

LAS ENERGÍAS RENOVABLES Y LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR, PILARES DEL DESARROLLO SOSTENIBLE DE CANARIAS

PILLARS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN THE CANARIES: RENEWABLE ENERGIES AND SEA WATER DESALINATION

Roque Calero Pérez*, José Antonio Carta González,
Pablo Medina Sánchez***, José Martín Hernández******

Recibido: 17 de septiembre de 2010

Aceptado: 18 de octubre de 2010

Resumen: El abastecimiento de agua potable en la mayoría de las Islas Canarias, tanto para consumo humano como agrícola, siempre ha constituido un problema debido a su crónica escasez, paliada en los últimos años por la creciente producción industrial de agua mediante la desalación de agua de mar. Teniendo en cuenta los altos consumos energéticos de estos sistemas de desalación, el problema de la disponibilidad de agua potable en Canarias, y en otras muchas zonas del mundo de similares características, se traslada ahora a la disponibilidad de recursos energéticos fósiles, petróleo y gas natural, sobre los cuales se ciernen importantes incer-

Abstract: The supply of drinking water in most of the Canary Islands, both for human consumption as agricultural, has always been a problem due to chronic shortages, alleviated in recent years by increasing industrial production of water through the desalination of seawater. Taking into account the high energy systems desalination, the problem of the availability of drinking water consumption in the Canary Islands, and in many places in the world of similar characteristics, now moves to the availability of fossil energy resources, oil and natural gas, envelope which loom important uncertainties both costs and availability.

* Dr. Ingeniero Industrial.

** Dr. Ingeniero Industrial.

*** Ingeniero Industrial.

**** Ingeniero Industrial.

Ingeniería, Investigación e Innovación para el Desarrollo Sostenible (3ids). Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. C/ Pérez de Toro, 1. 35003. Las Palmas de Gran Canaria. España. Correo electrónico: rcalero@dim.ulpgc.es Teléfono: 928-451-999.

tidumbres tanto en costes como en disponibilidad

En este trabajo se aborda una posible solución a este grave problema, mediante la utilización de las energías renovables, y en particular, la eólica, para la desalación de agua de mar a gran escala.

Se describen la metodología utilizado y los resultados alcanzados, que muestran la viabilidad técnica y económica de esta solución.

In this paper discusses a possible solution to this serious problem, through the use of renewable energies, and in particular wind energy, for the desalination of seawater large-scale. Describes the methodology used and the results achieved, showing the technical and economic feasibility of this solution.

Key words: Energy. Wind energy. Desalination. Water.

Palabras clave: Energía. Eólica. Desalación. Agua.

1. INTRODUCCIÓN

Las Islas Canarias, por su situación geográfica, están sometidas a un clima seco, con escasez de lluvias, muchas veces en forma torrencial, y periodos de sequías a veces muy prolongados¹.

Desde que las Islas Canarias estuvieron habitadas, la situación de equilibrio entre los recursos hídricos procedentes del ciclo hidrológico (incluyendo los derivados de la lluvia horizontal) y los consumos de la escasa población para sus necesidades agrícolas y de supervivencia se mantuvieron en un equilibrio precario pero cierto (los manantiales y algunas lagunas) eran suficientes. Sin embargo, en el momento que las Islas Canarias se incorporan a la dinámica de una sociedad europea se incrementan las necesidades de agua, tanto por el aumento de la población como por el aumento de las superficies destinadas a la agricultura, rompiéndose ese equilibrio en varios frentes: por un lado, la paulatina destrucción de buena parte de la capa vegetal originaria para destinar terrenos a actividades agrícolas disminuye los efectos de la lluvia horizontal y por otro se inicia la extracción de aguas basales, lo cual pone en riesgo la pervivencia de la propia capa vegetal al descender los niveles freáticos.

Este doble efecto sinérgico negativo alcanza su punto culminante en la segunda mitad del siglo XX, donde ya el sistema hidrológico de la mayoría de las islas se muestra incapaz de

¹ HERNÁNDEZ, P. (2003).

satisfacer las necesidades de estas ², y no solo para actividades agrícolas (especialmente el cultivo de la platanera, gran consumidora de agua), sino incluso para el suministro a una población en crecimiento casi exponencial, derivado de la expansión rapidísima de un turismo fuertemente exigente en recursos hídricos.

La situación llegó a tal extremo en algunas islas, como Gran Canaria, que la extracción de aguas basales llevó a un descenso del nivel freático de más de 20 metros cada año, obligando a la profundización de pozos de hasta 600 metros.

Por suerte para Canarias, el estrangulamiento hídrico coincide con el desarrollo de las tecnologías de desalación³ de agua de mar, lo cual ha permitido continuar la expansión de la población y del turismo más allá de los límites impuestos por los recursos hídricos de las islas. Esta situación se ha visto favorecida, además, por el práctico abandono de las actividades agrarias tradicionales, fuertemente consumidoras de agua.

Sin embargo, hay que reconocer que esta producción de agua está supeditada a la disponibilidad de recursos energéticos (electricidad)⁴ y ello puede suponer una grave amenaza en un futuro próximo a la que se le debe hacer frente cuanto antes.

2. CONSUMO Y PRODUCCIÓN DE AGUA EN CANARIAS. SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

En el año 2007 la demanda de agua potable en el conjunto de las Islas Canarias ascendió a un total de 525,6 Hm³, de los cuales 233,45 corresponden a agua no desalada (lluvia, pozos y galerías) y el resto, 292,164 m³, a agua de mar desalada, es decir, producida industrialmente⁵.

La situación es muy diferente entre las diferentes islas: en un extremo se encuentran las islas de Lanzarote, donde el 99 % del

² SYNCONSULT, SL y AICASA (1998), pp. 1-77.

³ SYNCONSULT, SL y AICASA (1998), pp. 1-68; VEZA, J. M.; GÓMEZ, A. y PÉREZ, J. (1992), 85, pp. 147-159; VEZA, J. M. (2001), 133, pp. 259-270.

⁴ SADHWANI, J. y VEZA, J. M. (2008), 221, pp. 143-150.

⁵ ISTAC: <http://www2.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas.html>

agua potable es agua de mar desalada, seguida de Fuerteventura, con el 86 %. En el otro extremo se encuentran las islas de La Gomera y La Palma, donde el 100 % del agua potable procede de aguas basales y de lluvia.

El «consumo per cápita» para el conjunto del archipiélago en el año 2007 ascendía a 340 litros por persona y día (L/p.día), de los cuales 141 l/p.día es el consumo medio de los hogares, destacando los más de 47 l/p.día que suponen las pérdidas (18 % del caudal distribuido).

Tanto las aguas naturales como las industriales han mantenido un crecimiento continuo en la última década, como se muestra en la figura 1, con una clara estabilización en los últimos años.

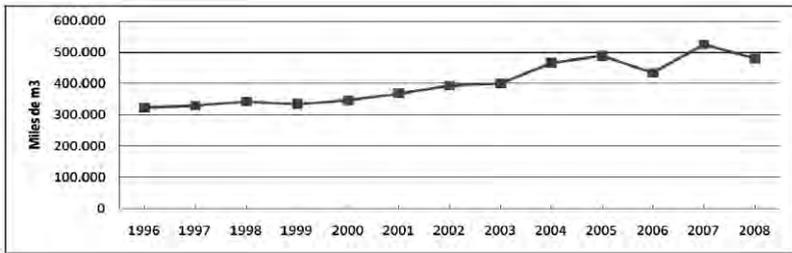


FIGURA 1: Evolución del consumo total de agua en Canarias.

FUENTE: Instituto Estadístico de Canarias (ISTAC)⁶.

3. LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR EN CANARIAS. SITUACIÓN ACTUAL Y PERSPECTIVAS

La primera planta desaladora, del tipo MSF (Multiple Stage Flash Destillation en inglés, o Destilación Súbita Multietapa, en español), se instaló en la isla de Lanzarote en el año 1964; a esta siguió otra del mismo tipo en Gran Canaria, de 20.000m³/día, en el año 1970 (producía agua y electricidad). En 1972 se instala la primera planta de Compresión de Vapor (CV) en Lanzarote y en

⁶ ISTAC: <http://www2.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas.html>

1976 se instala la primera planta osmosis inversa (OI) para uso agrícola en Fuerteventura.

