

CELDA DE DESALACIÓN MICROBIANA PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA POTABLE Y EL TRATAMIENTO SIMULTÁNEO DEL AGUA RESIDUAL, CON BAJO CONSUMO ENERGÉTICO

1. CONCEPTOS GENERALES Y ESTADO DEL ARTE

Las Tecnologías Electroquímicas Microbianas (en inglés, *Microbial Electrochemical Technologies-MET*) constituyen una plataforma [1] de tecnologías emergentes basadas en la interacción entre bacterias electroactivas y materiales conductores de la electricidad (electrodos). En este sentido, la Celda de Combustible Microbiana (en inglés, *Microbial Fuel Cell-MFC*), permite la transformación directa de materia orgánica soluble en corriente eléctrica [2]. La energía producida (alrededor de $0,001-19 \text{ W m}^{-2}$ con respecto a la sección transversal de la celda) [3] podría usarse en el mismo sistema para mejorar la degradación de la materia orgánica e impulsar otros procesos que requieran energía electroquímica, operando de manera autosuficiente y de modo descentralizado.

En este contexto, la Celda de Desalación Microbiana (en inglés, *Microbial Desalination Cell-MDC*) podría considerarse como la integración de una Celda de Combustible Microbiana y una celda de electrodiálisis

ÍNDICE

- 1. CONCEPTOS GENERALES Y ESTADO DEL ARTE**
- 2. RESULTADOS A ESCALA LABORATORIO DE DESALACIÓN MICROBIANA**
 - 2.1 Resultados de la Celda de Desalación Microbiana escala laboratorio para el tratamiento de agua salobre y marina (sintética)
- 3. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDA DE DESALACIÓN MICROBIANA A ESCALA PILOTO INDUSTRIAL**
 - 3.1 Resultados de desalación de agua salobre
 - 3.2 Resultados de desalación de agua marina
- 4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA FUTURA DE LA TECNOLOGÍA**
- 5. REFERENCIAS**

AUTORES

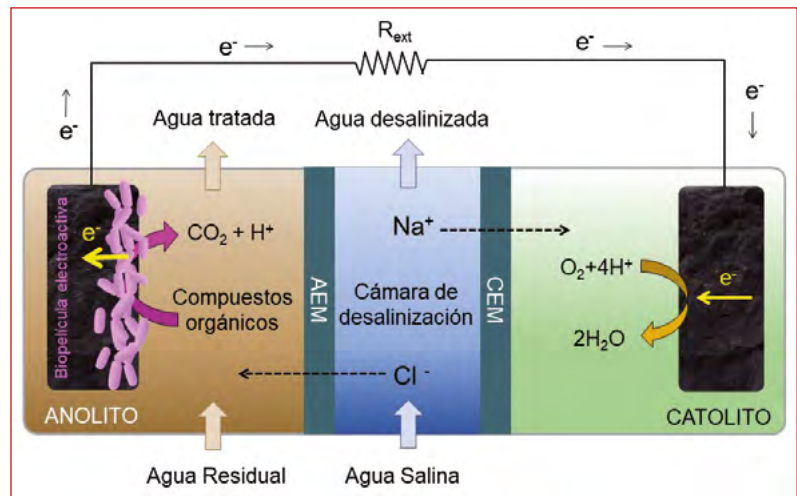
Juan Manuel Ortiz Díaz-Guerra^{1,2}
 Pau Ródenas Motos¹
 Marina Ramírez Moreno^{1,2}
 Abraham Esteve Núñez^{1,2}
 Patricia Zamora Bonachela³
 Víctor Monsalvo García³
 Frank Rogalla³

¹Instituto IMDEA Agua.
 ALCALÁ DE HENARES, MADRID (ESPAÑA).

²Grupo Bioe. Ingeniería Química.
 UNIVERSIDAD DE ALCALA, ALCALÁ DE HENARES, MADRID (ESPAÑA).

³FCC AQUALIA, Departamento de Innovación y Tecnología.
 MADRID (ESPAÑA).

(ED) para tratar aguas residuales y desalinizar agua de mar. El sistema emplea la energía proporcionada por la oxidación de la materia orgánica contenida en las aguas residuales para producir la migración de los iones de un efluente salino y, por lo tanto, producir agua potable a partir de agua de mar. Estos dos procesos (depuración y obtención de agua potable) se llevan a cabo en el mismo dispositivo de manera simultánea. Por lo tanto, las Celdas de Desalación Microbianas podrían emplearse para reducir la energía asociada a la desalinización de agua con tecnologías convencionales y evitar los gases de efecto invernadero asociados (la producción de agua desalinizada mediante Ósmosis Inversa produce alrededor de 1,78 kg de CO_2 por metro cúbico, estimando $600 \text{ g CO}_2 \text{ kWh}^{-1}$ en el mix energético de la UE).



