corriente de entrada y salida de 12 a 48 V. Se trata de un regulador con seguimiento del punto de máxima potencia, que garantiza un óptimo aprovechamiento del recurso solar por parte de los módulos fotovoltaicos, haciéndolos trabajar siempre en la zona de su característica donde la potencia entregada a la instalación es máxima.

Los acumuladores propuestos son OPzS Solar 1080 de Hispania Solar, de plomo-ácido de 12 vasos de 2 V cada uno para conseguir una tensión nominal en bornes del sistema de acumulación de 24 V, necesarios para alimentar al inversor.

Por último, se ha elegido el inversor Tauro 3.0 de Atersa para alimentar el conjunto de receptores que constituyen la instalación. Se trata de un inversor monofásico de 3 kW nominales de potencia y 230 V de tensión de salida (forma de onda senoidal pura), con posibilidad de suministrar picos de potencia de hasta un 300% de la potencia nominal. Con esto queda cubierta la demanda de potencia en los picos de arranque de los motores que accionan las bombas de la instalación.

## 3. Métodos

### 3.1. Sistema propuesto para la planta desalinizadora con suministro de energía solar

En la Figura 3 se muestra el esquema de la planta desalinizadora que se propone, utilizando el desalinizador GEFICO AQ-1/2 y utilizando energía solar para el suministro de la energía térmica y eléctrica para su funcionamiento.

La diferencia fundamental entre este esquema y el mostrado en la Figura 2 reside en el procedimiento de suministro de energía térmica al evaporador del desalinizador que en el sistema convencional se basa en el aprovechamiento de la energía residual procedente de la refrigeración de los motores del barco, como se ha comentado, en tanto que en el que se propone, la energía térmica procede de los captadores térmicos solares. Por otra parte, aunque no se muestre en el esquema, es necesaria una instalación solar fotovoltaica para el suministro de energía eléctrica que garantice el funcionamiento de la planta.

Se aborda, a continuación, el dimensionado de ambas instalaciones solares, térmica y fotovoltaica.

### 3.2. Dimensionado de la instalación solar térmica

El dimensionado de la instalación tiene por objeto final la determinación del caudal de agua desalinizada producida en función del número de captadores solares utilizados. Para llevar a cabo dicho dimensionado seguiremos los pasos siguientes:

- Determinación de la temperatura de salida del fluido caloportador
- Cálculo del caudal de agua desalinizada producida

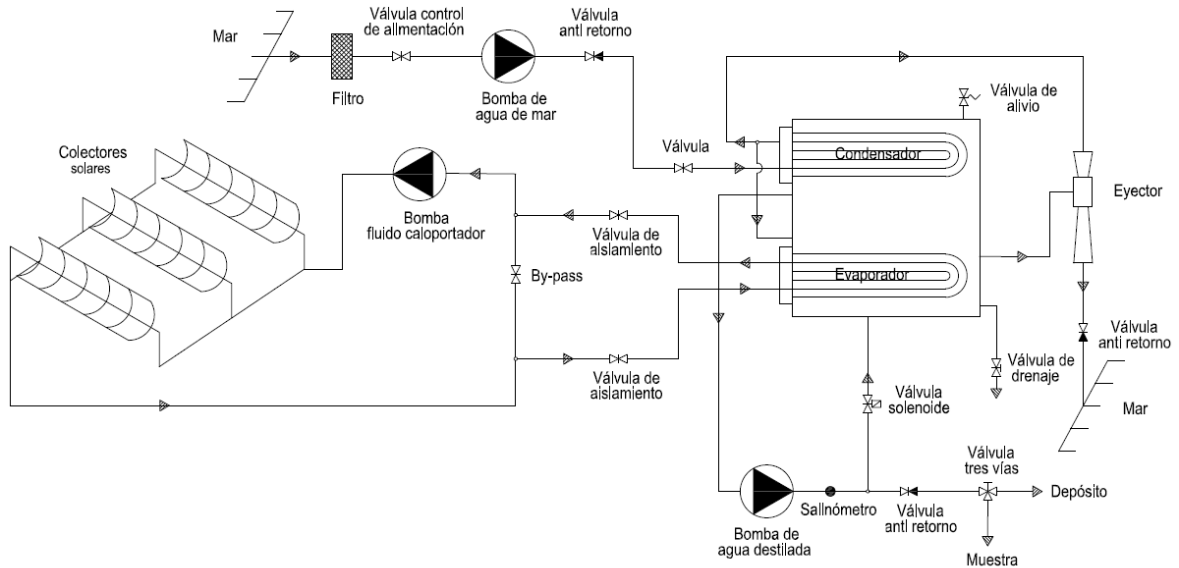


Figura 3. Esquema de la planta desalinizadora propuesta.