En la década de 1980-90 se instalan plantas de C.V. y O.I. en las islas de Lanzarote, Fuerteventura y Gran Canaria, destacando la unidad de O.I., de Las Palmas II, con una producción de 36.000m³/día, primera en el mundo que incorpora membranas en espiral.

En el año 1999 se instala la primera planta desaladora en Arona, isla de Tenerife, con una producción de 20.000m³/día.

La mayor planta de desalación en las Islas Canarias es Las Palmas III, con una capacidad de producción de agua potable de 58.000m³/día y que abastece a una parte importante de la ciudad de Las Palmas, en la Isla de Gran Canaria.

La isla que tiene una mayor dependencia del agua de mar desalada es Lanzarote (el 99 % del consumo), seguida de Fuerteventura (más del 60 % del consumo total) y Gran Canaria.

En todas estas islas, además de Tenerife, el agua desalada es el apoyo fundamental del desarrollo alcanzado y especialmente del gran auge turístico.

(En Fuerteventura, por ejemplo, la población actual supera 130.000 habitantes, sin contar los turistas residentes. Antes de la incorporación de las plantas de desalación, la isla, a duras penas, podía soportar 10.000 personas, con aguas insalubres en muchos casos)

La producción de agua potable a partir del agua de mar no ha dejado de crecer en los últimos años, hasta alcanzar un volumen máximo de 292,16 Hm³/año en el año 2007, estabilizándose a partir de este año como se muestra en la figura 2⁷.

En la figura 3 se muestra la distribución de grandes plantas desaladoras en Canarias en el año 2007.

La desalación de agua de mar no presenta problemas técnicos (se trata de tecnologías maduras y muy competitivas) pero si los derivados de la gran cantidad de energía que se precisa para su obtención (entre 3 y 5 kWh de energía eléctrica por cada m³ de agua desalada).

⁷ ISTAC: <http://www2.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas.html>

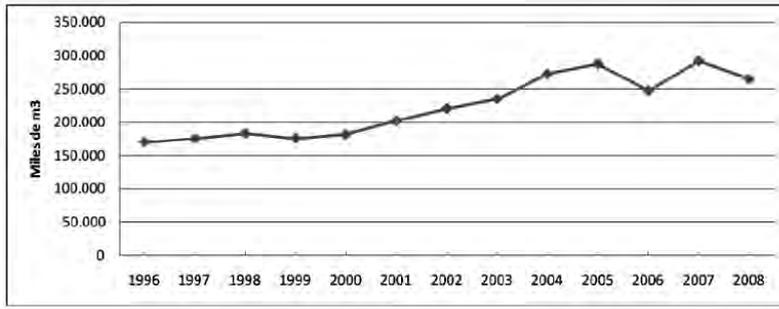


FIGURA 2: Evolución de la cantidad de agua desalada en Canarias.

FUENTE: Instituto Estadístico de Canarias (ISTAC)⁸.

<i>Isla</i>	<i>Capacidad m³/día</i>	<i>Producción m³/año</i>	<i>Principales instalaciones</i>
Fuerteventura	32.615	11.190.206,5	Puerto del Rosario 15.000 m ³ /día (Consorcio de Abastecimiento de Agua de Fuerteventura CAAF)
Gran Canaria	249.553	85.621.634,3	Las Palmas 100.000 m ³ /día (Empresa Mixta de Aguas de Las Palmas EMALSA) Sureste 25.000 m ³ /día
Lanzarote	69.680	23.907.208,0	Arrecife 40.000 m ³ /día (Insular de Aguas de Lanzarote INALSA)
Tenerife	96.094	32.969.851,4	Santa Cruz de Tenerife 21.000 m ³ /día (Empresa Municipal de Aguas de Santa Cruz EMMASA) Adeje-Arona 20.000 m ³ /día
El Hierro	600	205.860,0	
La Graciosa	50	17.155,0	

FIGURA 3: Tabla de distribución de plantas desaladoras en Canarias.

FUENTE: Elaboración propia.

En términos energéticos, el agua desalada en las islas supone un importante renglón del consumo total, como muestra la siguiente tabla de la figura 4.

⁸ ISTAC: <http://www2.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas.html>

<i>Consumo de energía eléctrica en desalación</i>			
<i>Isla</i>	<i>Capacidad m³/día</i>	<i>Producción m³/año</i>	<i>Consumo eléctrico (MWh y %)</i>
Fuerteventura	32.615	11.190.206,50	55.950 (17,0 %)
Gran Canaria	249.553	85.621.634,30	428.105 15,0 %)
Lanzarote	69.680	23.907.208,00	119.535 (19,8 %)
Tenerife	96.094	32.969.851,40	164.845 (6,3 %)
El Hierro	600	205.860,00	1.025 (4,5 %)
La Graciosa	50	17.155,00	

FIGURA 4: Tabla de consumo total de energía eléctrica en desalación en Canarias.

FUENTE: Elaboración propia.

En términos económicos, el coste de producción de 1 m³ de agua desalada se reparten de la siguiente manera:

- Amortización: 29 %
- Membranas: 7 %
- Energía eléctrica: 41 %
- Personal: 3 %
- Productos químicos: 8 %
- Mantenimiento: 6 %
- Impuestos: 5 %
- Varios: 1 %

Como se ve, la parte más importante del coste es el capítulo de la energía, lo cual hace especialmente vulnerable la producción de agua desalada a los costes de ésta.

En conjunto, la desalación de agua en Canarias supone más de 770.000 MWh, lo que equivale a más de 180.000 Tn de combustibles fósiles cada año (1.314.000 barriles, o 3.600 cada día), con un coste superior a los 100 millones de euros cada año (a 79 \$ el barril) y la emisión de más de 450.000 Tn de CO₂ a la atmósfera cada año.

Este coste energético puede incrementarse dramáticamente en el futuro si los precios del petróleo se disparan como vaticinan todos los pronósticos. De ahí la gran importancia de producir esta agua a partir de recursos energéticos endógenos, como es el caso de la energía eólica.

4. LOS RECURSOS ENERGÉTICOS EÓLICOS DE CANARIAS

Las Islas Canarias se encuentran enclavadas en el Océano Atlántico, próximas al litoral africano. Unen a su condición insular y oceánica la proximidad al Trópico de Cáncer, situándose entre los 27°37' y los 29°23' de latitud Norte; es decir, en el área de las altas presiones subtropicales. Se encuentran por tanto en la zona climática denominada tropical.

Uno de los factores principales que determina el clima de Canarias, además de la corriente marina fría, el relieve y la proximidad al continente africano, son los vientos Alisios.

Los vientos Alisios, producidos por el anticiclón de las Azores, surgen como consecuencia de la circulación alrededor de los extensos anticiclones subtropicales. Las Islas Canarias, en verano, se encuentran en el seno de la corriente de los vientos Alisios del NE, mientras que en invierno este anticiclón se manifiesta únicamente como una banda de altas presiones subtropicales.

Esto se refleja en el sentido de que en verano la circulación del Alisio tiene un carácter casi permanente, mientras que en invierno suele alternar con otras circulaciones muy distintas relacionadas con las perturbaciones de la zona templada.

En consecuencia, el régimen de vientos en Canarias manifiesta una clara variación estacional y una marcada componente direccional. Siendo la frecuencia de los vientos de componente NE mínima en los meses de invierno, del orden del 50 % y máxima en los meses de verano, entre el 90-95 %⁹.

Asimismo, la magnitud de tales vientos hace que en lugares bien expuestos las Islas Canarias, donde la cercanía al mar combina el Alisio con corrientes locales (brisas) y con aceleraciones debidas a la orografía, se produzcan potenciales eólicos muy elevados, óptimos para su explotación energética (algunos parques eólicos de Canarias son los de mayor producción del mundo).

En las Islas Canarias, el potencial eólico es bien conocido, como resultado de los trabajos efectuados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de

⁹ RAMÍREZ, P. (2006).

Gran Canaria, que confeccionó el mapa Eólico de Canarias (1988-1991)¹⁰ y las simulaciones de viento más recientes del Instituto Tecnológico de Canarias (ITC)¹¹. En la figura 4 se muestra el mapa Eólico de Canarias desarrollado por el Instituto Tecnológico de Canarias, representando el color rojo el de más intensidad de viento y el verde el de menos.

