



Federación
Iberoamericana
de Ingeniería
Mecánica



8º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERIA MECANICA

Cusco, 23 al 25 de Octubre de 2007

SISTEMA INTEGRADO DE DESALACIÓN POR ENERGÍAS RENOVABLES SIN EMISIÓN DE SALMUERA.

Ing. C. Fernández-López, Dr. Ing. A. Viedma*, Dr. Ing. R. Herrero y Dr. Ing. A. S. Káiser

Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos E.T.S. de Ingeniería Industrial
Universidad Politécnica de Cartagena.
Campus Muralla del Mar. c/Dr. Fleming s/n. CP: 30202 Cartagena (Murcia), España. Telf.: 968 325981
*e-mail: antonio.viedma@upct.es

RESUMEN

Los efectos medioambientales son uno de los principales problemas de las instalaciones de desalación de agua de modo masivo. Para alcanzar el objetivo ideal de evitar la descarga de salmuera de rechazo en la desalación de agua de mar, la sal debe ser completamente separada del agua, obteniéndola como un producto secundario de valor económico. Si además no se desea aumentar las emisiones de CO₂, la energía necesaria debe extraerse de una combinación de fuentes renovables. Este trabajo presenta un análisis de un esquema integrado de desalación consistente en dos subsistemas secuenciales: una planta de destilación multiefecto (MED) y un ciclo evaporativo por compresión mecánica de vapor (CMV). La energía se obtiene de varias turbinas eólicas y de un campo de colectores solares.

El sistema diseñado produce 100 m³/h de agua dulce con total separación de la sal y el agua. El consumo energético estimado es de 2.362 Kw_t-h por el sistema MED y 1.944 Kw_e-h por el CMV. Al utilizar energías renovables la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera al año es de 8.957 Tn debidas al consumo eléctrico y 6.584 Tn al consumo térmico. Se ha realizado un estudio preliminar de la inversión, la amortización y los costes de explotación del sistema completo. Teniendo en cuenta los precios de la venta de la energía producida y de la sal, el precio del agua sería de 0,59 €/m³. Con una subvención inicial del 35%, se podría reducir a 0,41 €/m³.

PALABRAS CLAVE: Desalación, colectores solares, energía eólica, emisión CO₂, salmuera.

1. INTRODUCCIÓN.

El principal impacto medioambiental de las plantas desaladoras es la emisión de salmuera con alta concentración de sal al mar. La salmuera, el residuo de las desaladoras, muy concentrado en sales, presenta diferencias de temperatura y pH respecto del agua original y contiene productos químicos que provienen de los pretratamientos y posttratamientos que se realizan en el proceso de desalación, que luego son vertidos al mar. En el caso de las plantas que funcionan por destilación el vertido representa de 8 a 10 veces el volumen de agua depurada, mientras que en plantas de ósmosis inversa (RO) el volumen residual es menor que en las anteriores, alrededor de 2,5 a 3 veces el volumen depurado [1]. Esta concentración es menor en plantas de destilación multi-etapa (MSF) donde el ratio es 1,1-1,5 [2], en estudios más recientes como los de Blank et al. [3] los rendimientos llegan a alcanzar porcentajes del 60%. La conductividad eléctrica del agua de alimentación y la salmuera de rechazo varía entre 4,61 a 14,70 y 12,90 a 30,30 mS/cm, respectivamente [4].

El impacto de la salmuera provoca cambios en la composición de las especies, la diversidad y la densidad de población, los corales y praderas marinas de angiospermas son los más afectados. En la costa Mediterránea de España hay cinco clases de praderas marinas de angiospermas la más abundante es *Posidonia oceanica* fanerógama, endémica del mar Mediterráneo. En los últimos años, se han llevado a cabo estudios de la tolerancia a la salinidad de la *Posidonia oceanica*, llegando a fijar la salinidad máxima tolerable en 38,5 psu (unidades prácticas de salinidad) que son aproximadamente equivalentes a 39 g/l [5]. Un estudio al oeste del Mediterráneo [6], encuentra ratios más bajos de crecimiento y más alta mortalidad de *Posidonia oceanica* con niveles de salinidad por encima de 39,1 psu. Se han propuesto técnicas alternativas para solucionar la problemática de la emisión de salmuera; pero la mejor solución es un diseño desde el origen de un ciclo completo que lleva el agua de mar a la separación completa de agua y sal, como en algunas plantas de producción de sal. El ejemplo usado como información práctica es el de una mina de sal en Jumilla, España. En esta instalación industrial el producto obtenido no es el agua, que tras ser separada de la sal se reutiliza inyectándola en la mina para disolver la sal cristalina subterránea y volver a producir la salmuera concentrada de partida, sino la sal que se obtiene en el proceso. La sal y el agua se separan en un ciclo de CMV que trabaja a 2,2 bares de presión y 185-190 °C de temperatura. El coste energético es de 1,2 MW/h con una producción de sal de 7,5 Tn/h. El objetivo de la separación total del agua de la sal, permite obtener ésta como un segundo producto del proceso, aumentando la rentabilidad del mismo, y reduciendo el coste del agua dulce producida.

