

Pasado, presente y futuro de la desalación en España

Desalination in Spain. Past, present and future

Cabrera, E.^{a1}, Estrela, T.^{id a2, b} y Lora, J.^{id a3}

^a Universitat Politècnica de Valencia. Camino de Vera s/n, València, España. ^{a1}ecabrera@ita.upv.es, ^{a3}jlor@iqn.upv.es.

^b Confederación Hidrográfica del Júcar. Avenida Blasco Ibáñez 48, València. teodoro.estrela@chj.es. España

Recibido: 31/03/2019

Aceptado: 06/06/2019

Publicado: 31/07/2019

Citar como: Cabrera, E., Estrela, T., Lora, J. (2019). Desalination in Spain. Past, present and future. *Ingeniería del agua*, 23(3), 199-214. <https://doi.org/10.4995/la.2019.11597>

RESUMEN

Se repasa, en el marco del contexto mundial, la evolución de la desalación en España. Una historia de más de medio siglo que arrancó donde el agua más escasea, en las Islas Canarias. Lo que comenzó siendo una solución puntual para resolver problemas concretos ha ido, al compás de los avances tecnológicos, de la reducción de costes y del control de su impacto, ganando relevancia. Pero hace quince años, el ritmo de implantación, se aceleró notablemente. En aquel contexto se tomaron rápidas decisiones, adoptadas sin el amplio consenso que requieren este tipo de infraestructuras. Sin embargo, la madurez tecnológica y, sobre todo, el tiempo están contribuyendo a clarificar la situación, propiciando que cada desaladora encuentre su lugar y, en fin, justificando la fuerte inversión efectuada. Con todo hay problemas aún pendientes de solución, en particular la incorporación de esta nueva fuente de agua en un sistema que integre todos los recursos, tanto los tradicionales como los nuevos. Ello exige que los usuarios acepten su sobrecoste como un nuevo seguro hídrico que permita garantizar el suministro de agua en todo momento. En cualquier caso, hay que concluir que la desalación en España juega, y continuará jugando un papel clave en el litoral mediterráneo y en algunas de sus islas más turísticas.

Palabras clave | desalación; nexo agua-energía; sequía; gestión de la demanda; recuperación de costes.

ABSTRACT

A summary of the evolution of desalination in Spain, in the worldwide context, spanning over half a century of history, follows. What started as a solution to resolve occasional water shortages in islands where natural surface and ground water resources were scarce, has gained more relevance with technological advancements, less expensive production costs and, at the same time, minimizing the impact on the environment. But fifteen years ago, the normal pace of history underwent an about-turn with the sudden construction of a significant number of desalination plants. The speed and, on occasions, the haste involved in many of the decisions, brought about some imbalance between the different players that were involved. Time, and above all, technological maturity have clarified the situation, and most of the desalination plants that were built have managed to find their place, thus justifying the investment that was made. But there are still some stages to address, particularly that of integrating these plants in the joint water resource operation systems. In this regard, consumers must accept that desalination plants competing with traditional water resources, greatly improve the guarantee of supply, and in fact act as a new water insurance that, indeed, has a cost. Today however, and particularly in the future, desalination in Spain plays and will continue to play an essential role, especially in the southeast Mediterranean region and in some of the more touristic islands.

Key words | desalination; water-energy nexus; drought; demand management; cost recovery.

INTRODUCCIÓN: EL DESPERTAR DE LA DESALACION EN ESPAÑA

Con más de medio siglo, la desalación en España ya tiene una notable trayectoria. Una descripción excelente, ligando el recorrido histórico con la evolución de los procesos y las tecnologías, se puede seguir en Torres (2008), trabajo en el que se basa el resumen que sigue. Todo comienza en 1964, año de construcción en Lanzarote (por iniciativa privada y en busca del desarrollo turístico de la isla) de la primera planta. Con una capacidad de producción modesta (2000 m³/día), su intensidad energética (>50 kWh/m³) sería hoy inasumible. Su proceso, la evaporación.

El éxito de Lanzarote anima a las islas vecinas más secas (Fuerteventura y Gran Canaria) y a la ciudad de Ceuta que, aisladas de la península y con problemas de suministro de agua, ven en la desalación la posibilidad de ser autosuficientes. De este modo, al inicio de la década de los setenta, y ya promovidas desde la administración, comienza la construcción de esas plantas. Sus capacidades (Ceuta, 4000 m³/día, Fuerteventura 4000 m³/día) siguen siendo bajas. No así la de Gran Canaria que, con 20000 m³/día, puede alimentar una población superior a 1×10⁵ habitantes. A mediados de la década, estas plantas están activas y trabajando satisfactoriamente. Prueba del éxito es la ampliación de la pionera planta de Lanzarote que aumentará, con idéntico proceso, su capacidad hasta 5000 m³/día. En la segunda mitad de esta década, y con estas plantas trabajando correctamente, el sector turístico ve en la desalación la solución a sus problemas, de modo que estas tres islas orientales acometerán la ampliación de su capacidad desaladora.

Son los años que siguen a la primera gran crisis del petróleo (1973). El coste energético es un lastre pesado, y aunque la eficiencia de las plantas ha ido mejorando (hacia 1980 la intensidad energética es la mitad, 25 kWh/m³), el coste del agua, ligado al de la energía, se ha disparado. Sólo la falta de alternativas o la proximidad de centrales térmicas que suministren agua caliente a bajo coste, las justifica. Así nace en Almería, una de las zonas más secas de España, la primera desaladora peninsular, la de Carboneras, anexa a la central térmica del mismo nombre. Con una capacidad discreta (2200 m³/día), entrará en funcionamiento en 1980. Pero tendrá una corta vida porque la evaporación, el proceso entonces habitual, tiene los días contados. En los primeros años de esta década, la osmosis inversa (OI) irrumpirá con fuerza y, desde entonces, es el proceso utilizado. Sólo cuando la fuente de alimentación es agua salobre se recurre, en algunos casos, a la electrodiálisis reversible (EDR, *electrodialysis reversal*).

En los veinte años que siguen (décadas de los ochenta y noventa) apenas hay cambios aunque, eso sí, comienza la era de la OI. Siguen construyéndose, a ritmo pausado aunque constante, nuevas plantas. Tres más en las islas Canarias orientales y la llegada de la desalación a las Baleares más secas (Ibiza, 1995; Mallorca, 1998) y al litoral mediterráneo al que una severa sequía (entre 1992 y 1995) había afectado al suministro urbano. En particular Málaga y Almería. También comienza la construcción de plantas desaladoras de agua salobre continental. Como la de Denia (6000 m³/día), en 1990, que capta el agua de un río anexo. Desalar agua continental (acuíferos salinizados) tiene dos ventajas, menor coste (más adelante se verá) debido a la menor salinidad del agua (1.5-5 g/l, muy inferior a la marina, 35 g/l), y la posibilidad de construir plantas alejadas de la línea de costa. Los inconvenientes derivan de la necesidad de disponer de una fuente de suministro segura en el tiempo.

La agricultura no será ajena a este despertar. De una parte, los costes de desalar el agua salobre son notablemente inferiores y de otra, determinados suelos y cultivos tienen notable tolerancia a la salinidad, asunto bien estudiado por la ingeniería agronómica. Y así, por debajo de 0.77 g/l, se considera agua de buena calidad. De calidad media entre este valor y 2.24 g/l, y sólo para valores superiores es de mala calidad (Ruiz, 2005). No puede extrañar, pues, que tras la sequía del 1992-95, la agricultura de alto valor añadido del sureste mediterráneo (Alicante, Murcia y Almería) optaran por aumentar la garantía del riego. Se estima (Zarzo et al., 2013) que entre 1995 y 2000 se construyeron más de 200 plantas desaladoras con capacidades comprendidas entre los 500 m³/día y los 10000 m³/día.

