

# Desalación sin energía, desde el concepto a la realidad

La celda de desalación microbiana (*microbial desalination cell*, MDC en sus siglas en inglés) es una novedosa tecnología que busca un nuevo enfoque en el mundo del tratamiento del agua, de forma que en un mismo dispositivo se aprovechan los recursos presentes en el agua residual y las necesidades energéticas y de calidad para la desalación, tratando simultáneamente las dos corrientes, obteniendo agua residual tratada y agua potable. El desarrollo de esta tecnología se encuadra en el Proyecto Europeo H2020 MIDES, que busca la demostración de esta tecnología para reducir el consumo eléctrico a menos de 0,5 kWh/m<sup>3</sup> para la desalación de agua de mar. Este artículo ilustra el proceso de escalado de la tecnología desde su concepción hace escasamente 10 años, capaz de tratar escasos mililitros, hasta la reciente construcción de la primera unidad piloto capaz de desalar hasta 3,6 m<sup>3</sup>/d. Actualmente, la planta desalinizadora demostrativa construida en Denia es la mayor del mundo con el menor consumo energético reportado hasta ahora.

### Palabras clave

Bioelectroquímica, consumo energético, desalación microbiana, innovación, sostenibilidad.

### ZERO ENERGY DESALINATION, FROM CONCEPT TO REALITY

*The microbial desalination cell (MDC) is a novel technology that seeks a new approach in the world of water treatment, involving in the same concept the benefits of wastewater and the desalination needs to treat both streams simultaneously, obtaining a treated wastewater and a desalinated water stream. The development of this technology is part of the European H2020 Project MIDES, which seeks to use this technology to reduce the electrical consumption of desalination to a maximum of 0.5 kWh/m<sup>3</sup>. This article illustrates the process of scaling up of the technology, from its conception barely 10 years ago, capable of treating just few mL, until the recent construction of the first pilot plant of the technology, capable of desalinate up to 3.6 m<sup>3</sup>/d. The demonstration desalination plant erected in Denia is the largest worldwide with the lowest energy consumption reported so far.*

### Keywords

*Bioelectrochemistry, energy consumption, microbial desalination, innovation, sustainability.*

#### Juan Arévalo

jefe de Proyectos de I+D de Aqualia

#### Naiara Hernández

técnica de I+D de Aqualia

#### Patricia Zamora

jefa de Proyectos de I+D de Aqualia

#### Marina Ramirez-Moreno

investigadora del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua)

#### Pau Rodenas

investigador del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua)

#### Juan Manuel Ortiz

investigador del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua)

#### Abraham Esteve-Nuñez

investigador del Instituto Madrileño de Estudios Avanzados (IMDEA Agua)

#### José M. Viñas Castillo

técnico de I+D de Aqualia

#### Damián Amador Cabezalí

técnico de I+D de Aqualia

#### Frank Rogalla

director del Departamento de Innovación y Tecnología de Aqualia

#### Víctor M. Monsalvo García

responsable del Área de Ecoeficiencia del Departamento de Innovación y Tecnología de Aqualia



## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando el agua es escasa, se deben encontrar fuentes alternativas de agua para mantener las actividades humanas, económicas y ecológicas. Estos hechos dificultan la satisfacción de la creciente demanda de agua y protegen la función ecológica del ciclo del agua. Por lo tanto, se deben evaluar fuentes de agua alternativas, como la reutilización de aguas residuales y la desalinización de agua de mar o salobre [1].

La desalinización de agua salina es una fuente estable de agua cuando estas están disponibles. Las fuentes de agua salina se clasifican comúnmente en dos categorías de salinidad: el agua de mar contiene una alta concentración de sales disueltas (30.000-45.000 mg/L sólidos disueltos totales) y agua salobre, con una salinidad más baja (1.000-10.000 mg/L SDT) [2]. Cuando estas fuentes de agua están disponibles, el método de desalinización de una o ambas de esas corrientes salinas puede ser una solución confiable para la escasez de agua, aunque es necesario abordar algunos condicionantes técnicos para su potabilización.