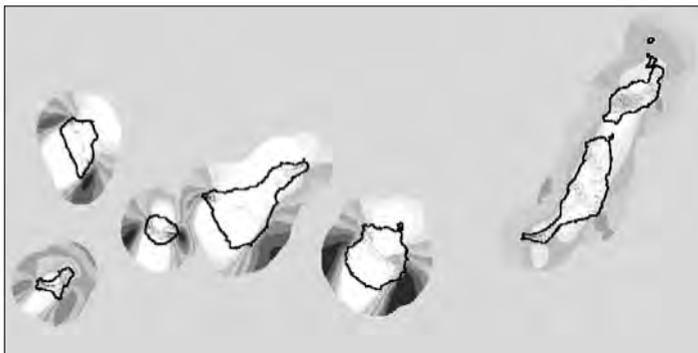


FIGURA 5: Mapa Eólico de Canarias.

FUENTE: Instituto Tecnológico de Canarias (ITC)¹².

Así se dispone de las distribuciones estadísticas de la intensidad y dirección de los vientos en prácticamente todo el territorio canario. En la figura 6 se muestra un ejemplo de distri-

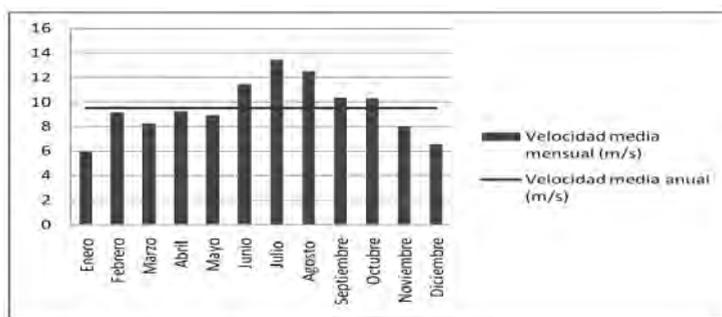


FIGURA 6: Variación estacional (mensual) del viento (m/s).

FUENTE: Elaboración propia.

¹⁰ CALERO, R. y CARTA, J. A. (2004), 32, pp. 1185-1197.

¹¹ ITC. <http://www.itccanarias.org/recursoeolico/>

¹² ITC. <http://www.itccanarias.org/recursoeolico/>

bución mensual, mientras que en la figura 7 se muestra un ejemplo de distribución horaria; en la figura 8 se presenta un ejemplo de distribución de direcciones (rosa de los vientos).

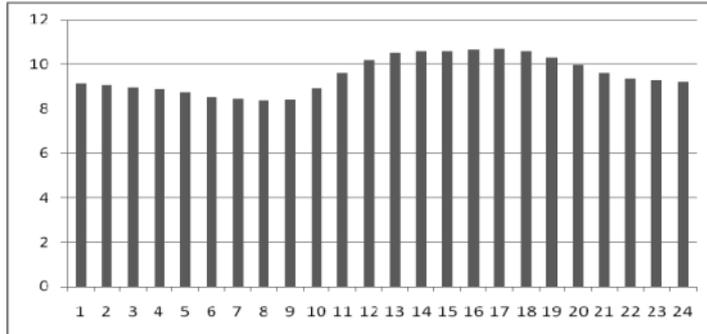


FIGURA 7: Variación horaria media del viento (m/s).

FUENTE: Elaboración propia.

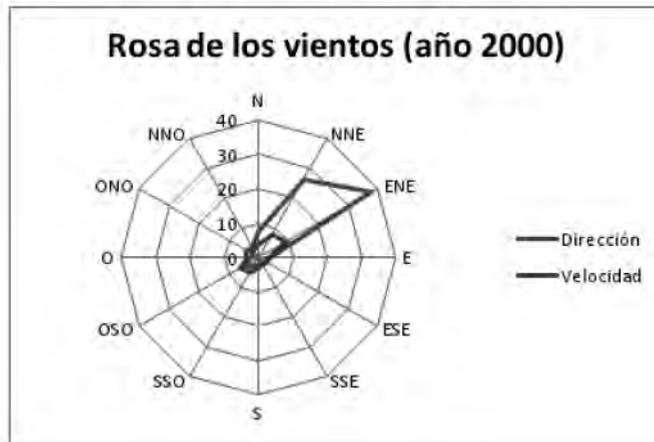


FIGURA 8: Rosa de los vientos.

FUENTE: Elaboración propia.

A partir del conocimiento estadístico del viento en un punto, y de la curva de potencia de un aerogenerador, puede calcularse la energía eléctrica producida por este (o por un conjunto

de estos, conformando un parque eólico), y sus variaciones estacionales (mensuales) y horarias¹³: En la figura 9 se presenta la curva de potencia del aerogenerador EnerconE-82 y unas vistas del mismo.

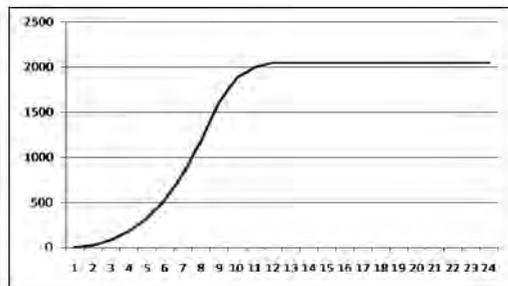


FIGURA 9: Curva de potencia del aerogenerador (Enercon E-82 2.0 MW) y parque eólico

FUENTE: Catálogos de la empresa ENERCON

En la figura 10 se muestra la evolución estacional (mensual) de la energía eléctrica producida (kWh) por un parque eólico típico de las islas canarias, donde se observa una mayor producción en los meses de verano:

En cuanto a los costes de la energía producida en estos parques dependen por un lado de los costes de inversión y de explotación y por otro del potencial eólico de la zona de instalación.

¹³ RAMÍREZ, P. (2006).

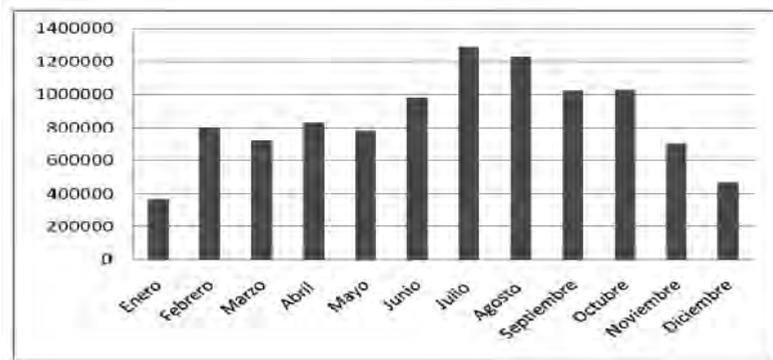


FIGURA 10: Evolución mensual de la potencia de un parque eólico genérico.

FUENTE: Elaboración propia.

En la actualidad, los costes de inversión se estiman en 1.200 € el kW instalado, mientras que los costes de explotación se estiman en un 2 % del valor de la inversión.

Con estos valores, el coste medio de generación de 1 kWh eléctrico a partir del viento se eleva en Canarias a una media entre 0,04 y 0,07 €/kWh, dependiendo de la zona, que como puede observarse es similar al coste de generación térmico convencional actual (obviamente, sin considerar los costes externos, en cuyo caso el coste térmico sería mucho mayor).

5. LA DESALACIÓN DE AGUA DE MAR CON ENERGÍAS RENOVABLES EN CANARIAS. TRABAJOS EFECTUADOS

El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria fue pionero en el mundo de estudios teóricos encaminados a determinar las posibilidades de la desalación de agua de mar con energía eólica, a gran escala.

Estos estudios formaban parte de un proyecto mucho más ambicioso, denominado CANARIAS EÓLICA 2000¹⁴, cuyo punto de partida fue la determinación del potencial eólico de las islas.

¹⁴ CALERO, R. y CARTA, J. A. (2004), 32, pp. 1185-1197

En este marco de investigación se diseñó y analizó el comportamiento de tres sistemas de desalación de agua de mar con accionamiento eléctrico, para acoplarlos a parques eólicos en forma aislada: tales fueron la Ósmosis Inversa, la Electrodiálisis Reversible y la Compresión de Vapor¹⁵.