EL PUNTO DE INFLEXION

Este fluir de los hechos con un racional y pausado crecimiento verá, al ganar en marzo del año 2004 el partido socialista las elecciones, un punto de inflexión. Antes, en Julio de 2001, el gobierno, entonces del partido popular, había aprobado (BOE, 2001) la Ley del Plan Hidrológico Nacional, cuyo eje principal era el trasvase del Ebro. Los preparativos para materializar esta

notable obra siguen dos líneas de trabajo, la técnico-económica y la financiera, esta última basada en utilizar los generosos fondos europeos de aquel entonces. Pero en la primavera del 2004, la primera decisión del nuevo gobierno socialista es derogar el trasvase (BOE, 2004) lo que exigirá recolocar los fondos europeos ligados al trasvase (una parte importante se destinarán a la desalación). El nuevo Plan, detallado por el Programa Global de Actuaciones para la Gestión y Utilización del Agua (AGUA), se desarrollará en las dos legislaturas socialistas siguientes (2004 a 2011). El Plan AGUA (Figura 1), incluía la construcción de numerosas desaladoras de capacidad muy variable (desde 80 hm³/año en Torrevejea hasta 3.5 hm³/año en Ciudadela). Y con una inversión notable, unos 2000 millones de euros.

No es del caso recordar ni valorar las turbulencias que aquellas idas y venidas generaron. Tan sólo conviene mencionar las prisas inherentes a los cambios porque aún se perciben sus consecuencias. No en el diseño y ejecución de las plantas, sino en su dimensionado (en los años previos a la gran recesión que se inició en el año 2008, las demandas se sobreestimaron) y en la deficiente programación de infraestructuras auxiliares, algunas aún pendientes de ejecución. Y así, la mayor planta, Torrevejea, se acabó sin disponer de un suministro eléctrico suficiente (necesita más de 60 MW), aún pendiente de completar. La menor, Ciudadela, en el noroeste de Menorca, se acabó sin la tubería que debe conectar la planta y el núcleo de consumo que más la necesita, la ciudad de Mahón, actualmente abastecida con acuíferos con elevadas concentraciones de nitratos. Sigue pendiente. Y las que no han tenido problemas, caso de Barcelona, al no haberse integrado en el conjunto de recursos hídricos tradicionales, están prácticamente paradas. Un grave problema pues con costes de producción y funcionamiento superiores a los de los recursos tradicionales, tan pronto estos se recuperan, las plantas apenas operan. Sólo trabajarán a plena carga si una sequía lo requiere.

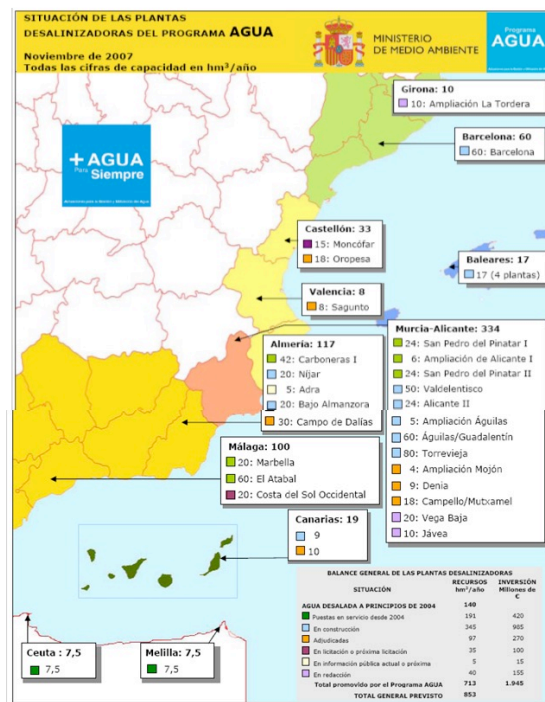


Figura 1 | El Plan AGUA Plan (Araus, 2007).

El rápido crecimiento español guarda un cierto paralelismo con el de Australia. Como respuesta a una severa sequía (años 2004 a 2008) se programó un ambicioso plan de construcción de desaladoras (se invirtieron 7000 M€), elevando notablemente su capacidad de producción. A finales de 2012 se aproximaba a 700 hm³/año (ATSE, 2012) cuando diez años antes era casi irrelevante. El plan tampoco ha sido ajeno a la polémica, particularmente en Sídney, un caso bien documentado (Giurco et al., 2014), si bien el debate allí planteado fue diferente al de España (trasvase o desalación). En Sídney la discusión se centró entre ahorro y gestión de la demanda o desalación. Y fueron los políticos quienes, en el marco de una severa sequía, apostaron por la desalación. Con posterioridad se ha reconstruido la polémica de modo singular: analizando las noticias publicadas por los medios de

comunicación entre 2004 y 2012 (Giurco et al., 2014). Las etapas de la polémica evidencian cómo los discursos se iban adecuando a las circunstancias del momento (sequía o disponibilidad de recursos tradicionales). Y aún sigue viva.

Todo ello evidencia que los problemas de la desalación son similares, aquí y en nuestras antípodas. Si el agua desalada es una fuente de suministro insustituible, la aceptación es inmediata y universal. Pero si debe convivir con los recursos tradicionales, y sólo es estrictamente necesaria en periodos secos, con la actual cultura hídrica, la controversia está servida. Su elevado consumo energético dispara los costes de producción y ése, precisamente, es el argumento más utilizado para cuestionar las desaladoras, razón por la que sus promotores vienen prestando la mayor atención a reducir el gasto energético. Y, aunque mucho se ha avanzado, más adelante se verá, éste sigue siendo alto. También la sobreestimación de la demanda en los años previos a la crisis, y las urgencias por tener que materializar una formidable inversión en un plazo de tiempo record han contribuido, y contribuyen, a ralentizar la entrada en servicio de algunas de las plantas construidas. Con todo, el paso del tiempo está evidenciando su importancia en los recurrentes periodos de escasez de lluvias, tan propios de las áreas mediterráneas. Y es previsible que, con el cambio climático, su frecuencia aumente.

EL CONTEXTO SOCIOECONÓMICO – AMBIENTAL ACTUAL

El paso del tiempo y la recuperación económica está resolviendo muchos de los problemas derivados de las prisas. Pero sigue perviviendo el elevado coste de la energía, probablemente el mayor obstáculo, sobre todo al comparar el coste de la desalación con el de las fuentes de agua tradicional. Mientras que en el primer caso los usuarios recuperan todos los costes, en el segundo no es siempre así. Y como el precio del agua desalada está ligado al de la energía (pocos ejemplos del nexo agua – energía, Cabrera et al., 2010, son tan claros), la competencia es desigual. La figura 2, que compara los precios del agua y de la energía en Europa, lo evidencia. Mientras el precio del agua en España es de los más bajos de Europa, el de la energía es de los más elevados. Y conviene subrayar que se comparan los precios de agua urbana, no de riego (aún más barata). ¿Qué regante, pues, de los tradicionales, con acceso a agua superficial casi gratuita, querrá regar con agua desalada? La respuesta es obvia: sólo quienes cultivan productos de alto valor añadido sin acceso a otras fuentes. No extraña, pues, que desde la dirección de la Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR) se quejen de esta, de algún modo, competencia desleal (Cala, 2013).

En España el precio del agua es un asunto politizado y los responsables de su gestión sólo apostarán por la recuperación de costes si no hay otra opción. Mientras el ciudadano tiene asumido que debe pagar los costes reales de la energía (incluso gravada con tasas), no sucede lo mismo con el agua. Sin embargo, sí acepta pagar por el agua embotellada unos costes cientos, cuando no miles, de veces superior. Hay, pues, que reforzar la educación ambiental. Con todo, el futuro de la desalación es prometedor pues la mayoría de factores que la limitan van alineándose a su favor. Entre ellos:

- a. La idea del trasvase se va abandonando. Es obvio que, sin un amplio consenso, hoy poco viable, y sin el dinero de Europa, la infraestructura no parece realizable. Ello, en zonas semiáridas y costeras, otorga a las desaladoras la etiqueta de necesarias.
- b. El cambio climático y la reducción de recursos que conlleva, las hace necesarias en el marco de una gestión integrada de todos los recursos hídricos.
- c. Las desaladoras son infraestructuras más locales (no precisan consensos tan amplios).
- d. Sin fondos europeos para financiar nuevas infraestructuras o reponer las existentes, será necesario avanzar en la recuperación de costes. La ciudadanía deberá asumir la nueva realidad y el agua desalada ganará competitividad.
- e. Aunque en algunos casos, ya se ha dicho, faltan obras complementarias, la infraestructura principal, la desaladora, está disponible. En ese marco lo que falta por hacer es más asumible.
- f. También ayuda, y no poco, las constantes mejoras tecnológicas de los procesos con la subsiguiente reducción de costes.