■ **Figura 1.** Esquema de Celda de Desalación Microbiana. AEM: membrana de intercambio aniónica; CEM: membrana de intercambio catiónica. La biopelícula de microorganismos sobre la superficie del ánodo proporciona el potencial eléctrico para la migración de los iones.

La Celda de Desalación Microbiana está compuesta de al menos tres cámaras (**Figura 1**): 1) una cámara anódica que contiene la comunidad microbiana electroactiva que oxida la materia orgánica (combustible) contenida en las aguas residuales y luego transfiere electrones al ánodo; 2) un compartimento central de desalinización separado por membranas de intercambio

iónico (membrana aniónica-AEM y membrana catiónica-CEM); 3) una cámara catódica donde se produce la reacción de reducción (por ejemplo, reducción de oxígeno a agua). Las membranas de intercambio iónico (AEM y CEM) se colocan alternativamente entre el compartimiento anódico y catódico, como se indica en la **Figura 1**. Para permitir el flujo de corriente eléctrica se coloca una carga externa entre el ánodo y el cátodo. Una vez que se introduce materia orgánica para alimentar el compartimiento anódico, y una disolución con aceptores de electrones en el compartimiento catódico (por ejemplo, un complejo de Fe^{3+} u oxígeno en medio ácido) [4], se establece una diferencia de potencial entre ambos electrodos. Debido al campo que se establece en el interior del dispositivo electroquímico, los aniones y cationes migran a través de las respectivas membranas aumentando la concentración de sal en los compartimientos anódico y catódico, mientras que disminuye en el compartimiento salino (compartimento central). Por lo tanto, la Celda de Desalación Microbiana constituye un proceso de desalación sostenible, ya que no requiere aporte de energía externa, ya que son los propios microorganismos que se encuentran en la cámara anódica los que producen el potencial necesario para llevar a cabo la desalación a partir de los residuos contenidos en el agua residual (combustible).

Desde que la primera prueba de concepto de Celda de Desalación Microbiana fuera propuesta en 2009 por Cao et al. [5,6], diferentes estudios han aparecido en la literatura científica explorando nuevas configuraciones, como por ejemplo reactores tubulares de dos compartimentos (el ánodo y cámara salina) [7,8], y diseños alternativos que utilizan el apilamiento de diferentes celdas unitarias para maximizar la tasa de desalación empleando varios pares de células [9–11]. En algunos casos, el metabolismo bacteriano en la cámara anódica puede verse afectado por el pH (ligera acidificación dentro de la biopelícula de microorganismos) y para mitigar este efecto se pueden recircular parcial o totalmente parte de la efluente de salida del cátodo [11,12].

Las membranas son elementos críticos en las Celdas de Desalación Microbianas. Algunos diseños propuestos en la literatura

incluyen membranas de ósmosis directa para separar el ánodo y la cámara salina [13,14], en lugar de la membrana aniónica, y aprovechar así parte del gradiente osmótico entre las disoluciones de trabajo. Otros conceptos utilizan resinas de intercambio iónico dentro del compartimento salino, lo que permite mejorar la desalinización y la producción de electricidad a bajas concentraciones de sal [15,16]. Desde un punto de vista operacional, la mayoría de los ensayos de Celdas de Desalación Microbianas se han realizado a escala de laboratorio con acetato como combustible debido a la alta eficiencia coulombica que se alcanza mediante el empleo de bacterias electroactivas (es decir, cantidad de electrones que provienen de la oxidación de materia orgánica y que son recuperados en forma de corriente eléctrica) [5,13,17–21].

Es importante indicar también que se han realizado estudios empleando aguas residuales urbanas reales con alta carga, siendo pre-tratadas apropiadamente mediante el empleo de varias Celdas de Desalación Microbianas conectadas en múltiples etapas [22], y también se ha reportado el tratamiento de aguas residuales reales utilizando membranas de microfiltración junto con Celdas de Desalación Microbianas [23]. Aunque la mayoría de los prototipos hasta la fecha solo funcionan a escala de laboratorio (es decir, mililitros) [24], también se encuentra en la bibliografía estudios a escala piloto con volúmenes de hasta 100 L, logrando la desalación parcial del agua de mar [25]. En este sentido, es importante indicar que en el marco de proyecto H2020-MIDES (“Microbial Desalination for Low Energy Drinking Water”, <https://www.midesh2020.eu/>) se han construido dos Plantas Pilotos con capacidad de 3.500 litros/día para validar la tecnología de MDC, lo que supone la mayor instalación de esta tecnología hasta la fecha. El principal objetivo es validar la tecnología en instalaciones de producción de agua (plantas desoladoras) para el escalado de la misma y mejorar la eficiencia energética en el proceso de la desalación, aumentado así la sostenibilidad del proceso de producción de agua [26].