#### Determinación de la temperatura de salida del fluido caloportador

Con el fin de garantizar una temperatura de salida del fluido caloportador, suficiente para llevar a cabo la destilación del agua en el evaporador de la instalación se propone la utilización de un campo de captadores con conexión serie-paralelo. En la Figura 4 se muestra, como ejemplo, un campo de 16 captadores. Los cálculos realizados permiten asegurar, como se comprobará más adelante, que se alcanza la temperatura necesaria con dos captadores en serie, en tanto que el número de captadores en paralelo vendrá determinado por el caudal de fluido caloportador que se desee utilizar.

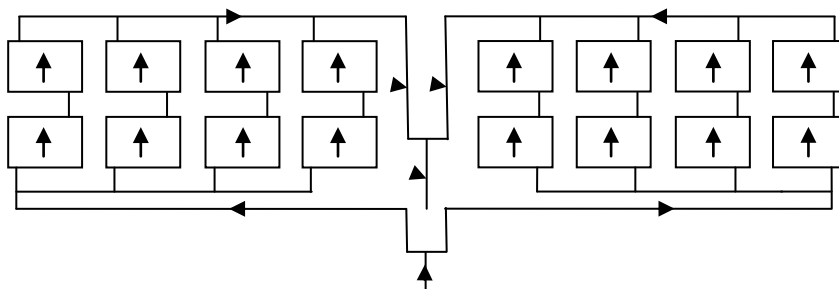


Figura 4. Ejemplo de distribución de captadores.

La temperatura del fluido caloportador a la salida de cada fila de captadores,  $T_s$ , se puede determinar igualando la definición de rendimiento del captador con su valor dado por el fabricante (1):

$$\eta = \frac{\dot{m}c_p(T_s - T_e)}{AG} = 0.77 - 3.2 \frac{T_e - T_a}{G} \quad (2)$$

en donde  $\dot{m}$  es el caudal de fluido caloportador,  $c_p$ , su calor específico a presión constante y  $A$  el área útil del captador. Los demás parámetros que aparecen en esta expresión ya fueron comentados en la expresión (1).

A partir de la expresión anterior se deduce que la temperatura de salida,  $T_s$ , viene dada por la expresión (3):

$$T_s = T_e + \eta * \frac{AG}{\dot{m}c_p} \quad (3)$$

De la expresión (3) se deduce que el valor de la temperatura de salida del fluido caloportador depende de su temperatura de entrada, del rendimiento del captador ( $\eta$ ) que viene dado por (1), de su área útil ( $A$ ), de la irradiancia global incidente sobre el captador ( $G$ ), del caudal de fluido caloportador ( $\dot{m}$ ) y de su calor específico a presión constante ( $c_p$ ).

Obviamente, la temperatura de entrada en la segunda fila de captadores será la de salida de la primera fila. Para la determinación de la temperatura de entrada en la primera fila de captadores tendremos en cuenta el esquema de la Figura 5, en el que se muestra el campo de captadores y el desalinizador y las temperaturas en los puntos más significativos de la instalación.

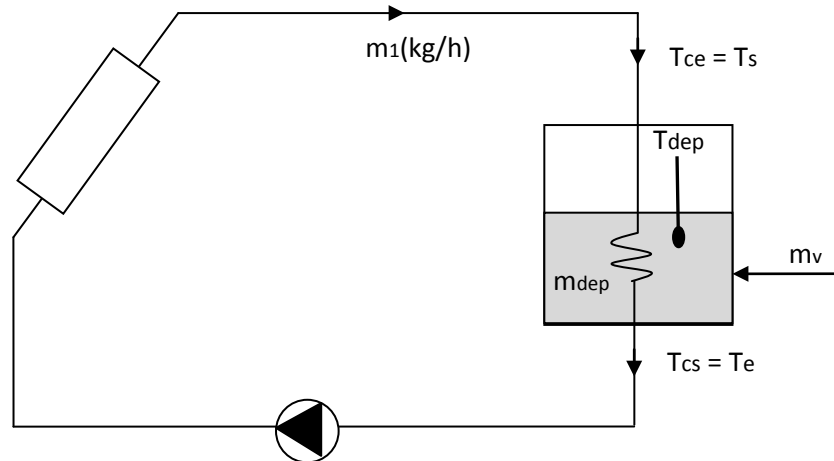


Figura 5. Temperaturas en el desalinizador.