La diferencia fundamental entre ambos tipos de plantas de desalinización consiste en la diferencia de presión hidráulica en la etapa de ósmosis inversa (OI), asociada con el gradiente de salinidad, por lo que la producción de agua potable a partir de fuentes de baja salinidad es especialmente atractiva cuando está disponible dado que su menor salinidad requiere menor consumo energético para vencer la presión osmótica y retirar las sales. Consecuentemente, las estaciones de desalinización de agua salobre (EDAS) presentan requisitos de energía inferiores a las estaciones de desalinización de agua de mar (EDAM) [3].

» El proyecto MIDES tiene como objetivo revolucionar la desalinización mediante el desarrollo de un proceso sostenible de baja energía llamado celda de desalación microbiana (MDC) como pretratamiento para la ósmosis inversa. Esta integración permite la desalinización de agua de mar con un consumo de energía inferior a 0,5 kWh/m<sup>3</sup> utilizando la energía contenida en las aguas residuales

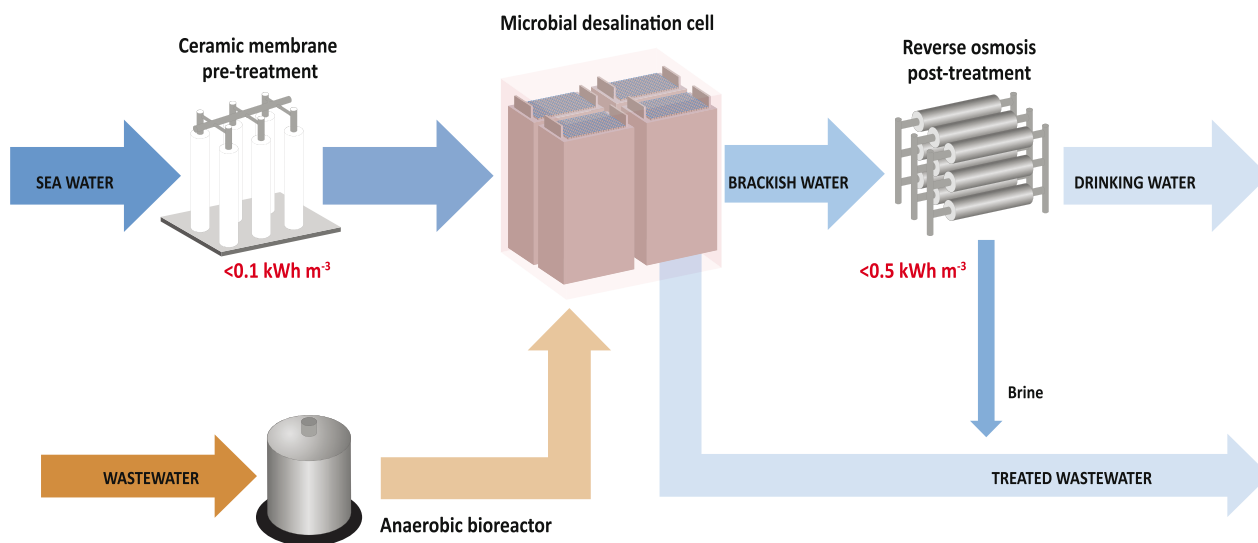
Hoy en día, la desalinización mediante tecnología de ósmosis inversa es la tecnología líder para nuevas instalaciones de desalinización tanto en EDAM, como en EDAS, con una participación del 80% en el número total de plantas de desalinización instaladas en todo el mundo [2] y una tendencia al alza, siendo la tecnología de referencia. Sin embargo, todas las tecnologías de desalinización requieren un aporte de energía, requiriendo para la tecnología más eficiente desde el punto de vista energético, la ósmosis inversa, un consumo de energía eléctrica de al menos 3 kWh/m<sup>3</sup>. En este contexto, y teniendo en cuenta las necesidades energéticas globales y el impacto ambiental asociado a la generación y distribución de la energía eléctrica, es necesario el desarrollo de soluciones tecnológicas innovadoras que permitan abordar estos retos.