El estudio comprendió una fase teórica con la construcción del correspondiente modelo matemático de todas las alternativas de sistemas parque eólico-planta desaladora modulada y aislada de la red eléctrica, y otra fase experimental¹⁶, donde se ensayaron y evaluaron los diferentes sistemas del modelo teórico para contrastar su viabilidad y comprobar los resultados teóricos.

Fase teórica:

En la fase teórica se simularon parques eólicos de diferentes potencias (distintos tipos de aerogeneradores, y en diferente número) y diferente tipo y número de plantas desaladoras. En la figura 9 se presenta un esquema sinóptico del conjunto de los sistemas simulados.

Una parte importante de esta fase se centró en los estudios de parques eólicos acoplados a plantas de ósmosis inversa, por la mayor versatilidad de estas.

Así, desde el punto de vista del funcionamiento estas plantas se consideraron dos alternativas: la primera consistió en una planta «modular», compuesta de varios módulos de igual capacidad (cada uno de ellos constituyendo una auténtica planta desaladora), que se van acoplando o desacoplando (arrancando y parando) de acuerdo con la potencia eólica disponible en cada momento y funcionando todas ellas en régimen nominal (a caudal y presión constantes). La segunda suponía una planta tam-

¹⁵ CARTA, J. A. y CALERO, R. (1990), 9, pp. 90-95; CALERO, R. y CARTA, J. A. (1993).

¹⁶ CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2004), 161, pp. 33-48; CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2003), 75, 153-168; SUBIELA, V.; CARTA, J. A. y GONZÁLEZ, J. (2004), 168, 39-47; VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y FERNANDO CASTELLANO, F. (2001), 141, pp. 53-61; VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y FERNANDO CASTELLANO, F. (2004), 160, pp. 211-221.

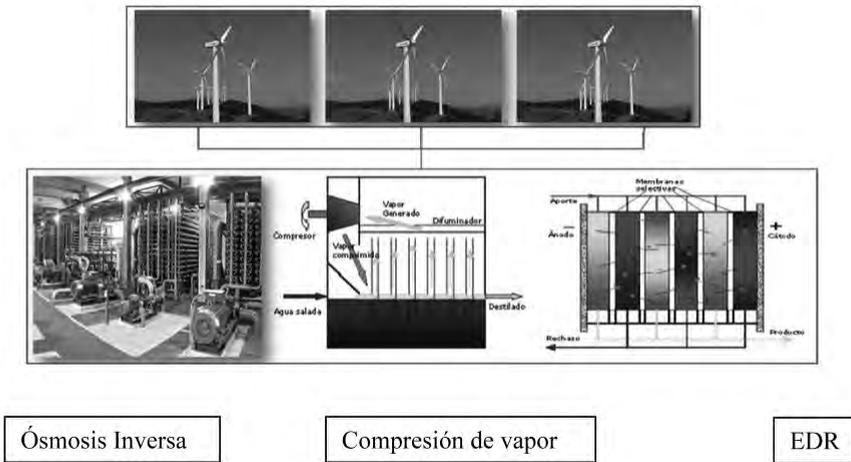


FIGURA 11: Esquema parque eólico acoplado a desaladoras (OI, CV, EDR).
 FUENTE: Elaboración propia.

bién modular, pero en la que las condiciones de trabajo (presión y caudal) de los diferentes módulos podían hacerse variar entre ciertos límites (lo que equivale a variar, dentro de un cierto rango, la potencia absorbida por los módulos, y con ellos, de la planta completa).

Desde el punto de vista de la producción de agua desalada se consideraron también dos alternativas: en la primera se contemplaba la máxima producción de agua desalada a partir de un parque eólico independiente del coste de producción y en la segunda la máxima producción de agua a coste mínimo.

Desde el punto de vista metodológico, el procedimiento de diseño del sistema parque eólico-planta desaladora de OI parte de la determinación previa de un parque eólico y de la energía eléctrica que este produce en un área determinada y a partir de ahí suponer diferentes combinaciones de plantas de OI moduladas funcionando en régimen constante (tamaño de cada módulo y número de éstos), calculando en cada caso la producción de agua resultante.

En cualquier supuesto es fácil entender que cuanto menores sean los módulos de desalación, más se aprovechará la energía

del parque (mejor acoplamiento entre las curvas de oferta y demanda).

Pero también ocurrirá que cuando descienda la potencia del parque eólico, muchos módulos de desalación quedarán inoperativos, y mucha más energía eólica será desaprovechada.

Por ejemplo, si el parque eólico tiene 10 MW, y se colocan 100 módulos de desalación de 100 kW cada uno, con una producción unitaria de 125.000 m³ al año, si el viento soplara con la máxima intensidad todo el año podrían obtenerse 12,5 Hm³/año. Cuando el viento desciende un poco su intensidad, se pararía un módulo y se perdería la capacidad de desalación correspondiente. Si siguiera descendiendo, se irían desconectando 2,3,4...n módulos sucesivamente. Sin embargo, si los módulos hubieran tenido cada uno de ellos una potencia de 500 kW, es obvio que una pequeña disminución de la intensidad del viento, que obligase a la parada del primer módulo hubiera supuesto una pérdida de producción de agua desalada mucho mayor, al tiempo que la energía eólica desaprovechada también sería mayor.

Sin embargo, si ahora se contempla el sistema parque-planta desde el punto de vista económico, es evidente que cuanto más pequeño sean los módulos (y por tanto, cuanto más numerosos), más costoso resultara el conjunto y más costosa el agua producida.

En el ejemplo anterior, de 100 módulos de 100 kW cada uno, acoplados a un parque eólico de 100 MW, es fácil suponer que los «últimos módulos» (por ejemplo, del número 80 en adelante) entrarán en funcionamiento muy pocos días al año (solo cuando el viento sople a una intensidad muy elevada). En consecuencia, si se prescindiese de esos módulos (sólo se instalan 80, por ejemplo), la producción de agua será menor al cabo del año, pero el precio de la planta también será menor. La consecuencia puede ser que el coste del m³ de agua producida también será menor.

El modelo matemático indicó que para cada «área eólica» (en la que se podía jugar con diferentes tipos de aerogeneradores y diferentes números de estos —cuanto más pequeños, más cabrían en el área—) había una combinación óptima entre

el tipo de aerogenerador y el tamaño y número de los módulos de desalación que producía la mayor cantidad de agua posible a un coste mínimo de la misma.

Dado los costes muy diferentes de los aerogeneradores y de las plantas de Ósmosis Inversa, la simulación también indicó que era preferible «desaprovechar» energía del parque eólico y «maximizar» el aprovechamiento de la planta de desalación de OI modulada. (Un factor de capacidad de la planta de desalación del 70 % frente a un factor de capacidad del parque eólico del 20 % serían valores más convenientes).

También se constató la alta sensibilidad del coste del m³ de agua desalada a la velocidad media anual del viento en el área del parque eólico.

En cualquier caso, para vientos medios superiores a los 7 m/s de media anual, los costes del agua eran similares a los obtenidos a partir de las energías fósiles (a los costes de éstas correspondientes al año 1990).

En la figura 12 puede verse el esquema general de trabajo en esta fase teórica:

Fase experimental:

En la fase experimental se construyó un parque eólico de dos aerogeneradores de 220 kW cada uno, un sistema de control del parque eólico aislado de la red compuesto de un volante de inercia y un generador síncrono, ocho plantas desaladoras de ósmosis inversa de 25 m³ día de capacidad, una planta de compresión de vapor de 90 m³/día u una planta de electrodiálisis reversible de 250 m³/día y un sistema de bombeo de agua de mar para suministrar a todas las plantas. Además, se desarrolló todo el software necesario para controlar todo el sistema y permitir su funcionamiento automático.