Como se observa en la figura anterior, la temperatura de entrada en los captadores solares ( $T_e$ ) es la de salida del intercambiador del desalinizador ( $T_{cs}$ ). Esta temperatura será igual a la del depósito ( $T_{dep}$ ) al comenzar a funcionar el sistema. Cuando hay radiación solar suficiente para producir el calentamiento del fluido caloportador y la temperatura de entrada en el intercambiador es superior a la del depósito, se produce una cesión de calor al agua salada que producirá el enfriamiento del fluido ( $T_{ce} - T_{cs} = T_s - T_e$ ). Este enfriamiento es de  $8^\circ\text{C}$  para un caudal de  $3600 \text{ L/h}$  cuando la temperatura de entrada al intercambiador es de  $80^\circ\text{C}$  en tanto que será nula cuando la temperatura de entrada sea igual a la del depósito. A partir de estos datos se ha establecido una interpolación lineal para el cálculo de la temperatura del fluido a la salida del intercambiador o lo que es lo mismo, de entrada al campo de captadores,  $T_e$ , teniendo en cuenta que esta temperatura nunca puede ser inferior a la del depósito ( $T_{dep}$ ). Para calcular esta temperatura tendremos en cuenta que cuando se alcanza la temperatura de  $40^\circ\text{C}$  se produce la vaporización del agua en el interior del depósito y en consecuencia la entrada de agua de reposición en el mismo en la misma el caudal del agua evaporada

( $\dot{m}_v$ ). La temperatura del depósito será, por tanto, la de la mezcla de agua a la temperatura ambiente con la que queda en el depósito a 40°C(4):

$$T_{dep} = \frac{(\dot{m}_{dep} - \dot{m}_v)40 + \dot{m}_v T_a}{\dot{m}_{dep}} \quad (4)$$

**Determinación del caudal de agua evaporada**

Para calcular el caudal de agua evaporada se aplicará un balance de energía al intercambiador de calor situado en el interior del depósito del desalinizador. En este balance de energía se tendrá en cuenta que el calor cedido por el fluido caloportador se invierte en calentar el agua del depósito hasta la temperatura de ebullición (si  $T_s > 40^\circ\text{C}$ ) y, si aún hay energía excedente, en vaporizar una determinada cantidad de agua del mismo ( $\dot{m}_v$ ), esto es:

$$\dot{m}_1 c_p (T_s - T_e) = \dot{m}_{dep} c_p (40 - T_{dep}) + \dot{m}_v h_{fg} \quad (5)$$

en donde  $h_{fg}$  es la entalpía de vaporización del agua a la temperatura de 40 °C (2406,7 kJ/kg).

De la expresión anterior se deduce que la cantidad de agua evaporada (kg/h) vendrá dada por la expresión:

$$\dot{m}_v = \frac{\dot{m}_1 c_p (T_s - T_e) - \dot{m}_{dep} c_p (40 - T_{dep})}{h_{fg}} \quad (6)$$

**4. Resultados**

Utilizando la metodología expuesta se ha calculado la producción horaria y diaria de agua desalinizada que se obtendría en cuatro días soleados representativos de las cuatro estaciones del año así como la correspondiente a un día parcialmente nublado. Para ello se ha dispuesto de los datos de irradiancia solar global sobre plano inclinado y de temperatura ambiente medidos en la terraza de la Escuela de Ingenierías Industriales. Como ejemplo, en la Tabla 1 se muestran los datos de irradiancia (G), Temperatura ambiente ( $T_a$ ), Temperatura de entrada del fluido en captadores ( $T_e$ ), Temperaturas de salida de primera y segunda fila de captadores ( $T_{s1}$  y  $T_{s2}$ ), Temperatura del depósito del desalinizador ( $T_{dep}$ ) y caudal horario de agua obtenido ( $\dot{m}_v$ ) a lo largo de una fracción de un día soleado (21 de septiembre). Los cálculos se han efectuado suponiendo 12 captadores en paralelo, una temperatura inicial del depósito de 18 °C, un volumen del mismo de 20 L y un caudal de fluido caloportador de 128 L/h por captador, caudal máximo admitido por el fabricante.

Tabla 1. Datos de la instalación correspondientes a un día soleado.

Hora Local	G (W/m <sup>2</sup> )	Ta (°C)	Te (°C)	Ts <sub>1</sub> (°C)	Ts <sub>2</sub> (°C)	T <sub>dep</sub> (°C)	$\dot{m}_v$ (kg/h)
9:30	392,94	19	23	27	30	26	0,0
9:45	458,70	19	26	30	33	30	0,0
10:00	522,82	19	29	34	38	33	0,0
10:15	582,01	19	32	38	42	40	3,8
10:30	641,20	20	40	45	49	39	24,0
10:45	695,46	20	40	46	50	33	24,9
11:00	748,07	20	40	47	52	33	26,1
11:15	792,46	22	40	48	54	33	27,6
11:30	838,49	24	41	50	56	32	29,4
11:45	877,95	24	42	52	58	32	31,0
12:00	912,48	24	43	53	60	31	32,6
12:15	945,36	24	45	55	62	31	34,2

12:30	973,31	26	46	57	63	31	35,6
12:45	993,04	27	47	58	65	30	36,9
13:00	1004,55	26	48	59	66	30	37,8

En las Figura 6 se representan las producciones horarias de agua desalinizada correspondientes a cuatro días soleados y a uno parcialmente nublado (18 de septiembre).