El proyecto MIDES tiene como objetivo revolucionar la desalinización mediante el desarrollo de un proceso sostenible de baja energía llamado *microbial desalination cell* (MDC) como pretratamiento para la OI. La integración de la tecnología MDC con OI comercial permite la desalinización de agua de mar con un consumo de energía inferior a 0,5 kWh/m<sup>3</sup>. La MDC trata simultáneamente las aguas residuales predigeridas

anaeróticamente y realiza la desalinización utilizando la energía contenida en las aguas residuales [4]. De hecho, la MDC puede producir alrededor de 1,8 kWh de bioelectricidad a partir de la energía contenida en 1 m<sup>3</sup> de agua residual urbana (en el caso de aguas residuales industriales el contenido energético puede ser un orden de magnitud superior). Esta energía biogenerada mediante la selección y estimulación de biomasa bioelectrogénica, encargada de la depuración del agua residual, se usa directamente en la MDC para reducir el contenido de sal en el agua de mar de 35 a 5 g/L (agua salobre) sin aporte de energía externa.

A diferencia de la electrodiálisis cuyo concepto es similar a la MDC, donde se consigue la eliminación de sales mediante la migración de iones a través de las membranas de intercambio iónico, la energía eléctrica no requiere una fuente externa sino que se autogenera por vía biológica. La MDC permite alcanzar eficacias de eliminación de sales del 100%, sin embargo, en el proyecto MIDES se ha concebido una solución multibarrera con la que obtener un efluente predesalinizado en la MDC que se somete a un tratamiento posterior de afino mediante ósmosis inversa para lograr la calidad de agua potable.

FIGURA 1. Esquema general del proceso MIDES.



## 2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO MIDES

El proyecto MIDES es un proyecto financiado por la Comisión Europea a través del Programa Horizonte 2020, que cuenta con diez socios de siete países diferentes trabajando juntos en el desarrollo de plantas desalinizadoras basadas en la tecnología de MDC, su utilización, parámetros de proceso, materiales, modelos matemáticos y en general la generación de conocimiento sobre la nueva tecnología desarrollada, su implantación con el resto de tecnologías y la sostenibilidad de los procesos que conforman la desalinizadora de bajo consumo energético.

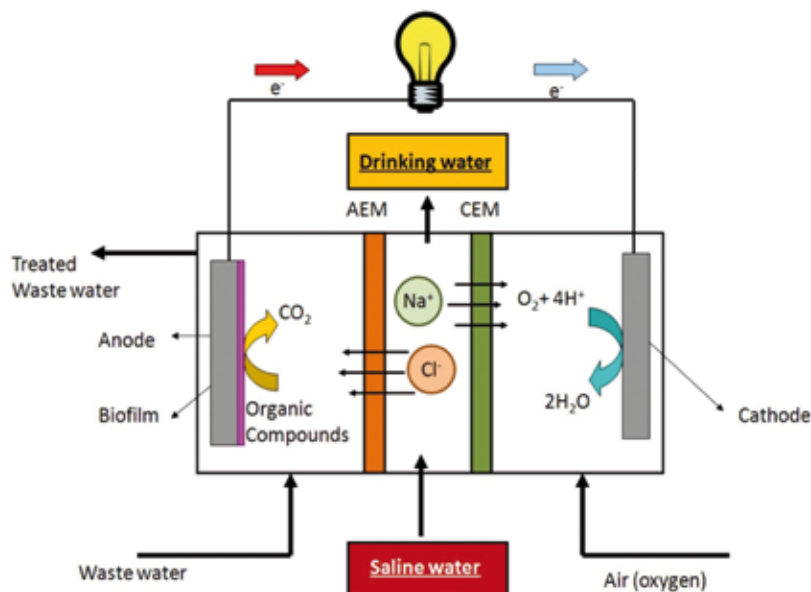
El objetivo general del Proyecto MIDES se basa en la desalación de agua de mar con un consumo energético inferior a  $0,5 \text{ kWh/m}^3$ . Simultáneamente, se depura el agua residual utilizada como fuente de energía, obteniendo dos corrientes de alta calidad (agua depurada y agua potable) partiendo de dos corrientes de una calidad menor (agua residual y agua salada). La solución MIDES se basa en la utilización de MDC junto con el resto de unidades necesarios