Otro problema de las plantas desaladoras convencionales es la emisión de CO₂ a la atmósfera. El uso de sistemas de captación de energías renovables (RES) son una alternativa a la escasez de recursos de combustibles fósiles. Las fuentes de energías renovables disponibles para sistemas de desalación más comunes son la energía solar y la energía eólica. Los sistemas de energía solar de mayor interés son los colectores solares térmicos en sus distintos tipos, las balsas solares y las células fotovoltaicas. Hay básicamente dos tipos de colectores solares, los no-concentradores y los concentradores. Los no-concentradores son en general estacionarios y tienen la misma superficie para interceptar y absorber la radiación solar, son también de baja temperatura. Los colectores estacionarios incluyen colectores con placas planas y de tubos de vacío. Los colectores concentrados se dividen en colectores con espejos como los helióstatos o sin espejos como los colectores parabólicos compuestos.

La energía térmica obtenida mediante colectores y estanques solares, o eléctrica mediante paneles fotovoltaicos se utilizan en los sistemas de desalación [7]. Respecto a los diferentes sistemas de captación solar están los sistemas de captación directos, que solo utilizan energía solar durante el tiempo en que se encuentra disponible y su captación es eficiente y los sistemas de captación indirectos, la energía solar es absorbida por colectores solares y puede almacenarse, aunque no sin dificultades o pérdidas, para alimentar sistemas de funcionamiento continuo. La energía eólica es también una fuente variable, dependiente de la velocidad y frecuencia del viento. Cuando la energía eólica es usada para generar electricidad la variación de la fuente puede ser equilibrada con la ayuda de un banco de baterías, aunque con limitación de potencia.

La energía solar térmica es una de las más prometedoras aplicaciones de energías renovables para la desalación. Existen diferentes sistemas de desalación que pueden operar alimentados mediante energía solar térmica. En algunos de ellos el colector solar y el destilador están formados por unidades independientes, recibiendo esta técnica el nombre de destilación solar indirecta. Cuando se necesitan obtener volúmenes elevados de agua tratada, la desalación solar térmica indirecta ha demostrado en distintas experiencias su viabilidad técnica, hay diseños especiales de destilación que pueden ser acoplados a colectores solares, una de estas aplicaciones es presentada por Miyatake et al. [8] el cual muestra un diseño prototipo de destilador, usando el vapor generado en el proceso de desalación para conducir otros procesos. Ajona, [9] da detalles del ACE-20 colector cóncavo parabólico conectado a una planta solar MED unido a una bomba de absorción de calor instalado en el centro de investigación solar en la Plataforma Solar de Almería (España). Otra posibilidad investigada es el uso de la energía eólica directamente con procesos MVC. Un análisis detallado de la influencia de los principales parámetros de tales sistemas son desarrollados por Karameldin et al. [10].

Teniendo en cuenta, el objetivo final de minimizar el impacto medioambiental de las plantas desaladoras, el sistema propuesto intenta combinar el uso de tecnologías de desalación con energías renovables. Las energías eólica y solar han alcanzado ya un desarrollo tecnológico, especialmente la primera, que permiten su plena utilización como fuentes energéticas alternativas. La independencia de los combustibles fósiles que significa su integración en el sistema de desalación propuesto es una apuesta estratégica, y por ello económica a largo plazo. La posibilidad de separar completamente la sal y el agua dulce, y la bonificación recibida por el uso de energías renovables, abren las puertas para obtener beneficios económicos después de la venta de la sal y la energía como productos secundarios.

2. SISTEMA DE DESALACIÓN PROPUESTO.

El sistema combinado de desalación está diseñado para producir 100 m³/h de agua desalada. El agua del mar primero entra a un sistema MED alimentado por energía térmica, produciendo 37,5 m³/h de agua desalada. La salmuera concentrada pasa a un sistema evaporador con CMV generándose los 62,5 m³/h restantes y sal cristalizada. Los consumos energéticos requeridos para ello son 2.362 kW_t-h por el sistema MED y 1.944 kW_e-h en la CMV, siendo el 55% de las necesidades energéticas de origen térmico. En la figura 1 se muestra el diagrama de flujos del sistema propuesto.