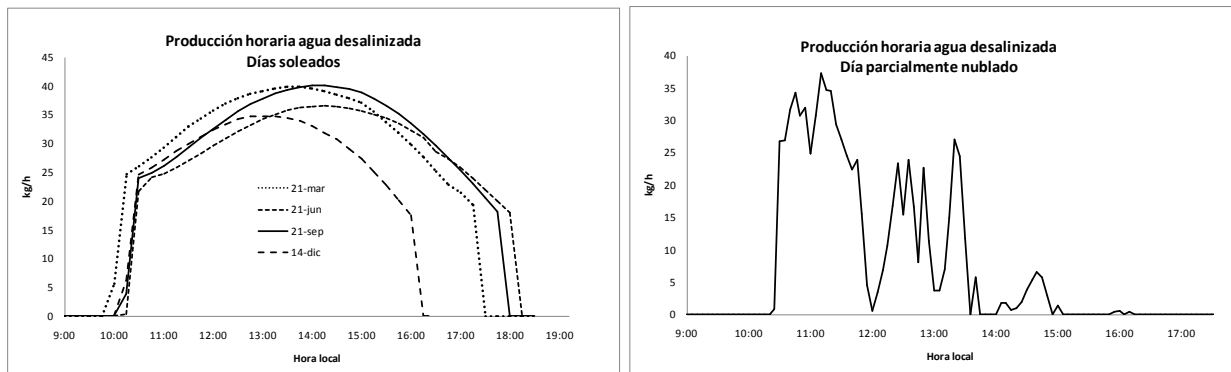


Figura 6. Producciones horarias de agua desalinizada.

Las cantidades totales diarias de agua desalinizada producidas en los días soleados son: 245 kg/día el 21 de marzo, 233 kg/día el 21 de junio, 245 kg/día el 21 de septiembre y 171 kg/día el 14 de diciembre, en tanto la cantidad producida el día parcialmente nublado es de 66 kg.

Para estudiar la influencia que los distintos parámetros de la instalación (número de captadores en paralelo, volumen del depósito del desalinizador, caudal de fluido caloportador y temperatura del agua salada) tienen en la producción de agua desalinizada se ha realizado un *estudio de sensibilidad* que ha puesto de manifiesto que el parámetro que más influye en dicha producción es el número de captadores en paralelo como, por otra parte, era de esperar.

## 5. Conclusiones

Las conclusiones principales que se pueden extraer de la realización de este trabajo son las siguientes:

- La utilización de desalinizadores convencionales del tipo de los usados en la marina con aporte de energía solar es viable técnicamente.
- Para alcanzar la temperatura necesaria para producir la vaporización del agua es necesario utilizar dos captadores en serie y un número variable de captadores en paralelo que dependerá del caudal de fluido caloportador que se desee utilizar.
- Utilizando 24 captadores (2 en serie y 12 en paralelo) la producción media de agua dulce durante los días soleados se estima en 200 L/día, una quinta parte de la producción nominal del desalinizador utilizado.
- La viabilidad económica no es objeto de este trabajo.
- La principal ventaja de la desalinización aprovechando la energía solar es su autonomía para la obtención de agua dulce de calidad a partir de un recurso tan abundante como es el agua de mar.

## 6. Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a D. Juan Cárdenas Soriano, Jefe de Máquinas en diversas flotas y buques, sus sugerencias para la realización de este trabajo.



## 7. Referencias

- [1] MUHAMMAD TAUHA ALI, HASSAN E.S. FATH, PETER R. ARMSTRONG. *A comprehensive techno-economical review of indirect solar desalination*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011, vol. 15, pp. 4187-4199.
- [2] RAMÓN GONZÁLEZ, LIDIA ROCA, FRANCISCO RODRÍGUEZ. *Economic optimal control applied to a solar seawater desalination plant*. Computers and Chemical Engineering. 2014, vol. 71, pp. 554-562.
- [3] HAZIM MOHAMEED QIBLAWEY, FAWZI BANAT. *Solar termal desalination technologies*. Desalination. 2008. Vol. 220, pp. 633-644.