para el acondicionamiento de las corrientes alimentadas y el post-tratamiento de las corrientes producto (Figura 1).

Las MDC se basan en tecnología electroquímica, donde la energía contenida en las aguas residuales se convierte en electricidad utilizando bacterias electrogénicas del género *Geobacter* [5]. Pero para alimentar la MDC es necesario identificar una

fuente de aguas residuales biodegradables con alto contenido en ácidos grasos volátiles (VFA) para alimentar la biopelícula bioelectrogénica generada en el compartimento anódico del MDC. También la corriente salina (agua de mar o agua salobre) a desalar debe acondicionarse para evitar ensuciamiento en los sistemas MDC y ósmosis inversa (Figura 2).

FIGURA 2. Esquema de unidad de celda microbiana de desalación.





» La tecnología desarrollada en el proyecto MIDES se evaluará en tres lugares diferentes con tres condiciones bioclimáticas y usos de agua distintos, de forma que se cubra el posible espectro de utilización de la tecnología en cuanto a aguas a tratar, usos de las corrientes producto y lugares de implantación

El proceso general de MIDES incluye el pretratamiento de las corrientes a tratar. Inicialmente en la corriente salina se sitúa un pretratamiento con membranas de micro o ultrafiltración fabricadas en materiales cerámicos altamente hidrofílicos para la producción de efluentes de alta calidad con bajo consumo eléctrico y de reactivos, obteniendo un filtrado de alta calidad para su uso en los procesos posteriores.

En el caso del agua residual, se le somete a un pretratamiento mediante digestión anaerobia para hidrolizar la materia orgánica y maximizar la generación de ácidos grasos volátiles, que serán el principal 'combustible' que la biomasa electroactiva utilice para generar la corriente eléctrica necesaria para energizar la MDC. Dependiendo de la composición del agua residual, se ha observado que este tratamiento previo puede no ser necesario en caso de contener una concentración de ácidos grasos volátiles suficiente (300 mg/L, aproximadamente).

Posteriormente, las corrientes acondicionadas se alimentan a la MDC. El agua residual pretratada se utiliza en el bioánodo donde el biofilm electroactivo consumirá la materia orgánica y transferirá los electrones resultantes del proceso de depuración a un colector de corriente. Este electrón es transferido externamente al cátodo donde un aceptor de electrones (sales de hierro u oxígeno) cerrará el ciclo electroquímico. El agua salada a desalinizar se alimenta a la cámara salina donde se desaliniza

total o parcialmente (70-99%) antes del postratamiento mediante OI. El diseño de esta cámara salina se basa en las celdas de electrodiálisis y está dotada de membranas de intercambio iónico (aniónico y catiónico) que, utilizando la electricidad generada, separarán los iones que migrarán a través de ellas al ánodo y cátodo, respectivamente, obteniendo una corriente desalinizada.

Posteriormente, el agua parcialmente desalinizada en la MDC se le dará un tratamiento de afino mediante membranas de OI. Al reducir significativamente la salinidad en el paso previo se puede trabajar con corrientes en el grado de salobres (con menos de 5 g/L de sales), lo que hace que se requiera mucha menos presión que la comúnmente utilizada en EDAM convencionales con OI. Este hecho, conlleva un consumo eléctrico muy inferior al de la desalación de agua de mar, marcando un objetivo de por debajo de los 0,5 kWh/m<sup>3</sup>.