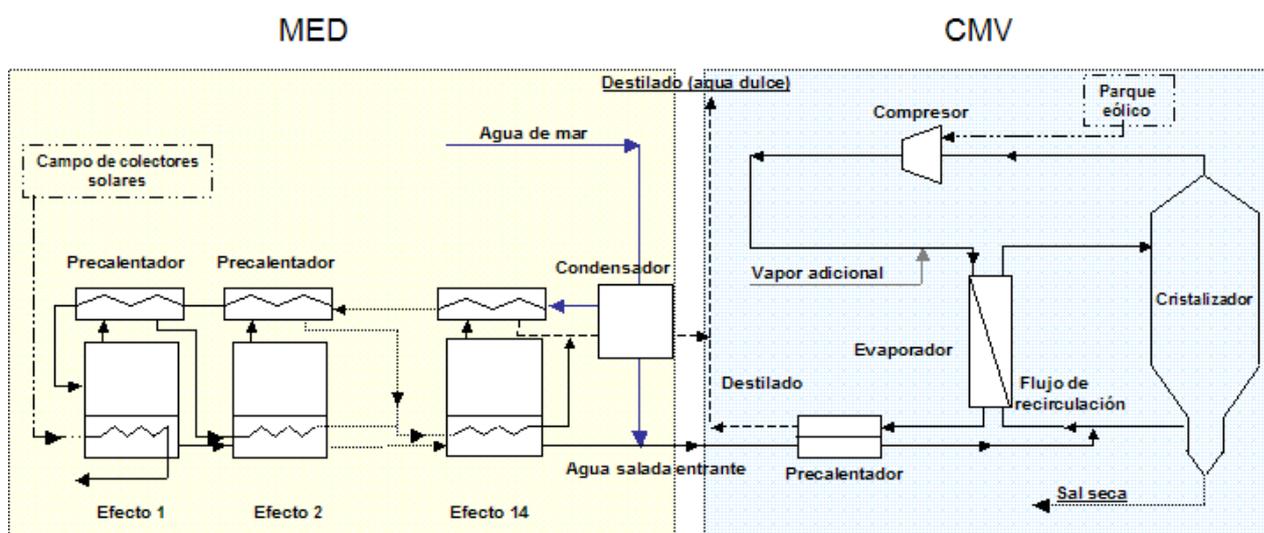


Figura 1.-Diagrama de flujos del sistema de desalación.

El sistema MED está compuesto por 14 celdas o efectos conectados en serie en orden decreciente de presión y temperaturas desde la celda 1 hasta la celda 14. El agua de mar es precalentada de efecto en efecto en los 13 precalentadores. Desde la celda 1, el agua de mar pasa de una celda a otra por efecto de la gravedad de ser extraída de la celda 14 mediante la bomba de salmuera. Parte del agua de mar utilizada como refrigerante del condensador es expulsada y el resto se utiliza para ser pulverizada sobre el haz de tubos de la celda 1. El agua dulce es extraída del condensador por medio de la bomba de destilado.

El proceso de destilación se produce en vacío parcial y por tanto a bajas temperaturas. El rango de valores de temperaturas y presión va entre los 67 °C y 0,28 bares del primer efecto hasta los 33 °C y 0,05 bares del decimocuarto. La razón de no sobrepasar los 70 °C es evitar las incrustaciones de sales en los evaporadores. La salmuera concentrada entra en el precalentador del sistema CMV donde se produce la total separación del agua y la sal.

Los principales elementos del sistema CMV son tres: Un evaporador, un cristalizador y un compresor. La salmuera se incorpora tras pasar por un precalentador al flujo de recirculación entre el cristalizador y el evaporador de tubos verticales. La solución más concentrada permanece en el cristalizador, donde se van formando cristales de sal que en el proceso de recirculación aumentan hasta sedimentarse en el cono inferior del cristalizador. En el extremo inferior de este se extrae la sal, que pasa a un proceso de secado y depuración. El vapor producido en el evaporador se condensa en la parte superior del cristalizador a 1,4 bares y 52 °C, se separa y sale por un conducto en el extremo superior del cristalizador hacia el compresor. Este vapor es comprimido en el compresor centrífugo de vapor donde su vapor se eleva a 2,2 bares y una temperatura de 185-190 °C. Este vapor sobrecalentado pasa a la camisa del evaporador donde se condensa cediendo su calor latente para evaporar la salmuera recirculante.