(La fase experimental se ejecutó con fondos del IV Programa Marco de la UE, con un coste superior a los 2 millones de euros, con la denominación de SEA WATER DESALINATION PLANTS CONNETED TO AN AUTONOMOUS WIND ENERGY SYSTEM (SDAWES). Participaron en el mismo la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, el Instituto Tecnológico de Canarias, la

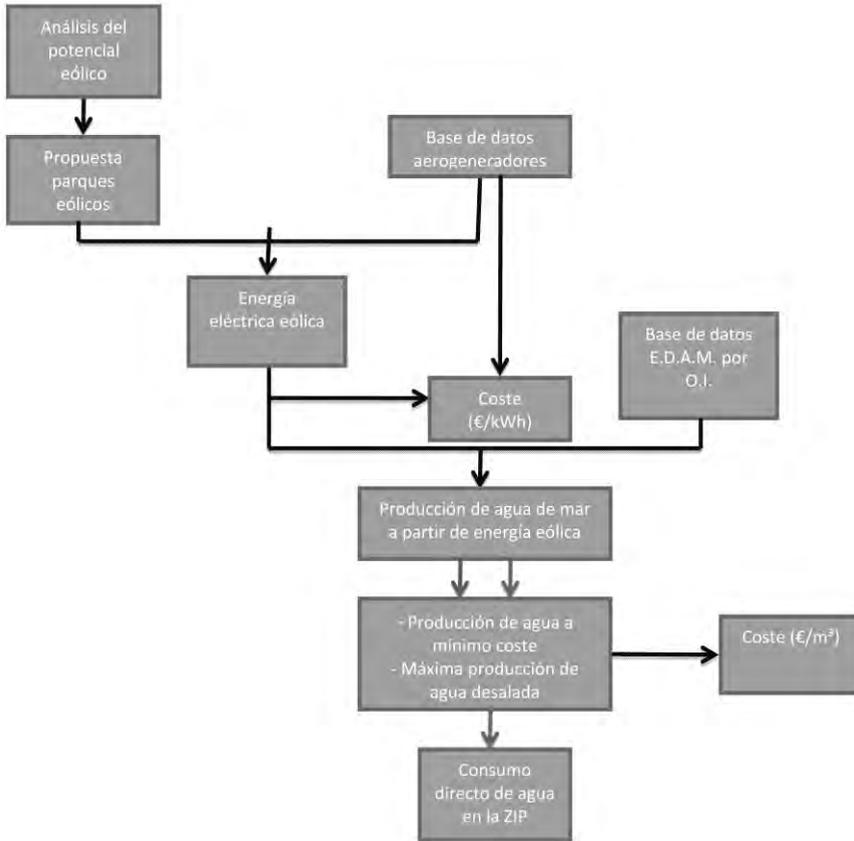


FIGURA 12: Esquema metodológico para la desalación de agua de mar a partir de energía eólica.

FUENTE: Elaboración propia.

empresa alemana ENERCON, el IER-CIEMAT de España, y los laboratorios NEL y CREST del Reino Unido¹⁷. En la figura 13 pueden verse algunos de los equipos implementados en el marco de este proyecto.

¹⁷ CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2004); CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2003); SUBIELA, V.; CARTA, J. A. y GONZÁLEZ, J. (2004); VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y CASTELLANO, F. (2001); VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y CASTELLANO, F. (2004)



FIGURA 13: Equipos experimentales del proyecto SDAWES
 FUENTE: Instituto Tecnológico de Canarias y Universidad
 de Las Palmas de Gran Canaria

Los estudios experimentales se llevaron a cabo en el antiguo Centro de Investigación en Energía y Agua (CIEA) del Instituto Tecnológico de Canarias, durante dos años, con excelentes resultados.

Como consecuencia de estos trabajos de laboratorio se comprobó la corrección del modelo teórico y se constató que el sistema de desalación por Ósmosis Inversa era el más apropiado para estos casos, desechándose los sistemas de Compresión de Vapor y Electrodialisis Reversible para la desalación de agua de mar a gran escala a partir de la energía eólica.

6. SISTEMA INTEGRADO DE PRODUCCIÓN DE AGUA DE MAR DESALADA A PARTIR DE ENERGÍA EÓLICA EN SISTEMAS AISLADOS DE LA RED ELÉCTRICA

Los trabajos efectuados con anterioridad no se extendieron al caso más real, en la mayoría de los casos, de determinar el máximo potencial desalador de una zona eólica determinada

(por ejemplo, de toda una isla), tanto en términos de máxima producción como de coste mínimo, así como tampoco el ajuste entre la producción de agua desalada con recursos eólicos, esencialmente variable a lo largo de todo el año, y la demanda de agua de esa zona, que también tendrá un determinado perfil.

Para tener en cuenta estos aspectos, el modelo de simulación se ha ampliado en este trabajo con el modelo de demanda y las capacidades de almacenamiento necesarias, para satisfacerla en cualquier momento del año. Es decir, se trata de determinar cual es la capacidad mínima de embalse necesaria para que el agua acumulada en los momentos de mayor producción permita el abastecimiento en los momentos en los que por falta de viento la producción sea inferior a la demanda.

En el gráfico representado en la figura 14 puede verse el esquema general metodológico para el diseño de estos sistemas integrados.

El modelo desarrollado en este estudio permite también responder a otra cuestión importante, cual es la definición del sistema parque eólico-planta desaladora de OI modulada-depósito regulador que permite satisfacer una demanda de agua determinada al mínimo coste.

7. APLICACIÓN A LAS ISLAS CANARIAS

A continuación se presentan los resultados alcanzados al aplicar el modelo de optimización de estos sistemas integrados (parque eólico-planta desaladora modulada de OI-depósito regulador) a un parque eólico de 100 MW (50 aerogeneradores de 2 MW cada uno), situado en el municipio de Santa Lucía de Tirajana, en la isla de Gran Canaria.

El perfil de la velocidad del viento en la zona es el típico del Alisio, con un valor medio anual relativamente elevado, como puede verse en la figura 15.

La aplicación de tales valores del viento a los aerogeneradores utilizados permite determinar la energía eléctrica mensual producida por el parque eólico (kWh), tal como se muestra en la figura 16.

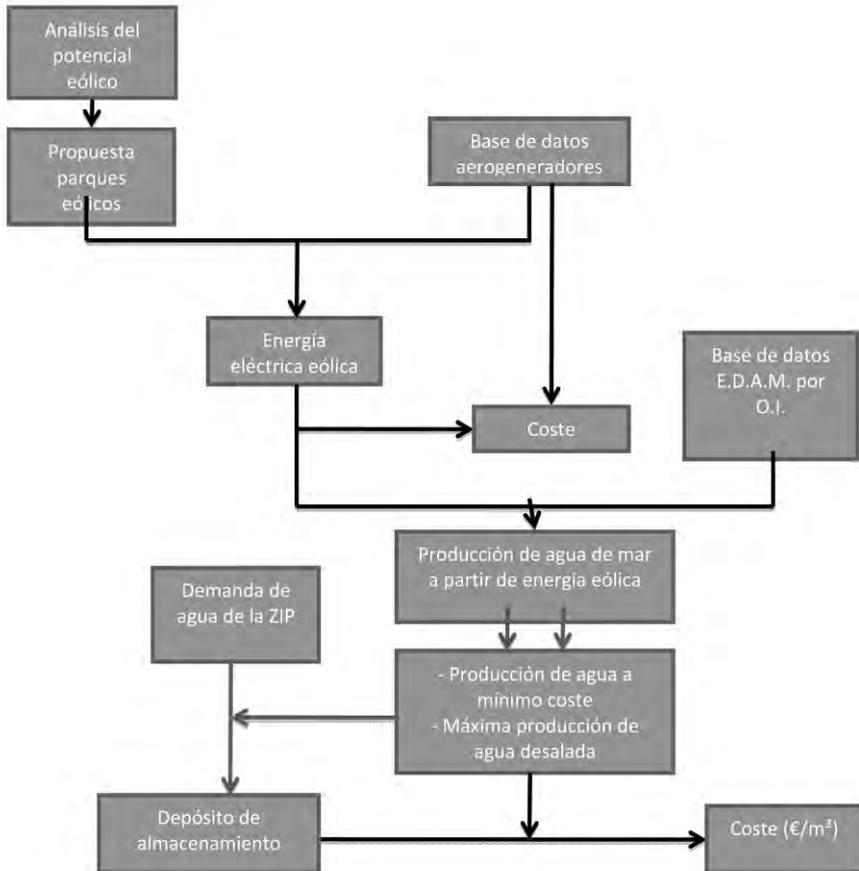


FIGURA 14: Esquema metodológico para la desalación de agua de mar a partir de energía en un sistema integrado que incluye el depósito regulador.