En lo que sigue se discute el marco socio-económico y ambiental aquí resumido, así como las mejoras tecnológicas que van llegando. La superposición de ambos análisis permitirá pronosticar el futuro de la desalación en España.

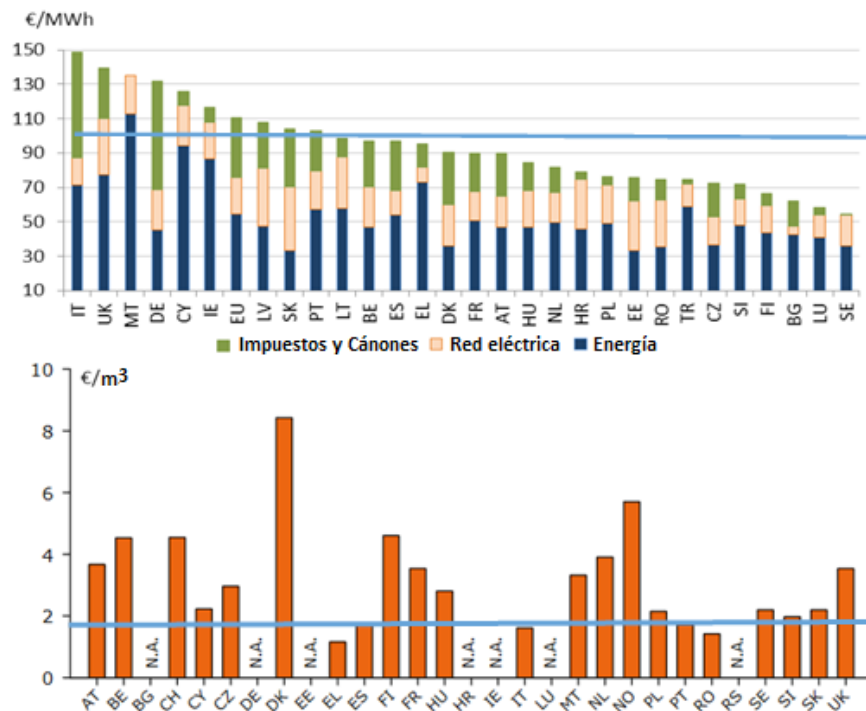


Figura 2 | Precios en Europa de la energía (EC, 2016) y del agua (EurEau, 2017).

LA DESALACIÓN COMO GARANTÍA DE SUMINISTRO

La gestión de los recursos hídricos en el siglo XXI poco tiene que ver con la del siglo pasado. La actual y, sobre todo, la futura, se enfrenta al reto de compatibilizar los usos del agua con la protección del medio ambiente mediante una gestión integrada y sostenible, en la que se potencien las políticas de conservación, concienciación y participación social, educación ambiental, gestión de la demanda, así como la utilización de los recursos no convencionales, como la desalación o la reutilización. Hay que tener en cuenta, además, que en los últimos años la tendencia en España, es un aumento progresivo de la escasez de agua, que puede verse acentuada por unas previsiones muy negativas de impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Los resultados del 5º informe de evaluación del Panel Internacional de Expertos en Cambio Climático, confirman las previsiones de reducción de aportaciones naturales que, con mayor detalle, muestra el análisis del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (CEH, 2017). Este estudio evalúa su impacto sobre los recursos hídricos en España, mostrando una disminución en la escorrentía que se generaliza a medida que avanza el siglo XXI. Se estima que, en las distintas demarcaciones hidrográficas españolas a final de este siglo, las reducciones pueden variar entre un 20% y un 40%, dependiendo de la proyección climática considerada. También pronostica que, en general, las sequías serán cada vez más frecuentes.

El marco general de escasez de recursos, agravado por las proyecciones climáticas y por la competencia entre la agricultura, la industria y las poblaciones por los escasos recursos hídricos disponibles, puede restringir las actividades de desarrollo e intensificar los conflictos existentes. Una gestión planificada y sostenible de todos los recursos, convencionales y no convencionales, asegurando la protección medioambiental, es hoy el objetivo prioritario. Los recursos superficiales, sobre todo en los territorios más secos, están muy regulados por lo que no se prevé construir un número significativo de nuevos embalses. Por otra parte, en las zonas más áridas los acuíferos tienen unos índices de explotación elevados, generándose graves situaciones de insostenibilidad en aquellas en las que las extracciones superan la recarga natural. Por ello tampoco se prevé un aumento significativo de las captaciones subterráneas. No se vislumbra, pues, en el futuro un aumento de los recursos convencionales, por lo que, en los territorios con balances hídricos

frágiles, la reutilización o la desalación, conjuntamente con la gestión de la demanda, están llamadas a jugar un papel clave, sobre todo en situaciones extremas.

Por ello, tras un pasado turbulento, su futuro es esperanzador. Sus costes, bien aceptados cuando no hay agua, deben considerarse en épocas lluviosas como el equivalente a un seguro hídrico, y asumirlo con idéntica naturalidad al pago de los seguros tradicionales (automóvil, vivienda, etc.). De no aceptarlo, puede darse en España lo acontecido en Ciudad del Cabo donde hace algunos años se planteó la construcción de una desaladora, iniciativa que fue descartada por razones económicas. Y se entiende, el 50% de sus habitantes no pagan el agua (Jacobs, 2018). Pero una severa sequía de tres años obligó a racionar el agua hasta los 50 l/ persona y día, y el precio que hubo que pagar por una dotación mayor multiplicó por diez el valor habitual. En definitiva, el gasto que soportó el conjunto de la ciudad sobrepasó ampliamente el coste de la nueva desaladora. Incluso se llegó a concretar (21 de abril de 2018), el día cero en que el agua dejaría de salir por el grifo. Por fortuna en primavera comenzó a llover y ese día no llegó. Pero es la primera vez que una gran ciudad, con una pluviometría media superior a 1000 l/m² y año, ha estado a punto de quedarse sin agua. Superada la crisis, y por las circunstancias socioeconómicas de Ciudad del Cabo, la desalación sigue sin contemplarse. Pero, con el objetivo de ahuyentar un futuro día cero, se ha diseñado un ambicioso plan (Sinclair-Smith et al., 2018) que premia a los abonados que van reduciendo su consumo habitual.

Otra historia singular es la de Londres. Hace 15 años decidió construir una desaladora de 1.5×10^5 m³/día (aun activa) porque su coste era inferior al de reducir las elevadas fugas de su red. Hoy, Thames Water, la compañía responsable, ha cambiado de estrategia a la fuerza, priorizando la reducción de las fugas a la construcción de una segunda desaladora. Y se explica. Su red, la más ineficiente de Inglaterra, no alcanza los objetivos que les va marcando el regulador, el OFWAT, razón por la que Thames Water ha sido multada una vez más, la última el pasado junio (OFWAT, 2018). En definitiva, el suministro de agua debe tener la máxima garantía de suministro posible, debiéndose apostar por la solución más sostenible tanto en términos ambientales como económicos (Cooley y Phurisamban, 2106). En zonas secas, en general buenas gestoras, la desalación siempre estará en la ecuación.

EL PAPEL ACTUAL DEL AGUA DESALADA

La capacidad de producción de agua desalada en España es de unos 3 hm³/día. La mayoría de plantas construidas en los últimos años, muchas de la mano del programa AGUA, ha impulsado el desarrollo de la industria de la desalación en España. En el contexto mundial (Figura 3), con el epicentro en Oriente Medio, la posición de España es relevante y en algunas demarcaciones hidrográficas está llamada a jugar un papel clave.

En efecto, la Tabla 1 detalla el papel, muy variable, de las desaladoras previsto en los planes hidrológicos de cuenca. Desde una dependencia total (o casi) de la desalación (Melilla, Ceuta, Segura e Islas Canarias) a una simbólica contribución (Júcar y cuencas internas de Cataluña), pasando por una dependencia moderada (Balears y cuencas mediterráneas andaluzas). En el resto de cuencas la contribución es nula. En cualquier caso, en un futuro inmediato su participación será algo mayor, particularmente en el territorio de la Demarcación Hidrográfica del Júcar donde hay varias plantas que, aunque sin funcionar o haciéndolo a carga parcial, su concurso se estima necesario y, en cuanto se resuelvan los desajustes existentes, su contribución contribuirá a aumentar la garantía de suministro urbano.