2.1 Ciclo termodinámico y análisis energético del sistema CMV.

Una vez realizados los estudios paramétricos y elegidos los valores de las variables que establecen el ciclo se puede proponer un punto de funcionamiento sobre el cual seguir desarrollando el estudio de viabilidad de la instalación teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Minimizar el coste energético debido a la CMV, lo cual significa elegir el menor salto térmico posible en el intercambiador ajustando en la medida de lo posible a la temperatura de condensación.
- Obtener unas áreas de intercambio admisibles para el intercambiador. El calor a intercambiar viene fijado por el caudal de agua que se desea evaporar, un descenso del salto térmico conlleva simultáneamente una disminución del coeficiente global de intercambio de calor y un aumento del área necesaria. A partir de una cierta temperatura de condensación, una disminución de esta conlleva aumentos exponenciales el área necesaria.
- Trabajar con temperaturas de ebullición por debajo de 60 °C que protejan la instalación de precipitados y/o corrosión.
- Intentar trabajar con condiciones de flujo semejantes a la instalación de Jumilla. Con especial atención en reproducir las condiciones hidráulicas en el interior de los tubos del intercambiador.

Los parámetros de funcionamiento de la instalación calculados son:

- Caudal de evaporación: 27,0 kg/s
- Caudal en el intercambiador: 31,7 kg/s
- Coeficiente de recirculación: 1,1
- Concentración de sal en el evaporador: $X_{sal}=6,7\%$
- Condiciones de evaporación: $T_{ebull}=52,5^{\circ}\text{C}$ $P_{ebull}=0,14$ bares
- Condiciones de condensación: $T_{cond}=60,0^{\circ}\text{C}$ $P_{cond}=0,27$ bares
- Salto térmico $\Delta T=8^{\circ}\text{C}$
- Coste de agua desalada: 30,4 kWh/m²
- Área específica de intercambiador: 50 m²/(m³/h)

2.2 Integración del sistema MED como fase previa al sistema CMV

Parte del agua dulce deseada se obtendrá en el sistema MED y la salmuera más concentrada en sal que el agua del mar original pasará al ciclo de evaporación con CMV. Este cambio de salinidad origina una modificación en el salto térmico o induce a variaciones en la temperatura de condensación. Se han realizado algunos cálculos modificando la temperatura de condensación y manteniendo constante el salto térmico en 8 °C. La sobresaturación a la salida del evaporador también se mantiene constante modificando el caudal de recirculación.

El sistema MED ha sido diseñado asumiendo los siguientes criterios: [11]

- La planta MED esta compuesta por 14 efectos conectados en serie,
- El destilado esta libre de sales, las pérdidas de masa y calor en el sistema de vacío son despreciables,
- En el evaporador las temperaturas de la fase líquida y la fase vapor se relacionan mediante las correlaciones de elevación del punto de ebullición
- Las pérdidas de calor son despreciables debido al aislamiento y las bajas temperaturas operativas
- Perfecta mezcla del agua y el vapor
- El calor específico a presión constante, depende sólo de la temperatura.

El modelo termodinámico diseñado se ha basado en el proyecto PSA SOL donde el factor de producción (PR) obtenido por el sistema es alrededor de 9.

Si se considera la planta MED como primer paso o fase previa para la completa desalación al sistema de CMV, se ha estudiado la influencia de la fracción del caudal de agua de mar que pasa por las etapas multiefecto en las prestaciones del conjunto de la instalación. En la tabla 1 se muestra la energía consumida y las concentraciones de sal en el agua de entrada al sistema CMV dependiendo del porcentaje de agua de entrada al CMV y del caudal que entra al sistema MED. Los consumos están referidos por cada m³ producido por el conjunto del sistema, por eso disminuye el consumo eléctrico por m³ producido en un 33% al hacer pasar por el ciclo multiefecto el 100% de caudal original. Se puede comprobar como la entrada al ciclo de CMV va aumentando su salinidad.

Tabla 1.- Prestaciones CMV+MED para diferentes caudales a la entrada del sistema MED.