FUENTE: Elaboración propia.

El modelo de simulación indica que la producción máxima de agua se produce para una planta modulada compuesta por 60 módulos de 10.000 m³/día cada uno. El volumen de agua de mar desalada en el conjunto del año asciende a 134.512.083 m³ (superando en un 60 % la producción total de agua desalada en la isla de Gran Canaria en el año 2007, o en un 30 % de capacidad de todos los embalses de agua de esta isla).

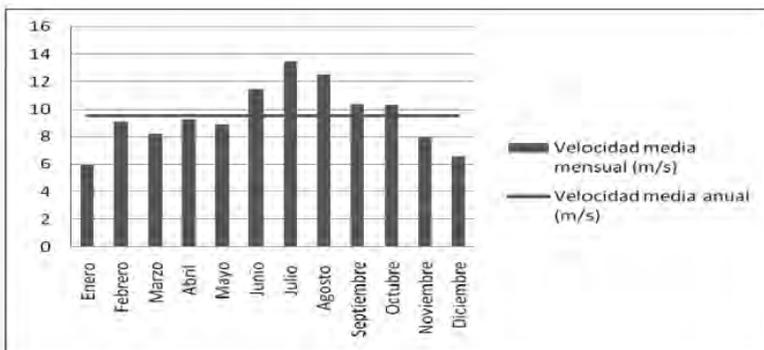


FIGURA 15: Valores mensuales y medio anual de la velocidad del viento en la zona.

FUENTE: Elaboración propia.

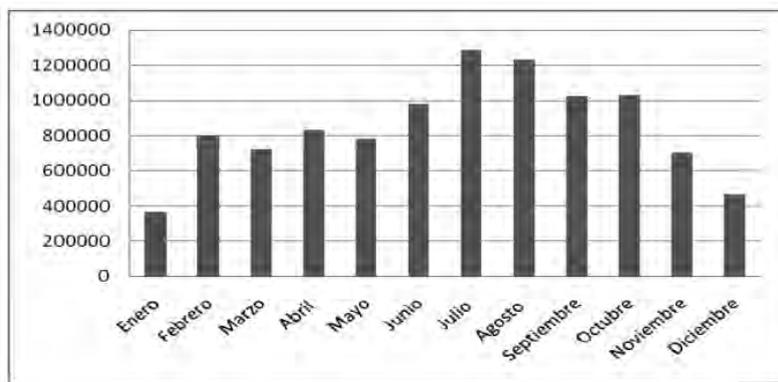


FIGURA 16: Valores mensuales de la energía eléctrica producida por el parque eólico (kWh).

FUENTE: Elaboración propia.

La evolución mensual de la producción (m³) de los 60 módulos es la mostrada en la figura 17.

Debido a las oscilaciones de la potencia del parque eólico, el porcentaje de tiempo que cada módulo se encuentra en funcionamiento depende del número de módulos instalados, como se observa en la figura 18.

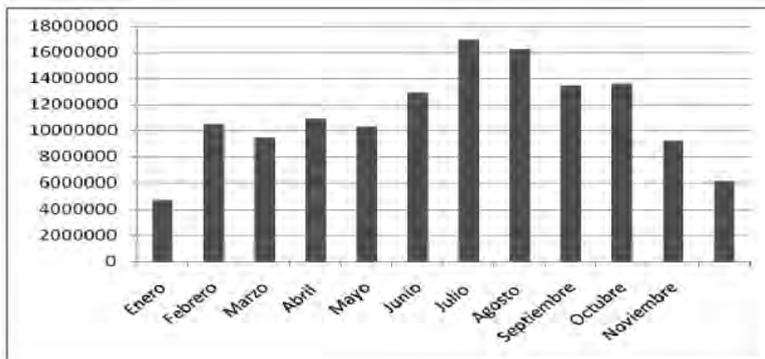


FIGURA 17: Producción mensual de agua desalada a partir del parque eólico.

FUENTE: Elaboración propia.

Como se ve en la figura 18 el último módulo estará funcionando el 28 % del tiempo (102 días al año), manteniéndose el resto del tiempo sin producir agua, mientras que el primer módulo funcionará a régimen nominal el 90 % del tiempo, lo que supone que estará en funcionamiento 330 días al año.

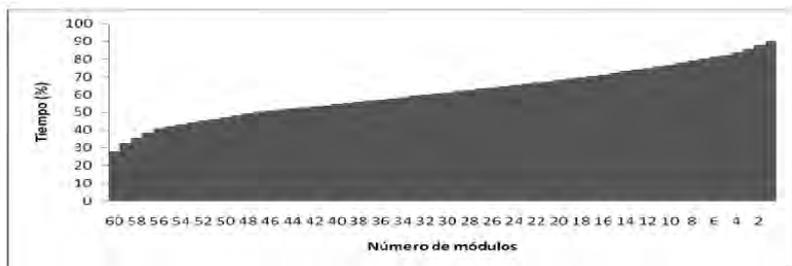


FIGURA 18: Porcentaje de tiempo que cada módulo se encuentra en funcionamiento.

FUENTE: Elaboración propia.

Teniendo en cuenta los costes de inversión, de explotación y de mantenimiento del conjunto del parque eólico y el sistema de plantas desaladoras, el m³ costará 0,658 €.

En la tabla siguiente se representa el resumen de los valores obtenidos en este supuesto de máxima producción:

Costes desalación				
Tamaño (m ³ /d)	Caudal (m ³ /año)	Energía perdida (kWh)	Nº Módulos	Coste (€/m ³)
10.000	134.512.083	6.928.738,7	60	0,658

También se aprecia en la figura 19 como varía la energía perdida mensualmente, y que ésta es mayor en los meses de más producción eólica.

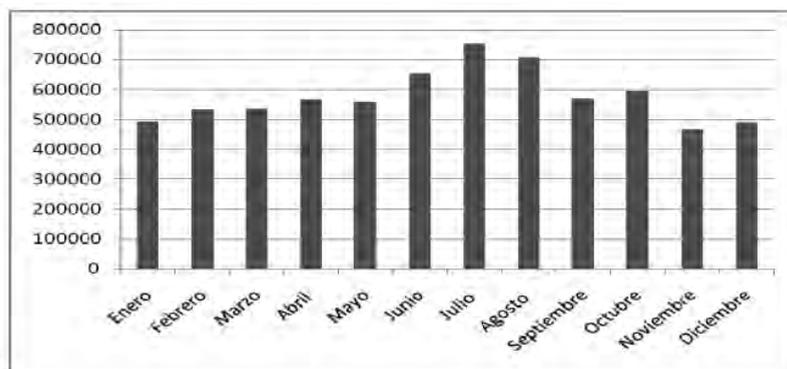


FIGURA 19: Energía perdida cada mes (kWh).

FUENTE: Elaboración propia.

Dado que muchos de los módulos entran en funcionamiento muy pocas horas al año, es posible estudiar como disminuye la producción al ir eliminando los módulos menos productivos, y cuanto disminuye consecuentemente el coste de la instalación, para obtener el valor mínimo del m³ de agua desalada, es decir, la máxima producción al mínimo coste.

La primera consecuencia de disminuir el número de módulos es el aumento de la energía del parque eólico que no es aprovechada. En la figura 20 se representa la energía no aprovechada a medida que disminuye el número de módulos.

En el gráfico de la figura 21 se representa el volumen anual de agua desalada en función del número de módulos disponi-

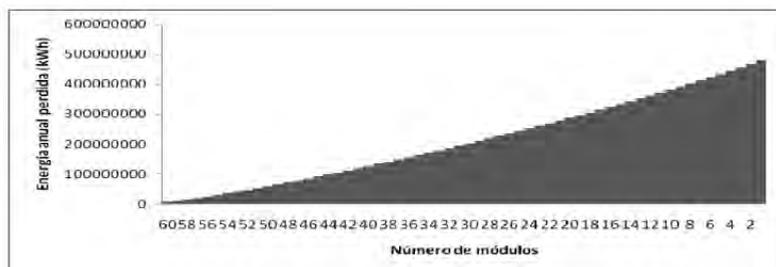


FIGURA 20: Variación de la energía no utilizada al variar el número de módulos.