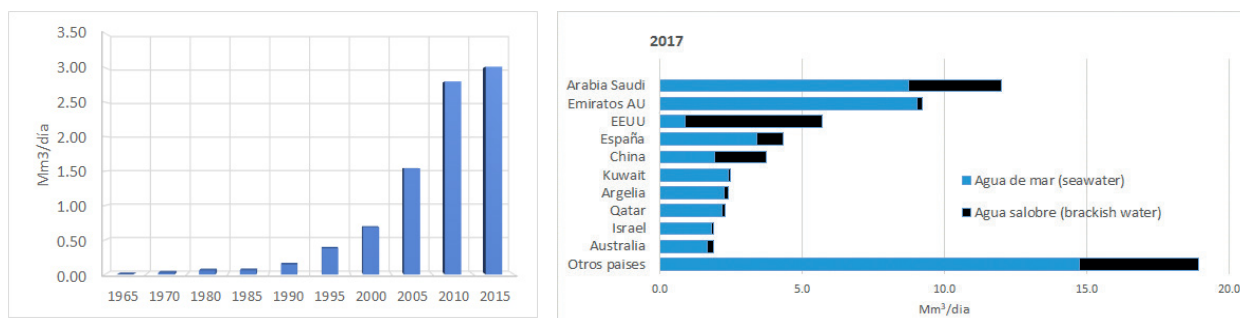


Figura 3 | Evolución de la capacidad de desalación en España y su peso en el mundo en 2017 (Zarzuela, 2018).

Finalmente conviene destacar que, al contrario de lo que acontece a escala mundial, nuestra agricultura no es ajena a la desalación. Supone el 22% del total, mientras que en el resto del mundo no alcanza el 3% (Zarzo, 2017). Se recurre a ella en áreas semiáridas cuyo clima favorece una agricultura de regadío muy productiva, con varias cosechas anuales. La intensidad energética del agua salobre, cual se verá, está en la horquilla 1-1.5 kWh/m³, exigencia energética similar al bombeo en acuíferos con el nivel de agua a profundidades entre 250 m y 400 m, un gasto asumible para esta agricultura.

Tabla 1 | El agua desalada por demarcación hidrográfica en la actualidad (2012-2015).

| Demarcación Hidrográfica | Demanda total de agua (hm ³ /año) | Demanda de agua (uso urbano) | Agua desalada (hm ³ /año) | % desalación sobre el total de la demanda | % desalación sobre el total del uso urbano |
|---------------------------------|--|------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Cantábrico Oriental | 273 | 234 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Cantábrico Occidental | 462 | 180 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Galicia Costa | 369 | 226 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Miño-Sil | 439 | 102 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Duero | 3758 | 287 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Tajo | 2713 | 741 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Guadiana | 2130 | 166 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Tinto, Odiel y Piedras | 309 | 66 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Guadalquivir | 3798 | 379 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Guadalete y Barbate | 438 | 108 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Cuencas Mediterráneas Andaluzas | 1393 | 345 | 44 | 3.1 | 12.8 |
| Segura | 1693 | 186 | 159 | 9.4 | 85.5 |
| Júcar | 3241 | 525 | 35 | 1.1 | 6.7 |
| Ebro | 8334 | 359 | 0 | 0.0 | 0.0 |
| Cuencas Internas de Cataluña | 1046 | 572 | 17 | 1.6 | 3,0 |
| Islas Baleares | 253 | 139 | 28 | 11.1 | 20.1 |
| Melilla | 11 | 7 | 8 | 72.7 | 108.6 |
| Ceuta | 9 | 7 | 7 | 77.8 | 100.0 |
| Islas Canarias | 455 | 214 | 129 | 28.3 | 60.2 |
| TOTAL | 31123 | 4842 | 395 | 1.3 | 8.2 |

LOS COSTES DEL AGUA DESALADA EN ESPAÑA

Salvo en caso de necesidad, la consolidación de las desaladoras depende en gran medida de sus costes que no sólo dependen del precio de la energía. También son muy sensibles al tamaño de la planta y a su carga de trabajo, razones por las que su despegue no está siendo fácil. En ocasiones la administración ha facilitado su puesta en marcha subsidiándolas parcialmente, un problema que se resolvería con las plantas trabajando a plena carga. Y así, un análisis de costes de siete grandes plantas de desalación marina ubicadas en Murcia y Alicante concluye que están entre 0.63 y 0.72 €/m³ (Lapuente, 2012). Sin embargo, según este estudio esos costes se disparan si las instalaciones trabajan a carga parcial. Estos resultados están en sintonía con los valores reales calculados en cuatro plantas de desalación de la Confederación Hidrográfica del Júcar (Figura 4), donde se aprecia la relación entre los costes (capital, operación y mantenimiento) y el volumen producido. Se observa que los costes del agua oscilan entre 0,45 y 0,55 €/m³ para plantas a plena carga, valores que se duplican si operan a media-baja carga, una diferencia difícil de asumir.

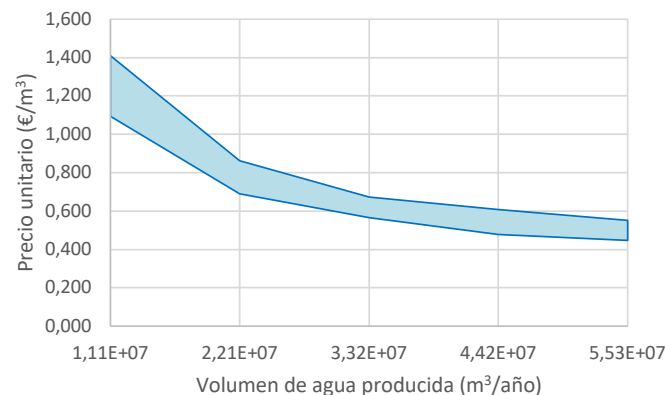


Figura 4 | Precio del agua desalada en función del volumen producido (desaladoras de Muchamiel, Sagunto, Oropesa y Moncofar).

Sin embargo, y pese a la reducción de costes de los últimos años, existen plantas infrautilizadas, especialmente en la Comunidad Valenciana donde conviene analizar lo sucedido. En los años previos a la crisis los ayuntamientos vieron en las desaladoras la solución a una formidable expansión urbanística e industrial y no dudaron en promover su construcción. Así nacieron las plantas de Sagunto, Moncófár y Oropesa, con una capacidad de 100.000 m³/día. Pero la crisis evidenció una sobreestimación de la demanda y los ayuntamientos, como el cambio de fuente de suministro supone un aumento del coste, no han estado por cumplir lo firmado. Les preocupa más el corto plazo (el periodo electoral es cuatro años) que el medio-largo plazo, impidiéndoles ver: a) la mejora de la calidad del agua en áreas costeras de elevada salinidad b) el aumento de la garantía de suministro y c) la recuperación de acuíferos sobreexplotados, necesaria para alcanzar los objetivos ambientales en las masas costeras de agua subterránea. Sólo una mayor sensibilidad ambiental de la ciudadanía puede compatibilizar los intereses del corto plazo con los del medio-largo plazo.

Pero con la escasez de agua, las desaladoras se activan. Es el caso de la planta de Mutxamel (Alicante). Con una capacidad de 5×10^4 m³/día, ha permitido superar una severa sequía (2015-2016) que comprometía el suministro de agua a la Marina Baja. Pero con la vuelta de las lluvias, la planta ha dejado de estar operativa y no debiera ser así mientras no se resuelvan los problemas de grave sobreexplotación de los acuíferos de la cuenca del río Vinalopó, que atienden usos agrícolas y urbanos en el sistema Vinalopó-Alacantí. Al pararla se está renunciando a unos beneficios ambientales que sobradamente justifican el aumento del coste del agua desalada. Ello evidencia, una vez más, la necesidad de avanzar hacia la integración en un sistema de explotación conjunta de los recursos que racionalice su explotación.