Con este proyecto es posible demostrar la desalinización simultánea de agua salada y depuración de aguas residuales utilizando tecnología bioelectroquímica, obteniendo dos corrientes de alta calidad a partir de dos corrientes de agua de baja calidad con un mínimo consumo energético.

### 3. ESCALADO DE LA TECNOLOGÍA

El primer concepto de MDC se reportó en 2009 por un grupo de investigadores de las Universidades de Tsingua (China) y Penn State

(Pensilvania)[6]. En estos estudios se consiguió producir unos mililitros de agua potable empleando una MDC con un área de 9 cm<sup>2</sup>. Posteriormente, en 2015, se consiguió aumentar la producción de agua potable mediante el escalado de una MDC, obteniendo una velocidad de desalación de 0,077 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, llevando a cabo la desalación parcial desde 52,4 a 20 mS/cm [7]. A pesar de la mejora conseguida, la producción específica de agua era 200 veces inferior a la producida por un sistema de desalación convencional.

Uno de los objetivos del proyecto MIDES es la construcción de la primera MDC piloto y conseguir una mejora en la producción de agua desalinizada minimizando el consumo energético. Durante el desarrollo del proyecto MIDES, se llevó a cabo un cuidadoso proceso de escalado en el que cada uno de los socios del proyecto han aportado los desarrollos y conocimiento necesarios hasta llegar a la construcción de la primera MDC a escala piloto. Como se detalla en la **Figura 3**, el proceso de escalado partió del desarrollo de una MDC a escala laboratorio, pasando por una unidad prepiloto, para finalizar con la construcción de la MDC a escala piloto.

Como se ha indicado anteriormente, el punto de partida en el proyecto MIDES fue el desarrollo y estudio de una MDC escala laboratorio. Esta MDC consistió en un reactor tipo filtro prensa con un área de 100 cm<sup>2</sup> (10 x10 cm), en el que se emplearon juntas de silicona para aislar

**FIGURA 3.** Cada una de las MDC desarrolladas en el proyecto MIDES. Escalas: a) laboratorio (100 cm<sup>2</sup>); b) prepiloto unitaria (600 cm<sup>2</sup> x 10); c) pre-piloto stack (600 cm<sup>2</sup>); d) piloto unitaria (4.000 cm<sup>2</sup>) y e) piloto stack (4.000 cm<sup>2</sup> x 15).



cada uno de los compartimentos. Esta celda estaba compuesta por un compartimento anódico anaeróbico, donde se inoculó la bacteria, alimentado de materia orgánica. En el centro de la celda de desalación se situó el compartimento salino, aislado del resto mediante una membrana de intercambio catiónico y otra de intercambio aniónico. Por último, se contaba con el compartimento catódico donde llevar a cabo la reducción de una disolución de naturaleza férrica.

Se realizaron una serie de ensayos para estudiar el rendimiento en la producción de agua potable, para ello se emplearon distintas corrientes salinas (sintéticas y reales) como agua salobre subterránea, agua salobre superficial y agua de mar del Mediterráneo. A su vez, se estudió la influencia de la naturaleza del agua residual (anolito) empleando una serie aguas residuales municipales e industriales, tanto sintéticas como reales. En esta parte del proyecto se estudió la influencia en el rendimiento del proceso de los distintos materiales que componían la celda, como electrodos y membranas. De

los ensayos realizados se obtuvieron valores producción específica de agua potable entre 0,2 y 3 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> desalinizando agua de mar y salobre, respectivamente. Estos resultados fueron satisfactorios y ampliaron los rendimientos reportados en la literatura hasta la fecha (Zhang *et al.*, 2015).