MED % Volumen	CMV Producción (m ³ /h)	MED Producción (m ³ /h)	Consumo eléctrico (kW)	Consumo térmico (kW)	% CT	CMV X _{sal}
0,00	100,00	0,00	3031,18	0,00	0,00	3,50
20,00	92,47	7,50	2821,68	473,00	14,3	3,92
40,00	85,00	15,00	2595,59	945,00	26,6	4,34
60,00	77,49	22,50	2381,61	1418,00	37,3	4,76
80,00	69,98	30,00	2164,44	1890,00	46,6	5,18
100,00	62,50	37,50	1944,19	2362,00	54,8	5,60

3. SUMINISTRO DE ENERGÍA CON ENERGÍAS RENOVABLES

3.1 Abastecimiento de energía térmica con colectores solares.

El objeto de este apartado es prediseñar una instalación solar que sea capaz de proporcionar la energía térmica demandada en la planta MED. Se necesitan 2.362 kW de potencia térmica en la planta MED para desalar 100 m³/h de agua de mar. Considerando que la instalación trabaja continuamente 24 horas al día, la energía demandada anualmente es de 74.488.032 MJ/año (20.691.120 kW-h/año).

El sistema proporciona 100 m³/h de agua de mar a 67 °C. Para conseguir esto, el agua de mar que ha sido precalentada a 49 °C como líquido de refrigeración en los efectos de la planta MED es además calentada en el intercambiador por transferencia de calor de otro circuito de agua que ha sido precalentado por colectores solares y almacenado en un tanque acumulador.

Como la radiación solar es discontinua, la potencia capturada durante las horas de máxima radiación solar excederá a la necesaria en la planta. El exceso de energía térmica permanece almacenado en el tanque acumulador como reserva en las horas de baja radiación. Adicionalmente, para que la planta desaladora trabaje en régimen continuo y para prever la escasez o ausencia de la radiación solar, se ha de introducir un sistema de apoyo que sea capaz de garantizar en estos casos las condiciones de 67 °C para un caudal de 100 m³/h.

El número de colectores necesarios a instalar depende del tipo de colector, caracterizado principalmente por su curva de rendimiento y de la zona geográfica (el promedio de la potencia solar disponible en dicha zona), la instalación estará localizada en Murcia, España (37° 59' N).

En la tabla 2, se muestra la irradiación media diaria disponible, aplicándole unos coeficientes k₁ y k₂ de corrección de claridad del cielo y corrección no perpendicular de los rayos solares con el colector respectivamente.

Tabla 2.-Datos solares en la región de Murcia (España)

Meses	H _β (kJ/m ²)	k ₂	E= k ₁ ·k ₂ ·H _β (kJ/m ²)	Número de horas útiles (h)	Irradiancia media I (W/m ²)
Enero	10.100	1,33	11.995,67	7,0	476,02
Febrero	14.800	1,24	16.388,34	7,5	606,98
Marzo	16.600	1,14	1.6899,13	8,5	552,26
Abril	20.400	1,03	18.763,72	10,0	521,21
Mayo	24.200	0,96	20.746,18	11,0	523,89
Junio	25.600	0,93	2.1260,54	11,5	513,54
Julio	27.700	0,96	23.746,66	11,5	573,59
Agosto	23.500	1,04	21.824,92	10,5	577,38
Septiembre	18.600	1,17	19.433,47	9,0	599,80
Octubre	13.900	1,32	16.384,76	8,0	568,92
Noviembre	9.800	1,42	12.426,99	7,0	493,13
Diciembre	8.100	1,41	10.198,95	6,5	435,85

Para estimar los colectores necesarios se realizó un estudio del rendimiento del colector con tres modelos diferentes. Se realizó un balance mensual de la disponibilidad y la necesidad energética para los meses de verano e invierno. Para calcular el área del campo de colectores se consideraron dos criterios:

- Superficie máxima, de modo que se cubra la necesidad energética incluso en Diciembre, el mes de menor disponibilidad
- Superficie media, de modo que se cubran las necesidades medias. En este caso durante los meses en que la energía disponible sea menor que la media se deberá completar con una caldera alimentada con gas. Esta solución es considerada en el análisis termo-económico.

En la tabla 3 se muestra, la energía demandada, la energía obtenida por el campo de colectores, máxima superficie obtenida (criterio 1), la superficie media (criterio 2) y el número final de colectores necesarios.

Tabla 3.- Datos de energía.

Colector solar térmico	Energía demandada anualmente (MJ)	Energía solar disponible (kJ/m ²)	Superficie máxima (m ²)	Superficie media (m ²)	Número de CST (Superficie media)
CST 1	74.488,03	3.135.292	47.005	23.758	6.097
CST 2	74.488,03	3.284.961	43.483	22.676	6.592
CST 3	74.488,03	2.545.929	72.789	29.258	11.704

3.2 Abastecimiento eléctrico con energía eólica.

Para el abastecimiento eléctrico de la etapa de CMV, se precisan 1.944 kW de potencia que han de ser proporcionados por una instalación eólica. A esto hay que añadir la potencia eléctrica necesaria del bombeo tanto de la planta desaladora como del campo de colectores solares. Se estima en 3 kWh/m³ de agua desalada la energía eléctrica necesaria para esta tarea.