FUENTE: Elaboración propia.

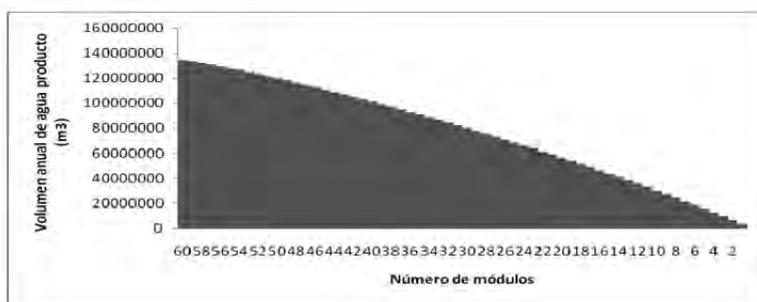


FIGURA 21: Variación de la producción de agua desalada al variar el número de módulos.

FUENTE: Elaboración propia.

bles, donde se observa como va bajando la producción a medida que desciende el número de módulos.

A partir de los valores anteriores, y con la incorporación de los costes asociados al parque eólico y el coste correspondiente a cada arreglo de la planta desaladora, se obtiene una curva que representa el coste por metro cúbico de agua desalada en función del número de módulos (figura 22).

Debido al alto coste del agua producto cuando solo se considera un módulo, el gráfico de la figura 22 enmascara el comportamiento real de un posible coste mínimo. Para evitar esta distorsión gráfica, en la siguiente figura 23 se ha representado la variación de los costes para el intervalo entre 28 y 60 módu-

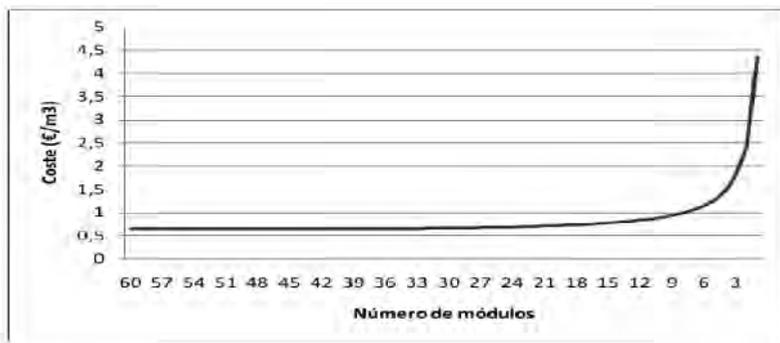


FIGURA 22: Evolución del coste del m³ de agua desalada en función del número de módulos.

FUENTE: Elaboración propia.

los, viéndose claramente que existe un valor mínimo para el coste.

Como se observa claramente en la figura 23, a medida que el número de módulos aumenta los costes de producción van disminuyendo, pasan por un mínimo de 0,647 €/m³ para 47 módulos y luego comienza a incrementarse de nuevo.

(Es preciso recordar que el coste para máxima producción ascendía a 0,658 €).

En el caso de emplear solo 47 módulos, el volumen de agua desalada desciende a 114.649.167 (frente a los 134.512.083 en el

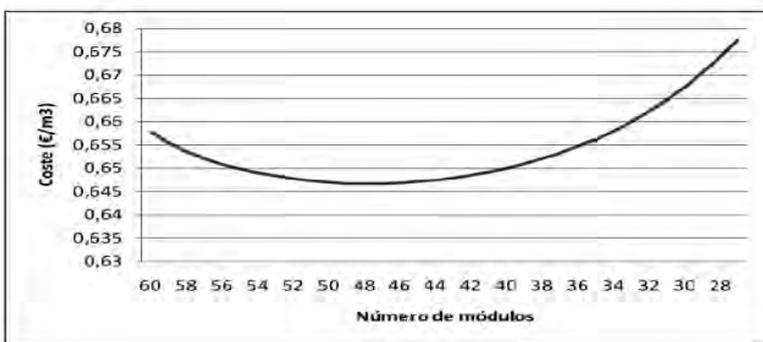


FIGURA 23: Valores mínimos del coste del agua desalada.

FUENTE: Elaboración propia.

caso de máxima producción), con la evolución mensual que puede verse en la figura 24.

Como puede observarse, la cantidad de agua desalada para coste mínimo supera en un 33 % el total de agua desalada en la isla de Gran Canaria en el año 2007, y en un 14 % la capacidad de todos los embalses de la isla.

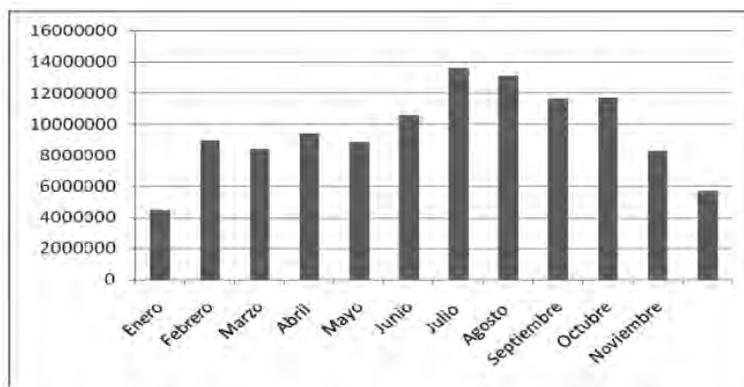


FIGURA 24: Volumen de agua mensual desalada (m³) en el supuesto de mínimo coste.

FUENTE: Elaboración propia.

Como es lógico, el porcentaje de tiempo que cada módulo se encuentra en funcionamiento se eleva considerablemente respecto del caso de máxima producción, de manera que los 47 módulos funcionarán el 50,34 % del tiempo, lo que supone que estarán funcionando 184 días al año. (Figura 25) (Esto supone un mayor aprovechamiento de las plantas desaladoras).

En este caso, la energía perdida se incrementa, frente al caso de máxima producción, como se ve en la figura 26 (mayor desaprovechamiento del parque eólico).

En la siguiente tabla se resumen los resultados para mínimo coste:

Suponiendo que la producción de esta agua se destina a cubrir una demanda constante, es decir, una demanda de 313 248 m³/día equivalente a 13 052 m³/hora, puede calcularse el

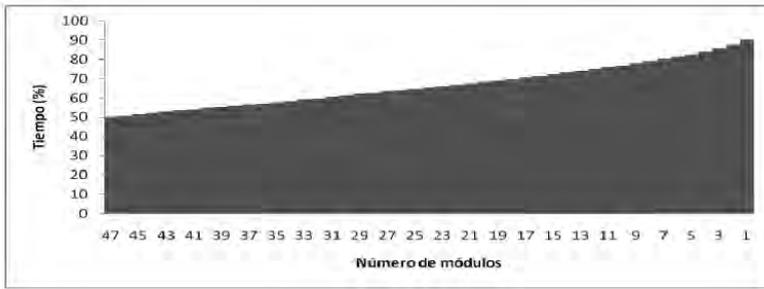


FIGURA 25: Tiempo de funcionamiento de cada uno de los módulos.
FUENTE: Elaboración propia.

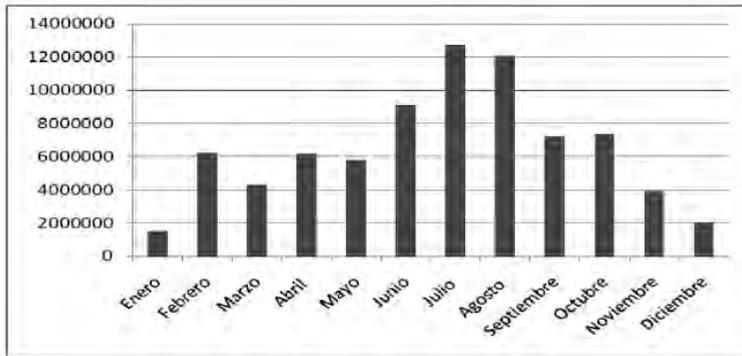


FIGURA 26: Energía perdida cada mes (kWh) para mínimo coste.
FUENTE: Elaboración propia.