Tras los conocimientos adquiridos y gracias al trabajo realizado con la MDC a escala laboratorio, el siguiente paso fue el desarrollo de una MDC escala prepiloto. También en esta parte del proyecto todos los socios colaboraron estrechamente en el diseño, construcción y operación. La MDC prepiloto se diseñó basándose en un modelo de reactor filtro prensa. Primeramente se construyó una celda unitaria, al igual que la MDC escala laboratorio, con un único par de electrodos y un compartimento salino delimitado por una membrana de intercambio catiónico y una membrana de intercambio aniónico, con un área de 600 cm<sup>2</sup> (21 x 29 cm).

Con esta celda los socios del proyecto pudieron testar y optimizar los nuevos materiales desarrollados *ad*

*hoc* para la tecnología y conseguir mayor producción de agua desalada. Partiendo del diseño desarrollado por el personal de IMDEA Agua, los electrodos, tanto ánodo como cátodo, fueron desarrollados por el socio SGL Carbon que escaló y testó distintos tipos de carbón grafitico para ser empleado como colectores de corriente, así como una serie de espumas de carbón biocompatibles con la bacteria y donde se llevase a cabo un óptimo crecimiento bacteriano.

Paralelamente, Fujifilm y LEITAT trabajaron en la síntesis, escalado y optimización de las membranas de intercambio catiónico y aniónico, teniendo en cuenta aspectos como la resistencia eléctrica superficial, la permeoselectividad y la resistencia al ensuciamiento. Los componentes plásticos de la celda microbiana fueron desarrollados por la empresa Mikrolin mediante el empleo de polímeros reciclados, favoreciendo de esta manera la economía circular. Oncontrol y Simtech se encargaron de la modelización del proceso y el desarrollo del sistema de monitorización y control de la MDC.



Una vez optimizados los materiales se realizaron los mismos ensayos de desalación estudiados con la MDC a escala laboratorio, obteniendo rendimientos mayores al 90% en todos los escenarios, con valores de producción específica de agua potable de entre 0,6 y 8,8 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup> para la desalación de agua de mar y agua salobre, respectivamente.

Tras el éxito en el escalado se prosiguió con la construcción de otra MDC escala prepiloto con un área de 600 cm<sup>2</sup>, pero en este caso formada por un total de 10 celdas unidad (*stack*), trabajando en paralelo con las mismas condiciones, empleando la misma corriente salina y los mismos electrolitos. Se plantearon distintos diseños donde algunos de los puntos a optimizar fueron la distribución de flujo o la naturaleza de las juntas para conseguir el correcto sellado de cada una de las celdas y compartimentos. Una vez optimizados cada uno de los componentes requeridos para el ensamblaje de la MDC prepiloto *stack*, se testó dicha celda repitiendo los mismos ensayos realizados anteriormente, alcanzando velocidades de producción de agua potable de hasta 12,5 L m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>. Estos resultados demostraron la buena escalabilidad del diseño, así como la mejora notable con respecto a los estudios reportados en la literatura hasta el momento.

Una vez alcanzado el éxito en el desarrollo de la MDC prepiloto tanto unitaria como *stack*, se inició el diseño de la MDC piloto. En este caso la MDC consistió en un conjunto de 15 celdas con un área de 4.000 cm<sup>2</sup> cada una, con un planteamiento similar al de la MDC prepiloto, conexión eléctrica monopolar y trabajando cada celda en paralelo.

Basándose en los resultados obtenidos anteriormente, los socios

**FIGURA 4.** Imagen de alguno de los componentes de la MDC piloto. De izquierda a derecha empezando por arriba: membrana de intercambio catiónico, marco catódico, distribuidor de flujo catódico, espuma de carbón, colector de corriente catódico y placa final aislante.