EL FUTURO DE LA DESALACIÓN EN ESPAÑA

Las áreas en las que los recursos hídricos están muy presionados, prácticamente todo el arco mediterráneo, con un importante crecimiento urbanístico y poblacional, no pueden, pese a sus inconvenientes, prescindir de la desalación. El primer inconveniente, su elevado consumo energético (más adelante se profundiza en ello), que incluye costes elevados, y emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero) ligadas al mix energético del país. Este es un problema que siempre acompañará a la desalación, aunque las últimas mejoras (desde los 50 kWh/m³ hasta 3 kWh/m³) han cambiado la perspectiva de la desalación. El segundo inconveniente esgrimido es ambiental. Pero el impacto en el medio marino, consecuencia de las obras de captación de agua de mar, del retorno de la salmuera y de su posible afección a la flora y fauna en el punto de vertido (por el aumento puntual de la salinidad del agua de mar), parece superado. Se han fijado procedimientos reglados de evaluación de impacto ambiental de las plantas (con unas medidas cautelares en la ejecución de las obras), y en la dilución controlada de la salmuera vertida por los emisarios (un coste adicional de la inversión poco relevante). También se han establecido protocolos de seguimiento (costes de explotación).

La amplia experiencia lograda en la realización de instalaciones peninsulares (arco costero mediterráneo) e insulares (Baleares y Canarias) está evidenciando la nula afección ambiental cuando las captaciones y descargas se localizan donde corresponde y

las plantas se diseñan y operan adecuadamente (Urrea, 2007). De hecho, las mejoras en los procesos han reducido el impacto ambiental ocasionado por la descarga de la salmuera. Además, el Ministerio, bien a través de sus organismos autónomos, bien desde las sociedades estatales, ha impulsado un conjunto de medidas para preservar las praderas de *Posidonia oceanica*, fanerógama endémica de estas costas. En la actualidad las desaladoras operan con el máximo respeto a ese rico hábitat, vital para numerosas especies marinas. Es el resultado de trabajos, ensayos físicos y modelos numéricos, del CEDEX. Así pues, estos inconvenientes, aunque no resueltos, se han allanado.

Pero queda el principal escollo por resolver y que apenas se menciona (razón por la que en este trabajo se insiste tanto), crear los necesarios sistemas de gestión integrada de recursos. Una estrategia necesaria cuando el agua que suministra la desaladora puede, en periodos húmedos, sustituirse por una fuente tradicional, porque si la desaladora es imprescindible, nadie la discute. La solución requiere dejar de considerarla una fuente de agua aislada y de emergencia. Aunque no es sencillo, debe verse como un suministro necesario complementario, lo que se consigue integrándola en el sistema general. Sólo así contribuirá a alcanzar los importantes objetivos ambientales descritos. Es clave, pues, avanzar en el desarrollo de sistemas integrados de gestión de recursos, que consideren la desalación como una aportación más, con objetivos específicos, aunque sea a costa de aumentar el precio medio del agua. La Mancomunidad de Canales del Taibilla, un organismo autónomo estatal, ya lo está haciendo. La figura 5 lo evidencia.

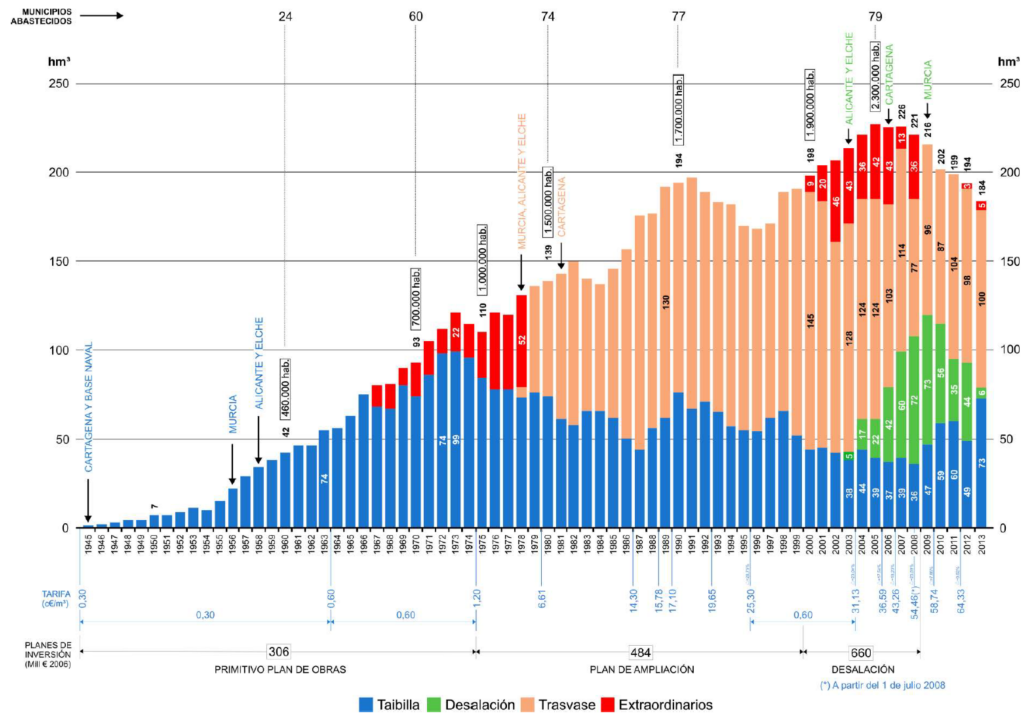


Figura 5 | Recursos utilizados en la Mancomunidad de Canales del Taibilla. (MCT, 2013).

LOS PROCESOS DE LA DESALACIÓN

Su futuro, ya se ha dicho, depende mucho de la evolución tecnológica. Por ello conviene saber dónde se está y qué cabe esperar. En busca de la respuesta, se repasa el presente y se explora lo que el futuro pueda deparar a un proceso que consiste en producir agua dulce a partir de agua salobre (salinidad <5 g/l) o marina (salinidad 35-40 g/l), que demanda energía y que, en síntesis, consiste en separar el agua salina en dos corrientes, una con baja concentración de sales disueltas (agua dulce) y otra con todas las

sales concentradas (salmuera). Existen un gran número de procesos, desde los más antiguos (evaporación solar) a los más nuevos (desalación electroquímica). A día de hoy sólo dos, los térmicos y las técnicas de membrana, se utilizan.

Los principales procesos térmicos o evaporativos están basados en multietapas flash (*multi-stage flash*), múltiples efectos (*multi-effect distillation*), y recompresión de vapor (*vapor compression*), mientras que la tecnología de membrana predominante es la OI. Los procesos térmicos requieren dos formas de energía, calor a baja temperatura (el mayor consumo) y energía eléctrica para trasegar los fluidos. La OI solo necesita energía eléctrica para proporcionar un gradiente de presión variable con la salinidad. Su cuota de mercado, Figura 6, representa más del 70% de la actual producción mundial, cifra que también incluye la reutilización. Se observa que los procesos térmicos van perdiendo peso, pero ni han desaparecido ni parece que en el futuro inmediato lo vayan a hacer. Especialmente en Oriente Medio donde los combustibles son baratos y abundan las centrales térmicas, propiciando que (como en la antigua Carboneras) la evaporación térmica sea aún la tecnología dominante. Así pues, el proceso también lo condicionan factores locales. Con todo, también allí, la tecnología de membranas está ganando protagonismo. Asimismo se observa que la desalación marina duplica a la salobre (Figura 6).

La realidad española es diferente al panorama general que muestra la Figura 6. Las 900 plantas que, con una capacidad de producción superior a 100 m³/día, existen, operan con técnicas de membrana, predominando la OI. La capacidad total actual, ya se ha dicho, es del orden de 1000 hm³/año. El uso de agua salobre representa el 30%, casi toda destinada a la agricultura que consume el 22% del agua desalada (Morote et al., 2017; Zarzo y Prats, 2018). En lo que sigue nos centramos en la OI, el proceso predominante en España y que, por ello, condiciona su futuro.