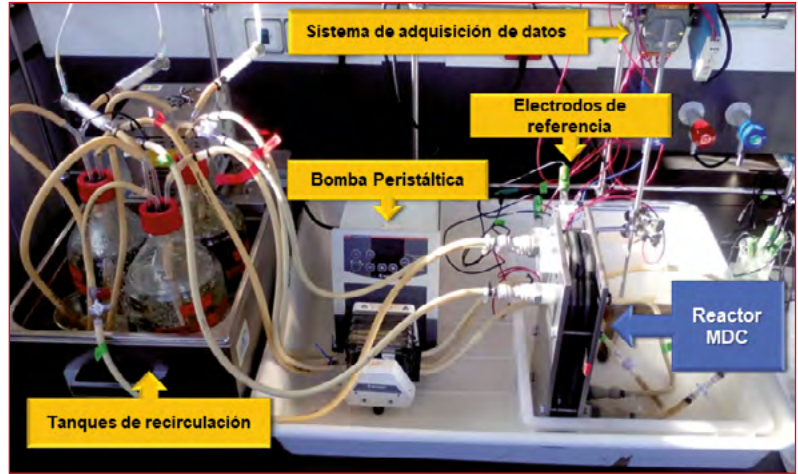
Por otro lado, las Celdas de Desalación Microbiana también se han propuesto como tecnología sostenible para algunos otros procesos como, por ejemplo, la eliminación de nitrógeno y sul-

fato de las aguas residuales de la industria alimentaria [27], el tratamiento de lixiviados [28], la recuperación de amoníaco de digestores anaerobios [29] y la producción y purificación de compuestos químicos [30–33].

Por último, en cuanto a las principales limitaciones de las Celdas de Desalación Microbianas se pueden señalar i) el drástico aumento de la resistencia interna debido a los cambios en la conductividad del medio salino, y ii) las variaciones de pH en la cámara anódica que pueden afectar el crecimiento y rendimiento de la biopelícula electrogénica. En relación con la eficiencia del proceso de desalación, las principales limitaciones son el bajo potencial para impulsar la migración de iones (baja densidad de corriente), la retrodifusión de sales entre el compartimento anódico/catódico y salino, y el paso de agua a través de las membranas (procesos de ósmosis y electro-ósmosis). Por las razones indicadas, el estudio a escala de laboratorio de estos sistemas podría ayudar a entender el comportamiento en diferentes condiciones experimentales, y así permitir la optimización de los mismos para una futura implementación a escala real.

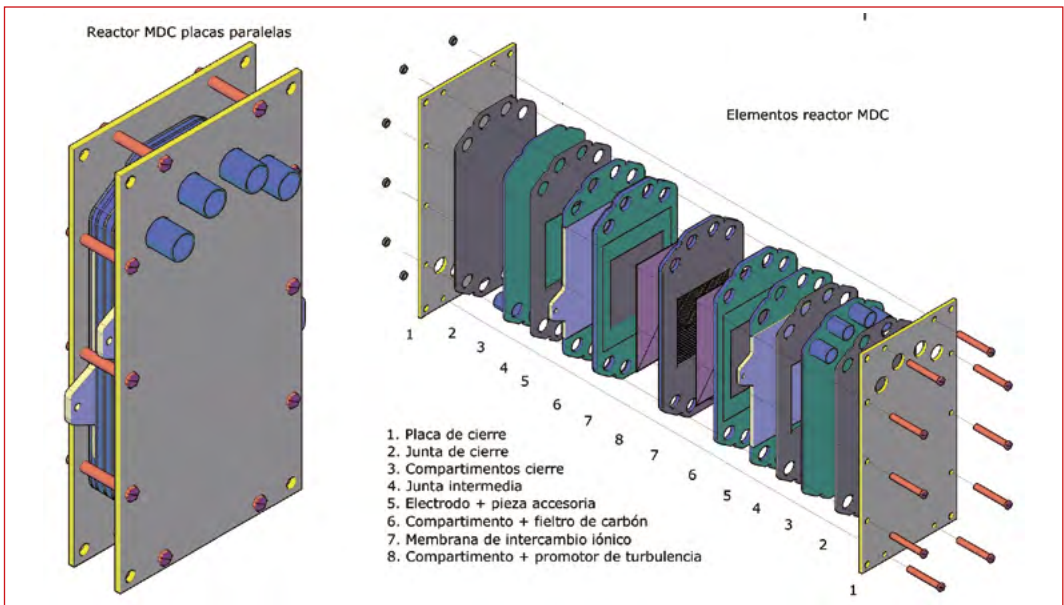
2. RESULTADOS A ESCALA LABORATORIO DE DESALACIÓN MICROBIANA