Por tanto, la energía mínima que deberá producir el parque eólico para cubrir la demanda anual de la planta desaladora será:

$$E = \text{Potencia eléctrica} \times n^{\circ} \text{ horas} \quad (1)$$

- Demanda eléctrica del compresor:

$$E_0 = 1.944 \text{ kW} \times (365 \text{ días} \times 24 \text{ horas}) = 17,03 \text{ GWh/año}$$

- Demanda eléctrica del sistema de bombeo:

$$E_1 = 3 \text{ kWh/m}^3 \times 100 \text{ m}^3/\text{h} \times (365 \text{ días} \times 24 \text{ horas}) = 2,63 \text{ GWh/año,}$$

siendo por tanto, la demanda eléctrica total de 19,66 GWh/año.

El número necesario de aerogeneradores dependerá de la potencia de la máquina, así como del número de horas equivalentes anuales de funcionamiento de cada uno de ellos, dependiente del régimen de vientos existente. Considerando un régimen de viento medio (2.000 h-eq) y el tipo de aeroturbinas seleccionada de 2MW de potencia, se necesitarán 5 aeroturbinas para abastecer la demanda eléctrica. Por tanto la potencia nominal del parque eólico es:

$$P_n = 5 \text{ aerogeneradores} \times 2.000 \text{ h-eq} = 10 \text{ MW} \quad (2)$$

La energía eléctrica producida se cederá a la red eléctrica en su totalidad y se estima en 20.000.000 kW-h/año.

4. ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

A partir de los valores de consumo energético calculados anteriormente pueden estimarse las emisiones anuales de CO₂ por este concepto que se evalúan como la medida principal del impacto ambiental.

La conversión de consumos a emisiones depende únicamente de la tecnología utilizada para satisfacer las necesidades energéticas, y principalmente del combustible utilizado, por lo que teniendo en cuenta las consideraciones referidas en el apartado anterior se utilizarán factores de conversión específicos.

4.1 Emisiones de CO₂ debidas al consumo eléctrico.

Para calcular las emisiones de CO₂ debidas al consumo eléctrico se ha multiplicado el consumo anual total de todas las instalaciones por un coeficiente de emisión específica media del parque de generación de energía eléctrica en España [12].

Siendo, la demanda eléctrica total de 19,66 GWh/año, la emisión específica media del parque de generación es, aproximadamente de 8.957 Tn al año. En la tabla 4 se muestran los valores de reducción de CO₂ obtenidos en el sistema CMV, al utilizar energía eólica como fuente alternativa de energía a la red eléctrica.

Tabla 4.- Emisiones de CO₂ debidas al consumo eléctrico.

Fuente energética	Consumo energético kW-h/año	Coefficiente emisión CO ₂ kg/kW-h	Emisiones CO ₂ Tn/año
Eólica	19.660.000	0,4556	8.957

4.2. Emisiones de CO₂ debidas al consumo térmico.

Los sistemas de desalación MED convencionales utilizan como fuente de energía el gasóleo, para calcular las emisiones CO₂ debidas al consumo térmico, se han utilizado unos factores de conversión a Toneladas equivalentes de petróleo (T_{ep}) recomendados por la AIE (Agencia Internacional de la Energía). En la tabla 5 se muestran los valores de reducción de CO₂ obtenidos en el sistema de desalación MED propuesto, al utilizar energía solar como fuente térmica alternativa, obteniéndose una reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera al año de 6.584 Tn.

Tabla 5.- Emisiones de CO₂ debidas al consumo térmico.

Fuente energética	Consumo energético kW-h/año	Contenido energético del gasoleo kW-h/l	T _{ep}	Coefficiente emisión CO ₂ Tn CO ₂ /T _{ep}	Emisiones CO ₂ Tn/año
Solar	20.691.120	10,1	86·10 ⁻⁶	3,7	6.584

5. ANÁLISIS DE VIABILIDAD ECONÓMICA

En este estudio económico se han analizado los costes de inversión, amortización y explotación de una instalación combinada MED+CMV, planta solar y parque eólico para una producción de agua desalada de 100 m³/h.

Los costes globales de la instalación formados por los costes de inversión y los costes de explotación ascienden a 20.535.770 € y 2.198.732,75 €/año respectivamente.