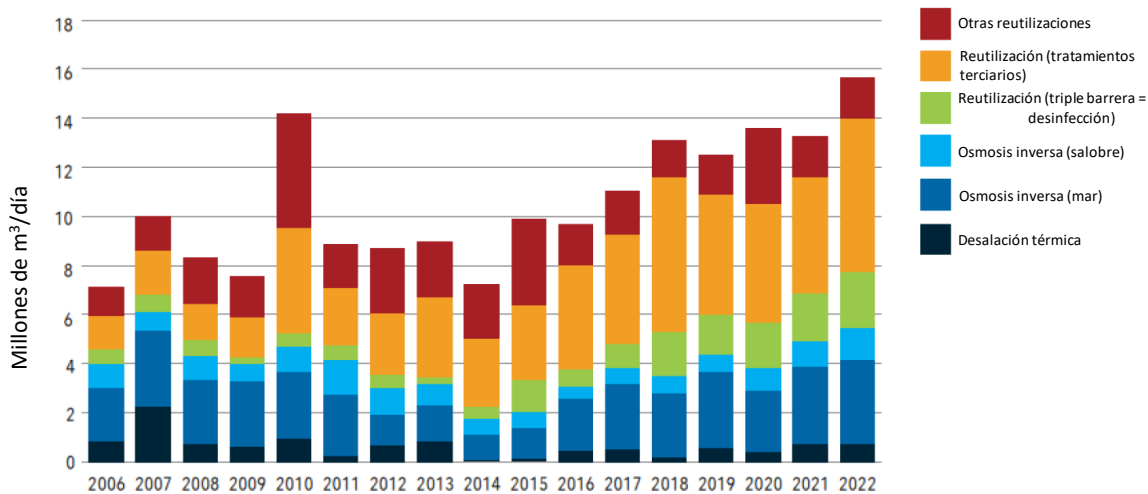


Figura 6| Evolución y previsión de la contratación por tipo de planta, incluida la reutilización (Zarzuela, 2018)

LA DESALACIÓN POR OSMOSIS INVERSA

El proceso requiere una membrana semipermeable que, en cuanto se le aplica un gradiente de presión, permite el paso del agua, pero no de sus sales. El salto debe superar la presión osmótica del agua a desalar, que define el gradiente requerido: entre 10-25 bar (agua salobre) y entre 55 y 70 bar (agua marina). Las membranas actuales producen un agua dulce de gran calidad (salinidad <500 ppm) y son el elemento clave de un sistema integrado por cinco subsistemas: captación, pre-tratamiento, unidad de osmosis inversa (bomba de alta presión, membrana, y recuperador de energía en su caso), post-tratamiento y descarga de la salmuera (Figura 7). El agua, superficial o subterránea, es pre-tratada con una filtración y con la adición de productos químicos que eliminan sólidos en suspensión y coloides, y previenen de incrustaciones salinas sobre las membranas.

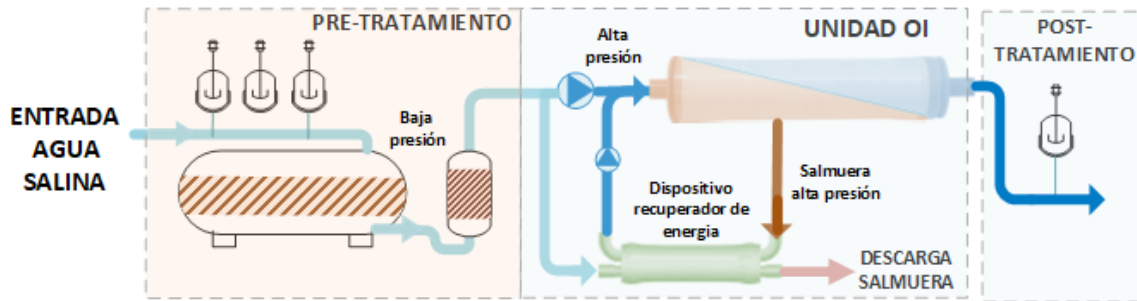


Figura 7| Esquema general de una planta de osmosis Inversa.

La unidad de OI se configura modularmente con bastidores e incluye el bombeo a alta presión a través de tubos de presión donde, conectados en serie, se ensamblan los elementos de membrana. El porcentaje de agua dulce obtenido por kg de agua salada se aproxima al 50% para agua marina, y puede llegar al 85% en el caso de agua salobre. De cada tubo de presión salen dos corrientes, el agua dulce a presión atmosférica y el concentrado a alta presión, aunque ligeramente inferior a la de bombeo. En el caso de agua de mar, la energía de esta última corriente se recupera con turbinas o dispositivos de intercambio directo de presión, cuyas eficiencias pueden superar el 97%, consiguiéndose así un notable ahorro energético. En aguas salobres, solo las grandes plantas, con presiones superiores a 15 bar, los suelen utilizar. El agua dulce obtenida en este proceso necesita un post-tratamiento que ajuste el pH y la falta de contenido de Ca^{++} y Mg^{++} antes de inyectarse en la red. Por otra parte, la salmuera generada en el proceso requiere un vertido adecuado que minimice su impacto ambiental en el medio natural receptor. En España, ya se ha dicho, el CEDEX ha elaborado un protocolo basado en una dilución y difusión controlada en el medio receptor, especialmente en el caso del mar. Cuando se tratan aguas salobres, por el mayor nivel de contaminación de la fuente de origen, ya sean aguas superficiales o subterráneas, se requiere un mayor esfuerzo en esta gestión pues los vertidos pueden contribuir a empeorar, aún más, el estado de estos medios. Por esta razón algunos sistemas, como el del Mar Menor, están siendo objeto de atención especial por parte de la administración responsable.

Los sistemas actuales que tratan agua de mar presentan una intensidad energética de 2.5-4 kWh/m³ que en salobres se reduce a 1-1.5 kWh/m³. Son procesos más intensivos que la potabilización de agua superficial, (0.2-0.4 kWh/m³) o la depuración de aguas residuales (0.5-1.0 kWh/m³), si bien en este caso, cuando se incluyen tratamientos terciarios, el consumo se dispara. Llegados a este punto surge la pregunta inevitable: ¿cuál es el límite energético inferior de la desalación? La respuesta es la energía mínima requerida para, idealmente, rebajar la sal del agua marina desde 35 g/l hasta 0.5 g/l. Ese valor, a 25°C, es 0.73 kWh/m³, que asciende a 1.06 kWh/m³ para una conversión próxima al 50%. Tal es, pues, el límite teórico. Pero las ineficiencias existen. Así lo evidencia la Figura 8 que, en función de la fuente, detalla las exigencias actuales de cada etapa (tanto para el agua salobre como para la del mar). La fase más consuntiva corresponde a la unidad de OI (supone el 58 y 71% respectivamente), justificando por qué los esfuerzos se centran en ella. En definitiva, aunque escaso, hay margen de mejora.

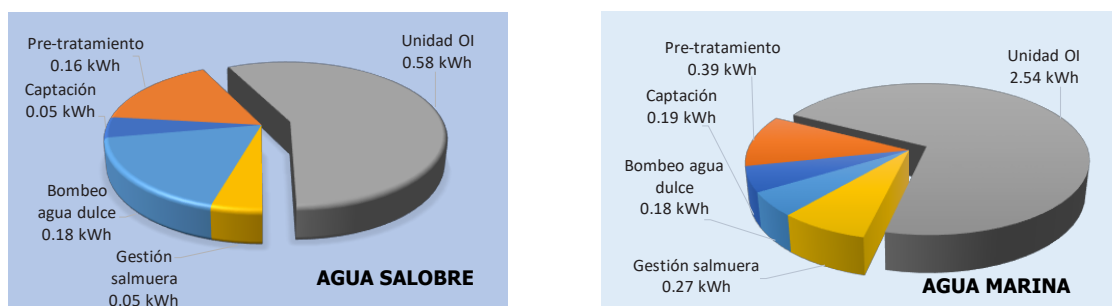


Figura 8| Demanda energética típica de las etapas de desalación por m³ (A partir de Voutchkov, 2017).

Pero los costes no sólo se han beneficiado de la mayor eficiencia energética. También ha ayudado la mejora de las membranas y del resto de procesos. La micro-filtración, la ultrafiltración y la reducción del consumo de productos químicos ha mejorado el pre-tratamiento, así como los nuevos sistemas de captación del agua en tomas abiertas. También ha reducido los costes el aumento de la capacidad de las plantas (factor de escala), siempre que operen a plena carga. Es interesante constatar que el coste energético supera al de amortización de la planta (Figura 9). El desglose de los costes de la desalación en España es similar a los que constan en la literatura internacional (Lattemann, 2010). Y se explica. En un mundo globalizado los costes de la construcción son similares y, por su carácter más local, las variaciones están en los costes de explotación. Por lo que al total se refiere (ver Figura 4), plantas de capacidad superior a 15000 m³/día, están en la horquilla 0.45-1.5 €/m³. En aguas salobres se reducen a la tercera parte (0.18-0.54 €/m³).