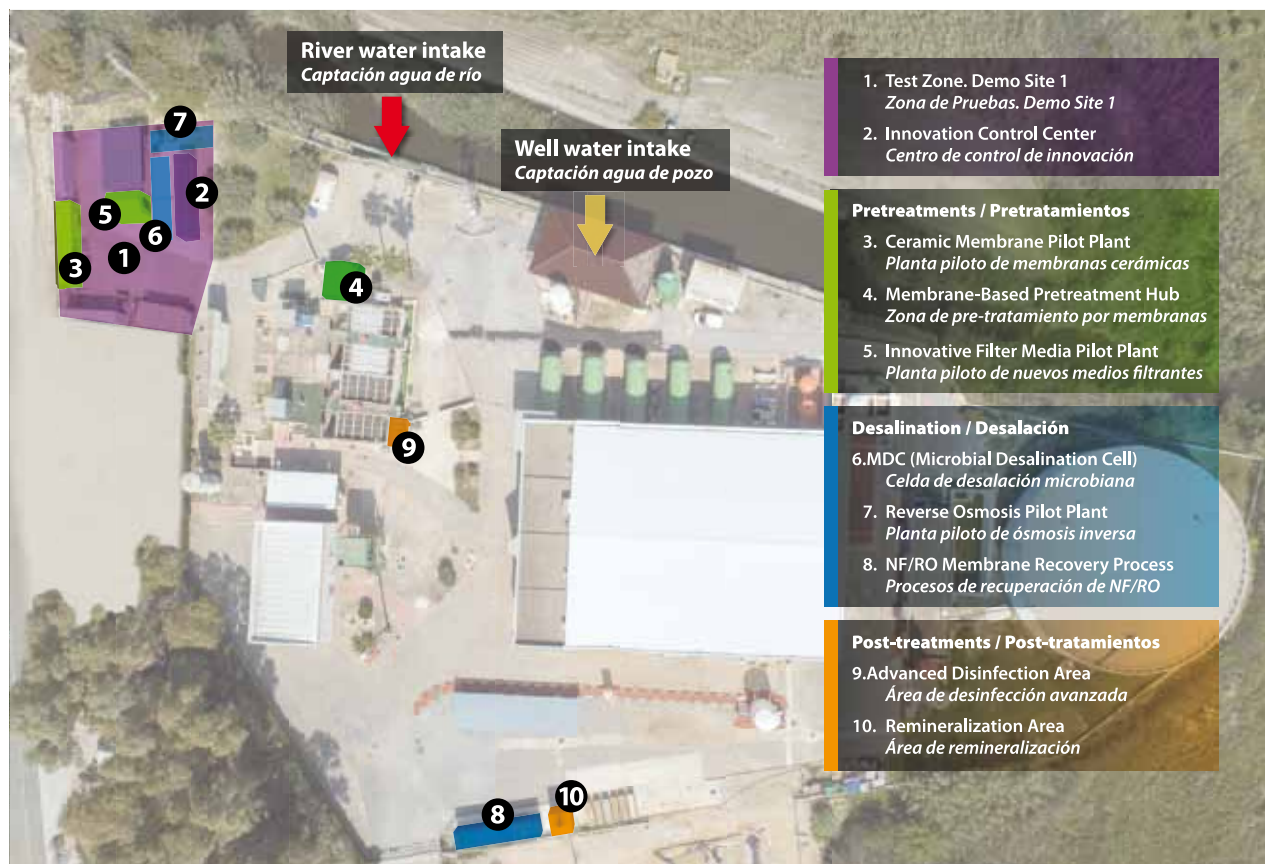


del proyecto plantearon una serie de cambios para la construcción de la MDC piloto, necesarios para solventar los retos que surgieron con el aumento del área y el número de celdas. Con la finalidad de mejorar el aislamiento entre compartimentos. Además, se reemplazaron las juntas de silicona por unos marcos de polímeros reciclados, se modificó la distribución de flujo y los puntos de alimentación para mejorar la distribución de corrientes. Gracias al nuevo diseño se consiguió reducir el espesor del compartimento catódico y anódico.