El cálculo de los costes de inversión de la instalación se realiza descomponiéndola en sus tres unidades, la planta MED+CMV, la planta solar y el parque eólico, siendo la suma de todas ellas el coste de inversión global de la instalación.

Como costes de explotación se toman los costes que derivan de la operación y que no están contemplados como costes de venta, son la parte correspondiente de gastos de funcionamiento de la instalación, se dividen en: costes de personal, mantenimiento, reactivos, energía y otros costes. (Véase tabla 6)

Tabla 6.- Costes globales de la instalación (€).

Subsistemas	Costes de inversión (€)	Costes de explotación (€)				Total (€/año)
		Personal	Mantenimiento	Consumibles	Energía	
MED+CMV	4.500.000	191.685,83	90.000,00	56.940,00	1.033.958,00	1.372.583,83
Solar	6.105.770	95.842,91	183.173,10	0,00	54.090,00	333.106,01
Eólico	9.930.000	95.842,91	397.200,00	0,00	0,00	493.042,91
TOTAL	20.535.770	383.371,65	670.373,10	56.940,00	1.088.048,00	2.198.732,75

Con respecto a la retribución de la energía eléctrica producida en régimen especial se opta por ceder la electricidad a la empresa distribuidora de energía eléctrica, siendo el precio de venta de la electricidad, expresado en forma de tarifa regulada, única para todos los periodos de programación, expresada en céntimos de euro por kilovatio-hora.

La tarifa regulada consistirá en un porcentaje de la tarifa eléctrica media o de referencia de cada año definida en el artículo 2 del RD 1432/2002. En el RD 1556/2005 se establece la tarifa eléctrica para 2006, que asciende a 7,6558 cent€/kWh. Para energía eólica (instalaciones ubicadas en tierra) con potencia superior a 5 MW como es nuestro

caso, la tarifa eléctrica es del 90% de T_m para los 5 primeros años del 85% para los 10 años siguientes y del 80% a partir de 15 años. Y la prima del 40% de la tarifa media. El complemento por energía reactiva viene especificado en el RD 436/2004 de 12 de Marzo. (Véase Tabla 7)

Tabla 7.- Coste total de agua desalada considerando un 35% de subvención. (k€)

Coste de inversión inicial (k€)	18.399
Amortización (k€/año)	1.343
Costes de operación (k€/año)	2.199
Personal	383
Mantenimiento	670
Consumibles	57
Energía	1.088
Total costes Amortización + Costes Explotación (k€)	3.542
Coste total agua (€/m ³) (Excluyendo ingresos)	4,04
Ingresos (k€/año)	
Sal	1.234
Energía	1.946
Saldo neto ingresos-costes (k€)	362
Coste total agua (€/m ³) (Con ingresos)	0,41

Al generarse ingresos adicionales por la venta de la sal producida y el beneficio de la diferencia de tarifa eléctrica consumida y generada, el precio del m³ de agua dulce se estima en 0,59 €/m³. Consideramos también una subvención del 35% de la inversión inicial de la planta solar siendo el precio del agua desalada de 0,41 €/m³ (Tabla 6).

6. CONCLUSIONES

Entre las conclusiones a las que se ha llegado en este trabajo cabe destacar:

- Actualmente es posible alcanzar los objetivos fijados de separación total del agua y la sal, y por tanto sin producción de salmuera, usando fuentes energéticas de origen alternativo y renovable. Una combinación adecuada y viable es la destilación multiefecto (MED) inicial alimentada por un campo de colectores solar y la separación final mediante la evaporación con compresión mecánica de vapor (CMV) alimentada por aeroturbinas.
- Se ha analizado en profundidad casos reales y operativos de ambas tecnologías de desalación, obteniéndose los correspondientes modelos termodinámicos y energéticos, como paso previo a la optimización y combinación de ambos.
- Se ha modelado, optimizado y dimensionado un proceso de desalación que produce 100 m³/h de agua dulce con total separación de la sal y el agua. El consumo energético se ha estimado en 2.362 kW-h térmicos y 1.944 kW-h eléctricos, mucho mayor que los sistemas convencionales de ósmosis inversa.
- Se ha analizado al problemática de la utilización de fuentes renovables para la alimentación energética, dimensionándose el campo de colectores solares con acumulador térmico y el parque eólico necesario para producir en media anual la misma energía que la consumida, produciéndose 100 m³/ h de agua dulce de modo continuo, es decir 876.000 m³/año.
- Se ha realizado un estudio preliminar de costes de inversión, amortización y explotación de una instalación combinada MED+CMV+campo solar+parque eólico con estas dimensiones. Al generarse ingresos adicionales por la venta de la sal producida y el beneficio de la diferencia de tarifa eléctrica consumida y generada, el precio del m³ de agua dulce se estima en 0,59 €/m³. Si la inversión inicial tuviera una subvención del 35%, el precio del agua resultaría 0,41 €/m³. En un nivel más cercano a los usuales.
- La desventaja inicial por el mayor coste energético de la separación total de la sal, se ve compensada en parte por el beneficio económico de la propia sal obtenida. Adicionalmente el planteamiento de recurrir a fuentes de energía renovable reduce los costes de explotación, y permite aprovechar los beneficios y subvenciones existentes en torno a estas tecnologías.