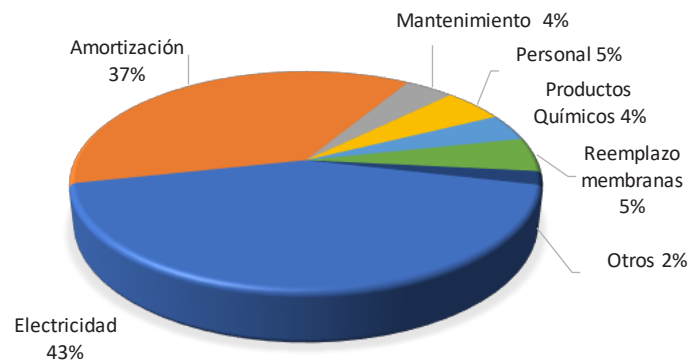


Figura 9 | Desglose de costes típico de una desaladora de agua de mar (AcuaMed, 2011).

EL FUTURO DE LA DESALACIÓN DESDE LA ÓPTICA TECNOLÓGICA

La mayor ventaja de la desalación es la materia prima ilimitada. Sus inconvenientes, ya se ha visto, se han ido laminando y los costes comienzan a ser competitivos. Obviamente lo son cuando no hay alternativa. Pero también cuando su aportación sólo es necesaria en periodos secos. El sobre coste que su integración, como una fuente más, tiene en la gestión global de todos los recursos hídricos, no es sino el pago razonable de un seguro hídrico. La Figura 10 valida este comentario: desde su irrupción en el mercado el crecimiento de la desalación ha sido exponencial.

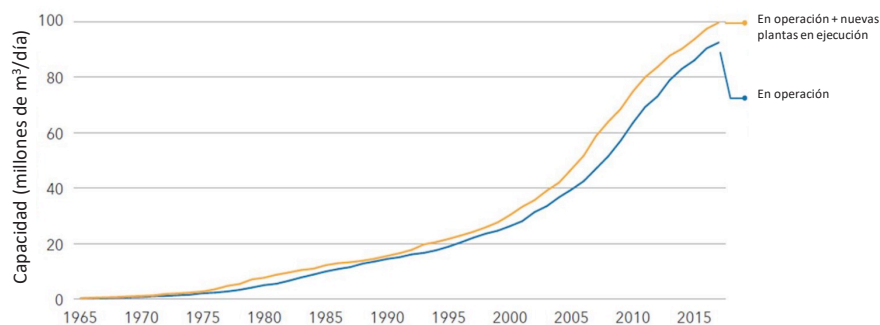


Figura 10 | Evolución en el tiempo de la desalación en el mundo (Sanz, 2018)

Pero no conviene ignorar que aportar más recursos acelerando el cambio climático con la emisión de GEI puede hacer de la desalación solución y, al tiempo, problema. Al respecto no hay duda, ante la falta de recursos hídricos, el ahorro y la eficiencia debe ser siempre la primera opción. Y si los costes tradicionales no la priorizan (recuérdese el caso de la desaladora de Londres),

la inclusión de costes ambientales (Cabrera et al., 2013) puede alterar el orden. Pero agotado el margen de ahorro, para aliviar la escasez siempre estará la desalación que debe seguir mejorando en tres líneas estratégicas: diseño de plantas, de membranas e incorporación de fuentes de energía renovables cuyo mayor obstáculo a superar es garantizar un suministro de energía continuo. En lo que sigue se analiza cada línea:

a. Con relación a la mejora en el diseño de las plantas, se está trabajando en:

- *La planificación conjunta de plantas depuradoras y desaladoras de agua salobre.* Se facilita la dilución y se reduce el consumo eléctrico (hasta un 50%).
- *La planificación conjunta de plantas de generación de energía y desaladoras.* Con el calor residual aumenta la temperatura del agua a desalar, y por tanto la productividad de las membranas.
- *La mejora de las bombas de alta presión y de los dispositivos recuperadores de energía* (hasta el 15%).
- *El diseño de instalaciones híbridas.* El diseño actual se puede integrar con otros procesos de membrana (Figura 11), como la osmosis directa-OD, (forward osmosis FO) y la osmosis a presión retardada-OPR (pressure-retarded osmosis PRO), junto con corrientes de aguas residuales depuradas. Las etapas requeridas son:
 - Pre-tratamiento, mezclando el agua a desalar (utilizada como corriente de arrastre en el proceso de OD con el agua residual de las depuradoras). Se reduce la presión osmótica de la alimentación y, por tanto, el consumo de energía (hasta 0.5 kWh/m³).
 - Post-tratamiento con osmosis a presión retardada para recuperar la energía osmótica de la salmuera generada, y combinarla con la salmuera residual para generar energía eléctrica. Se pueden producir unos 0.5 kWh/m³ (Straub et al., 2016).
- *Diseños agrícolas energéticamente menos exigentes.* El desarrollo de sistemas OD facilita el riego selectivo con ayuda de aguas residuales utilizando los fertilizantes propios como corrientes de arrastre. El consumo energético se reduciría en 0.1 kWh/m³, y haría más atractiva la desalación (Kim et al., 2017).

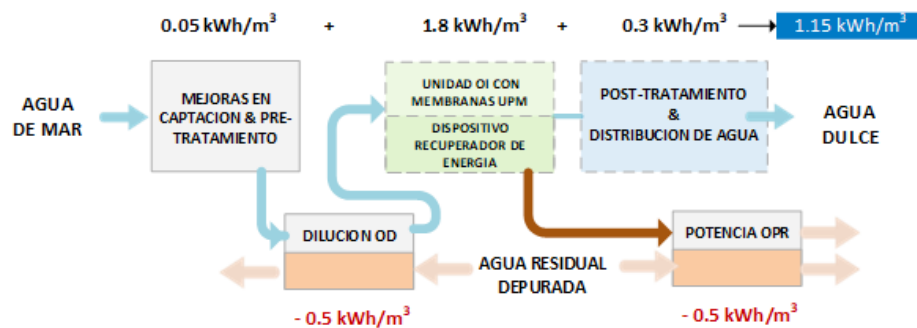


Figura 11 | Procesos alternativos de desalación para ahorrar 1 kWh/m³ de energía (Fane, 2018).

b. Con relación a la mejora de las membranas se trabaja en:

- *Reducir el ensuciamiento* con tratamientos eficaces, energéticamente menos consuntivos basados en membranas de ultrafiltración (UF) con gradientes de presión inferiores a 50 mbar.
- *Reducir el bio-ensuciamiento* rebajando los nutrientes y aportando enzimas que dispersen los microorganismos en la superficie de la membrana. Pueden suponer unos 0.3 kWh/m³ de mejora en el proceso (Fane, 2018)
- *Mejorar las propias membranas*, para que sean ultra-permeables (UPM), aumentando los canales de agua en su superficie, y reduciendo, al nivel de las membranas celulares, el espesor de la capa activa. Todo ello mejora el proceso. Los resultados esperados prometen (reducción del 20% en marinas y del 40% en salobres).

- c. Con relación a utilizar fuentes de energía renovables, hay que superar la intermitencia. Los diseños deben garantizar el suministro de energía continuo. Procesos de membrana emergentes pueden allanar el camino. Procesos de osmosis a presión retardada y de electrodiálisis inversa pueden ser las estrategias a seguir.

La superposición de todas estas mejoras anticipa una desalación más competitiva. Y ya hay, Tabla 2, pronósticos.