COSTES DESALACIÓN				
Tamaño de módulos	Volumen anual (m ³)	Energía perdida (kWh)	Número de módulos	Coste (€/m ³)
10.000	114.649.167	78.435.239	47	0,647

volumen de depósito necesario para cubrir todo el año, es decir, el volumen máximo que debe ser acumulado en los meses de mayor producción (verano, en el caso de Canarias) para sumi-

nistrar la demanda en los meses de menor producción o periodos sin viento.

Del análisis realizado se obtiene que el volumen del depósito de acumulación de agua es de 12,67 Hm³, representándose en la figura 27 la situación del depósito en los diferentes meses del año.

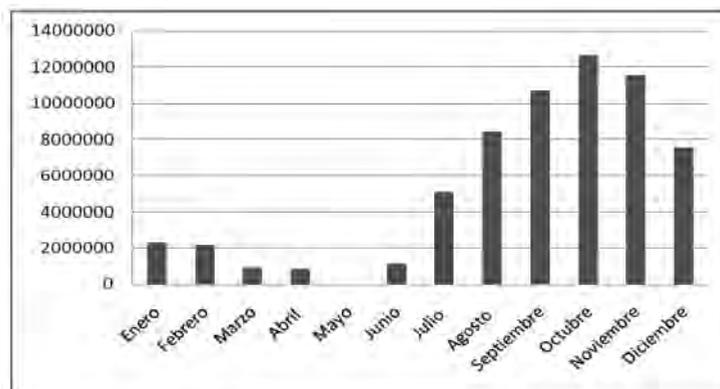


FIGURA 27: Evolución del agua en el depósito regulador.

FUENTE: Elaboración propia.

Como puede verse, en los meses de mayor producción de agua el depósito se llena (junio a octubre) y en el resto de meses el nivel de los depósitos va disminuyendo para satisfacer la demanda cuando la producción de agua de la desaladora modular no es la suficiente, completándose el proceso en Mayo cuando el depósito se vacía.

Estimando un coste de depósitos de 2,69 €/m³ y un coste de explotación y mantenimiento de 0,015 €/m³, es posible determinar el coste por metro cúbico del sistema compuesto por parque eólico de 100 MW, planta desaladora de ósmosis inversa modular (47 módulos) y depósito de acumulación, que se eleva a 0,688 €/m³.

(Este coste ha sido calculado sin ningún tipo de subvención).

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos:

COSTES DESALACIÓN				
Tamaño de módulos	Volumen anual (m ³)	Energía perdida (kWh)	Número de módulos	Coste (€/m ³)
10.000	114.649.167	78.435.239	47	0,688

8. CONCLUSIONES

Como se desprende de lo expuesto en este trabajo, la desalación de agua de mar con el uso exclusivo de la energía eólica, incluyendo los depósitos de acumulación, es factible tanto técnica como económicamente.

Los valores mostrados se refieren a un parque eólico de 100 MW, que supone menos de un 20 % de la energía eólica susceptible de ser instalada en la isla de Gran Canaria.

Esto significa, ni más ni menos, que con estos sistemas pueden cubrirse todas las demandas de agua potable de la isla, y por tanto asegurar el abastecimiento de la población y la agricultura cualquiera que sea el régimen de lluvias y con total independencia del precio que alcance el petróleo en el futuro.

Se trata, por otro lado, de una producción totalmente limpia en cuanto a su impacto sobre el medioambiente y que permite descargar la presión sobre el acuífero de la isla, permitiendo la recuperación de éstos y la consecuente recuperación del medio biótico insular, fuertemente afectado por la falta de agua.

Esta situación es extrapolable a todas las Islas Canarias, y especialmente a las que padecen más graves problemas de suministro de agua, como son Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria y Tenerife.

Las repercusiones económicas, ambientales y sociales de la desalación de agua de mar, a gran escala, con el único concurso de la energía eólica, serán trascendentales para el futuro de Canarias, en un escenario muy probable de crisis generalizadas en todo el mundo.

Asumiendo un escenario en 2020 de una población estabilizada en torno a 2.100.000 personas, una afluencia turística estabilizada en torno a los 8.000.000 de visitantes al año, una

economía más equilibrada y con mayor peso de los sectores primario (más tecnificado y «libre de carbono») y del industrial, el consumo de agua en toda Canarias podría estabilizarse en torno a los 550 Hm³, incluyendo el uso generalizado de sistemas de ahorro de agua, tanto para uso humano como en la agricultura.

Estos consumos, como se ha demostrado, son susceptibles de ser suministrados a partir de una parte relativamente pequeña de la energía eólica disponible en el conjunto de la región.

En tales condiciones, y a expensas de efectuar los oportunos estudios en todas y cada una de las islas, la desalación de agua de mar a partir de energía eólica para cubrir un 70 % de toda esa demanda (385 Hm³) puede suponer un ahorro de más de 1.540.000 MWh/año, o de 370.000 Tn/año de petróleo cada año y, consecuentemente, de más de 925.000 Tn de CO₂ también cada año.

En términos económicos, y en un escenario de 80 \$/barril en 2020 (417,56 €/Tn) se alcanzaría la cifra de 154,5 millones de euros ahorrados cada año, mientras que en un escenario más probable de 200 \$/barril (1.036 €/Tn) el ahorro conseguido superaría los 383,3 millones de euros cada año.

En resumen, un futuro mucho más sostenible para toda la región canaria.

9. BIBLIOGRAFÍA

- CALERO, R. y CARTA, J. A. (1993). «Valoración económica del uso de la energía eólica a la desalación». Seminar on wind energy in Southern Europe. Puerto de Santa María, Cádiz, Spain, 11-13 November.
- CALERO, R. y CARTA, J. A. (2004). «Action plan for wind energy development in the Canary Islands». *Energy Policy*, 32, pp. 1185-1197.
- CARTA, J. A. y CALERO, R. (1990). «Cuantificación de la máxima producción de agua de mar desalada con energía eléctrica de procedencia eólica en Fuerteventura». *Dinámica*, 9, pp. 90-95.
- CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2003). «Operational analysis of an innovative wind powered reverse osmosis system installed in the Canary Islands». *Solar Energy*, 75, pp. 153-168.
- CARTA, J. A.; GONZÁLEZ, J. y SUBIELA, V. (2004). «The SDAWES project: an ambitious R&D prototype for wind-powered desalination». *Desalination*, 161, pp. 33-48.

- HERNÁNDEZ, P. (2003). *Natura y Cultura de Las Islas Canarias*. Tafor Publicaciones.
- ISTAC. *Evolución del consumo total de agua en Canarias*. <http://www2.gobierno.decanarias.org/istac/estadisticas.html>
- ITC. *Recurso eólico de Canarias*. <http://www.itccanarias.org/recursoeolico/>
- RAMÍREZ, P. (2006). *Modelado estadístico de las características del viento para su evaluación energética. Aplicación a las Islas Canarias*. Tesis doctoral de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- SADHWANI, J. y VEZA, J. M. (2008). «Desalination and energy consumption in Canary Islands». *Desalination*, 221, pp. 143-150.
- SUBIELA, V.; CARTA, J. A. y GONZÁLEZ, J. (2004). «The SDAWES project: lessons learnt from an innovative Project». *Desalination*, 168, pp. 39-47.
- SYNCONSULT, SL y AICASA. (1997). Inventario de plantas desaladoras en Canarias, pp. 1-68. http://www.agua.ulpgc.es/documentos_pdf/td1431_0000.pdf
- SYNCONSULT, SL y AICASA. (1998). Plan hidrológico del Archipiélago Canario. Proyecto Canarias Agua-2000. 1-77 http://bdigital.ulpgc.es/mdc/texto/pdf/td1465_0000.pdf
- VEZA, J. M. (2001). «Desalination in the Canary Islands: an update». *Desalination*, 133, pp. 259-270.
- VEZA, J. M.; GÓMEZ, A. y PÉREZ, J. (1992). «Desalination technology in the Canary Islands, 1990». *Desalination*, 85, pp. 147-159.
- VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y FERNANDO CASTELLANO, F. (2001). «Electrodialysis desalination designed for wind energy (on-grid tests)». *Desalination*, 141, pp. 53-61.
- VEZA, J. M.; PEÑATE, B. y CASTELLANO, F. (2004). «Electrodialysis desalination designed for off-grid wind energy». *Desalination*, 160, pp. 211-221.