En esta sección se presentan resultados experimentales a escala de laboratorio de Celdas de Desalación Microbianas para la obtención de agua potable a partir de aguas salobres y marinas. El reactor bioelectroquímico (ver **Figura 2**) consta de varios compartimentos de polipropileno y juntas de neopreno en configuración de filtro prensa. El dispositivo se cierra con tornillos de acero inoxidable para evitar cualquier fuga del sistema. Como disolución anolito se empleó *Fresh Water Medium* suplementado con 20 mM de acetato de sodio. Como disolución catolito se empleó disolución de ferro-ferricianuro 0,06 M como aceptor de electrones, $\text{pH} = 7,4$ (i.e. $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + 1e^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$, $E^0 = 0,36 \text{ V}$). Como efluentes salinos, se han utilizado aguas sintéticas con contenido de NaCl equivalente tanto a aguas salo-



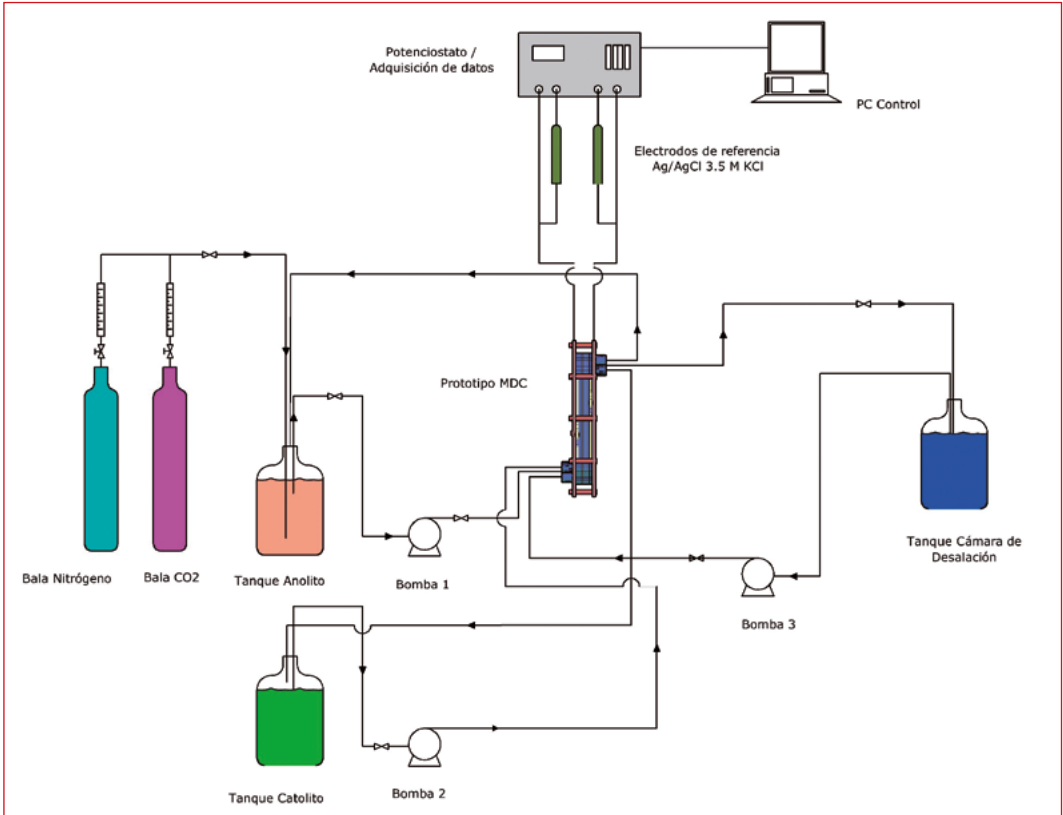
■ **Figura 2.** Imagen del sistema de Celda de Desalación Microbiana escala laboratorio.

bres (6 g/L) como aguas marinas (35 g/L). La **Tabla 1** muestra las principales características del sistema experimental de Celda de Desalación Microbiana empleado en el estudio. La **Figura 3** muestra el diagrama de flujo de la configuración experimental.