Tabla 2 | Parámetros actuales característicos de la desalación y predicción futura (Voutchkov, 2016).

| | 2017 | 2022 | 2037 |
|---|---------|---------|---------|
| Energía eléctrica total (kWh/m ³) | 3.5-4.0 | 2.8-3.2 | 2.1-2.4 |
| Coste del agua (€/m ³) | 0.7-1.1 | 0.5-0.9 | 0.3-0.8 |
| Coste inversión (€/MLdía) | 1.1-1.9 | 0.9-1.5 | 0.4-0.8 |
| Productividad de la membrana (m ³ /elemento de membrana 8'') | 28-47 | 35-55 | 95-120 |

CONCLUSIÓN

La desalación en España ha sido, es y será una fuente de agua importante, sobre todo en sus zonas más áridas, el sureste mediterráneo y las Islas Canarias orientales. Su crecimiento, sostenido y pausado, lo cambió el programa AGUA, alternativa al trasvase del Ebro. Las prisas por gastar los fondos europeos destinados al trasvase, generó desajustes, algunos aún pendientes de solución. Con todo, el paso del tiempo está normalizando la situación, en gran medida por la continua reducción de los costes de la desalación, consecuencia de una mayor eficiencia y de los avances habidos en la tecnología de membranas. El mayor reto actual es integrar este nuevo recurso, como uno más, en los sistemas de gestión de los recursos tradicionales, un problema inexistente cuando la aportación de la desaladora es siempre necesaria. Pero arrancar y parar las desaladoras en función del periodo hidrológico (seco o húmedo), lastra estas plantas. Los costes a cargas parciales se disparan y su envejecimiento se acelera. La integración exige admitir un ligero sobrecoste, equivalente al pago de un seguro de garantía hídrica. Es necesario, pues, educar al ciudadano, para que comprenda las ventajas de integrar la desalación: mayor garantía de suministro y notables beneficios ambientales.

De otra parte, no parece necesario, salvo en casos puntuales, construir nuevas grandes plantas. La relación entre los costes de la desalación y los de la energía (las mejoras lo laminarán, pero no lo evitarán) aconseja, a la hora de promover nuevas plantas, prudencia. Esta es, sin duda, la mayor lección del programa AGUA. Cuestión distinta son las excelentes perspectivas mundiales de la desalación ante las que las empresas españolas no deberían perder la posición de privilegio adquirida gracias a su buen hacer. Y también porque la regeneración, previa a la reutilización, es en tecnología, condicionantes económicos y beneficios ambientales prima hermana de la desalación. Y en este campo queda mucho por hacer.

NOTA FINAL

Un resumen de este artículo se ha publicado en La Houille Blanche (n° 1, 2019).

REFERENCIAS

- AcuaMed. 2011. *La desalación en España, Sostenibilidad para zonas vulnerables*. AcuaMed. Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Madrid. 2011
- Araus, M. (2007). *Desalinización como instrumento de autosuficiencia hídrica territorial*. AcuaMed. Madrid. 2007.
- ATSE (The Australian Academy of Technological Sciences and Engineering), 2012. *Sustainable water management. Securing Australia's future in a green economy*. Melbourne. Australia.

- BOE (Boletín Oficial del Estado), 2001. LEY 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional. BOE de 6 de julio de 2001, páginas 22428-24250.
- BOE (Boletín Oficial del Estado), 2004. “Real Decreto Ley 2/2004, de 18 de junio, por el que se modifica la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional”. BOE de 18 de junio de 2001, páginas 22453 – 22457.
- Cabrera, E., Pardo, M.A., Cabrera, E. Jr., Cobacho, R. 2010. Agua y energía en España. Un reto complejo y fascinante. *Ingeniería del agua*, 17(3), 235-246. <https://doi.org/10.4995/ia.2010.2976>
- Cabrera, E., Pardo, M.A., Cabrera, E. Jr., Arregui F.J. 2013. Tap water costs and service sustainability. A close relationship. *Water Resources Management*, 27(1), 239-253. <https://doi.org/10.1007/s11269-012-0181-3>
- Cala, A. 2013. *Spain's Desalination Ambitions Unravel*. The New York Times, October 2013. Special Report: Business of Green
- CEH (Centro de Estudios Hidrográficos). 2017. Informe de Evaluación del Impacto del Cambio Climático en los Recursos Hídricos y Sequías en España (2015-2017). Madrid.
- Cooley, H., Phurisamban, R. 2016. *The Cost of Alternative Water Supply and Efficiency Options in California*. Pacific Institute. Oakland, California.
- EC (European Commission). 2016. *Energy prices and costs in Europe*. Report from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels 30.11.2016
- EurEau. 2017. *Europe's water in figures. An overview of the European drinking water and waste water sectors. 2017 edition*. The European Federation of National Water Associations.
- Fane, A.G. 2018. A grand challenge for membrane desalination: More water, less carbon, *Desalination*, 426, 155-163. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.002>
- Giurco, D.P., Turner, A., Fane, S., White, S.B. 2014. Desalination for urban water: changing perceptions and future scenarios in Australia, *Chemical Engineering Transactions*, 42, 13-18. <https://doi.org/10.3303/CET1442003>
- Jacobs, H.E. 2018. *End-User Perspective of the Cape Town Day Zero Scenario*. WDSA. Julio 2018. Kingston. Canada.
- Kim, J.E., Phuntso, S., Chekli, L., Hong, S., Ghaffour, N., Leiknes, T., Choi, J.Y., Shon, H.K. 2017. Environmental and economic impacts of fertilizer drawn FO and NF hybrid system. *Desalination*, 416, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.001>
- Lapiente, E. 2012. Full cost in desalination. A case study of the Segura River Basin. *Desalination*, 300, 40-45. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.06.002>
- Latteman, S., Kennedy, M.D., Schippers, J.C., Amy, G. 2010. Global desalination situation. Volumen 2, Capítulo 2 del libro *Sustainable water for the future* (2010) 7-39. [https://doi.org/10.1016/S1871-2711\(09\)00202-5](https://doi.org/10.1016/S1871-2711(09)00202-5)
- MCT (Mancomunidad de los Canales del Taibilla). 2013. Gestión del servicio 2013. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. MAC. Cartagena (Murcia).
- Morote, A.F., Rico, A.M., Moltó, E. 2017. Critical review of desalination in Spain: a resource for the future? *Geographical Research*. 55(4), 412-423. <https://doi.org/10.1111/1745-5871.12232>
- OFWAT (Water Services Regulation Authority). 2018. *Annual report and accounts 2017-18*. Ofwat. Birmingham. UK
- Ruiz, N. 2005. *La salinidad del agua de riego y del suelo*. IFAPA Centro Alameda del Obispo, Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Sanz, M.A., 2018. Les aspects technico-économiques et les avancées de la recherche. *97ème Congrès de l'Astee. Side Event Le dessalement participe-t-il aux mesures d'adaptation aux changements climatiques?* Junio 7, 2018. Marsella. Francia.
- Sinclair-Smith, K., Mosdell, S., Kaiser, G., Lalla, Z., September, L., Mubadiro, C., Rushmere, S., Roderick, K., Brühl, J., McLaren, M., Visser, M. 2018. City of Cape Town's water map. *Journal AWWA*, 110(9), 62-66. <https://doi.org/10.1002/awwa.1154>

- Straub, A.P., Deshmukh, A., Elimelech, M. 2016. PRO for power generation from salinity gradients: is it viable? *Energ. Environ. Sci.* 9(1), 31-48. <https://doi.org/10.1039/C5EE02985F>
- Torres, M. 2008. Evolución de los procesos de desalación en España. Capítulo I del libro *La desalación en España. Aguas de la Cuenca Mediterránea*, 2008. Páginas 81-113, Depósito legal: M-27347-2008. Madrid.
- Urrea, M, 2007. *Notas sobre tecnologías y costes de la desalación*. Comunicación personal. Murcia. 2007.
- Voutchkov, N. 2016. Desalination-Past, Present and Future. Accedido el 6 de Marzo de 2018 Disponible en <http://www.iwa-network.org/desalination-past-present-future/>
- Voutchkov, N. 2017. Energy use for membrane seawater desalination. Current status and trends. *Journal desalination*, 431, 2-14. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.033>
- Zarzo, D., Campos, E., Terrero, P. 2013. Spanish experience in desalination for agriculture. *Desalination Water Treat*, 51(1-3), 53-66. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.708155>
- Zarzo, D. 2017. La desalación española, ejemplo mundial. *RETEMA*, 202.
- Zarzo, D., Prats, D., 2018. Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination*, 427, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.046>
- Zarzueta, A. 2018. Desalinización y consumo energético. *Seminario Aqua- Energy. De la huella del carbono a la huella hídrica*. Fundación Jorge Juan. 20 y 21 de Noviembre de 2018.