- La rentabilidad medioambiental que significa evitar la emisión de salmuera al mar estimada en 577 kTn/año, y de CO₂ a la atmósfera que ascendería a 15.541 Tn/año, es difícil de cuantificar en términos económicos, pero pueden ser tales que compensen la diferencia de coste inmediato del agua dulce producida.

Hoy en día es evidente el interés de explorar y desarrollar las ideas expuestas como un camino para hacer frente a la creciente demanda de agua dulce, sin generar los perjuicios e inconvenientes medioambientales de las tecnologías actualmente en explotación.

REFERENCIAS

1. A. J. Morton, I. K. Callister and N. M. Wade, "Environmental impacts of seawater distillation and reverse osmosis processes." *Desalination*, Volume 108, Issues 1-3, (1997), Pages 1-10.
2. R. Einav, K. Harussi and D. Perry, "The footprint of the desalination processes on the environment." *Desalination*, Volume 152, Issues 1-3, (2003), Pages 141-154.
3. J.E. Blank, G.F. Tusel, S. Nisan "The real cost of desalted water and how to reduce it further". *Desalination* 205 (2007) 298-311
4. A. M.O. Mohamed, M. Maraqa and J. Al Handhaly. "Impact of land disposal of reject brine from desalination plants on soil and groundwater." *Desalination*, Volume 182, Issues 1-3, (2005), Pages 411-433.
5. M. Latorre. "Environmental impact of brine disposal on Posidonia seagrasses." *Desalination*, Volume 182, Issues 1-3, (2005), Pages 517-524
6. J.L. Buceta et al. "Estudio de los efectos de incrementos de salinidad sobre la fanerogama marina Posidonia Oceanica y su ecosistema, con el fin de prever y minimizar los impactos que pudieran causar los vertidos de aguas de rechazo de plantas desaladoras." *Ingenieria Civil*, 132, (2003).
7. S. A. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources." *Progress in Energy and Combustion Science*, Volume 31, Issue 3, (2005), Pages 242-281.
8. O. Miyatake, Y. Koito, K. Tagawa and Y. Maruta, "Transient characteristics and performance of a novel desalination system based on heat storage and spray flashing." *Desalination*, Volume 137, Issues 1-3, (2001), Pages 157-166.
9. J. I. Ajona, "ACE-20 Spanish parabolic trough collector". In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Solar Thermal Concentrating Technologies*, vol. I, September 28-October 2, 1992. Ministerio de Industria y Energía, CIEMAT, Madrid.
10. A. Karameldin, A. Lotfy and S. Mekhemar, "The Red Sea area wind-driven mechanical vapor compression desalination system." *Desalination*, Volume 153, Issues 1-3, (2003), Pages 47-53.
11. Renzonnet T.. "Simulation and thermoeconomic analysis of a combined power and desalination plant." Diploma thesis, University of Zaragoza, (2004).
12. IDAE "Guía práctica de la energía consumo eficiente y responsable". 2º Edición IDAE, M-14244-2007.

NOMENCLATURA

<i>MED</i>	Sistema de destilación multiefecto
<i>CMV</i>	Sistema de compresión mecánica de vapor
<i>RO</i>	Sistema de Osmosis inversa
<i>MSF</i>	Sistema de destilación multietapa
X_{sal}	Concentración de sal en el evaporador (adimensional)
T_{ebull}	Temperatura de ebullición (°C)
P_{ebull}	Presión de ebullición (bar)
T_{cond}	Temperatura de condensación (°C)
P_{cond}	Presión de condensación (bar)
ΔT	Salto Térmico (°C)
<i>CST</i>	Colector Solar Térmico
k_1	Coefficiente de corrección de claridad del cielo
k_2	Coefficiente de corrección por la no perpendicular de los rayos solares con el colector
<i>E</i>	Demanda eléctrica (GW h/año)
P_n	Potencia nominal (MW)