En la **Figura 4** se muestran algunos de los componentes empleados

en el ensamblaje de la celda de desalación microbiana piloto. Se desarrolló un método de ensamblaje y de pruebas hidráulicas y eléctricas para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Tras el total ensamblaje de las 15 celdas se observó una correcta distribución de flujo de las tres corrientes, así como el correcto funcionamiento electroquímico de la unidad. La MDC piloto se trasladó hasta el Centro de Investigación en Desalación (CID) que Aqualia ha inaugurado en Denia (Alicante), donde se realizaron los primeros ensayos y donde continuará su operación hasta la finalización del proyecto.

**FIGURA 5.** Centro de Innovación en Desalación de Aqualia en Denia.



#### 4. LUGAR DE DEMOSTRACIÓN: DENIA

La tecnología desarrollada en el proyecto MIDES se evaluará en tres lugares diferentes con tres condiciones bioclimáticas y usos de agua distintos, de forma que se cubra el posible espectro de utilización de la tecnología en cuanto a aguas a tratar, usos de las corrientes producto y lugares de implantación.

El centro principal de desarrollo es el Centro de Innovación en Desalación (CID) que Aqualia ha inaugurado en Denia, provincia de Alicante. En este centro se han instalado todas las tecnologías que incluyen el proceso global de tratamiento MIDES, que incluye desde pretratamientos a posttratamientos, donde actualmente opera el primer piloto MDC que se ha construido a nivel mundial (Figura 5).

A modo de presentación, el pasado mes de noviembre y aprovechando la implantación del piloto de MDC en Denia se celebró en la localidad alicantina la denominada Desalination Week (25-29/11/2019), con la celebración de una escuela de desalación organizada por la IHE Delft y un *workshop* sobre desalación sostenible organizado por Aqualia. Durante estos actos, expertos de 17 países analizaron los enfoques más innovadores para generar agua dulce con el menor gasto de energía e impacto en el medio ambiente. Durante los tres días del evento se presentaron 25 ponencias de alto nivel y se inauguró el CID, un espacio ubicado en la Desaladora de Racons, donde Aqualia desarrolla gran parte de las actividades de I+D en materia de desalación.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la UE a través del programa de innovación e investigación Horizon 2020, con Grant Agreement No. 685793.

##### Bibliografía

[1] Palomar, P.; Lozada, I.J. (2010). Desalination in Spain: recent developments and recommendations. *Desalination*, núm. 255(1), págs. 97-106.

[2] Greenlee, L.F.; Lawler, D.F.; Freeman, B.D.; Marrot, B.; Moulin, P. (2009). Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges. *Water Research*, núm. 43(9), págs. 2.317-2.348.

[3] Fritzmann, C.; Löwenberg, J.; Wintgens, T.; Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, núm. 216, (1-3), págs. 1-76.

[4] Borjas, Z.; Esteve-Núñez, A.; Ortiz, J.M. (2017). Strategies for merging microbial fuel cell technologies in water desalination processes: start-up protocol and desalination efficiency assessment. *Journal of Power Sources*, núm. 356, págs. 519-528.

[5] Qu, Y.; Feng, Y.; Liu, J.; He, W.; Shi, X.; Yang, Q.; Lv, J.; Logan, B.E. (2013). Salt removal using multiple microbial desalination cells under continuous flow conditions. *Desalination*, núm. 317, págs. 17-22.

[6] Cao, X.; Huang, X.; Liang, P.; Xiao, K.; Zhou, Y.; Zhang, X.; Logan, B.E. (2009). A new method for water desalination using microbial desalination cells. *Environmental Science & Technology*, núm. 43(18), págs. 7.148-7.152.

[7] Zhang, F.; He, Z. (2015). Scaling up microbial desalination cell system with a post-aerobic process for simultaneous wastewater treatment and seawater desalination. *Desalination*, núm. 360, págs. 28-34.