■ **Figura 3a.** Diagrama del reactor Celda de Desalación Microbiana.

Celdas de desalación microbiana para la producción de agua potable y el tratamiento simultáneo del agua residual, con bajo consumo energético



■ **Figura 3b.** Diagrama de flujo del dispositivo experimental (figura adaptada de [34]).

Tabla 1. Principales características de sistema experimental escala laboratorio de Celda de Desalación Microbiana

Parámetro	Valor/Descripción
Área transversal (cm ²)	100
Área activa (cm)	10x10
Número de celdas unitarias	1
Ánodo	
Colectores de corriente	Plancha de grafito isostático (Grade 2114-45, Mersen)
Electrodos	RVG 2000 MERSEN
Espesor de electrodos (mm)	Filtro de Carbón
Espesor compartimento (mm)	4,6
	9
Cátodo	
Colectores de corriente	Plancha de grafito isostático (Grade 2114-45, Mersen)
Electrodos	RVG 2000 MERSEN
Espesor de electrodos (mm)	Filtro de Carbón
Espesor compartimento (mm)	4,6
	9

Tabla 1. Principales características de sistema experimental escala laboratorio de Celda de Desalación Microbiana. (CONT.)

Parámetro	Valor/Descripción
Compartimento salino	
Espesor compartimento (mm)	9
Membrana aniónica	Neosepta AMX
Resistencia electrica ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)[*]	2,4
Permselectividad (%) ^{**}	>93
Espesor membrana(μm)[*]	0,14
Membrana catiónica	Neosepta CMX
Resistencia electrica ($\Omega \cdot \text{cm}^{-2}$)[*]	3,0
Permselectividad (%) ^{**}	>90
Espesor membrana(μm)[*]	0,17
Condiciones de operación	
Modo de operación	Lotes (3 corrientes)
Caudal ($\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$)	95
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25-30 $^{\circ}\text{C}$
Carga externa (Ω)	2,5
Corrientes	
Anolito	FWM + Acetato de Sodio
Catolito	$\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$
Corriente salina	NaCl
Tanques	
Volumen de anolito (mL)	2150
Volumen de catolito (mL)	2150
Volumen salino (mL)	370
Relación $V_{\text{an}} : V_{\text{saline}} : V_{\text{catholyte}}$	5:1:5
Protocolo de Start-up	
Inóculo inicial	Cultivo puro de <i>Geobacter sulfurreducens</i>
Periodo (horas)	140

* Membrana equilibrada con disolución de NaCl 0,5 M, a 25 $^{\circ}\text{C}$ (datos proporcionados por el fabricante)

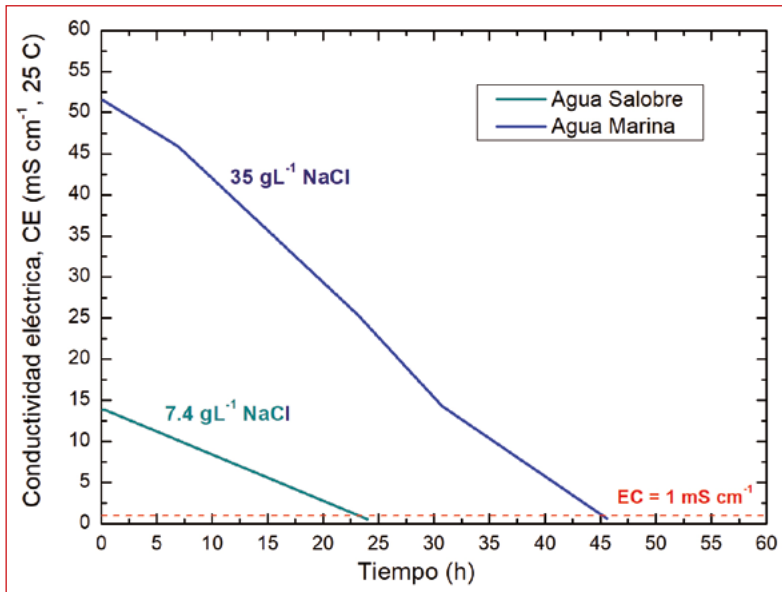
** Medido en laboratorio. Membrana equilibrada con disoluciones de NaCl 0,1 M y 0,5 M.

2.1. Resultados de la Celda de Desalación Microbiana escala laboratorio para el tratamiento de agua salobre y marina (sintética)

Para el correcto funcionamiento del sistema experimental de Celda de Desalación Microbiana se siguió el procedimiento de “start-up” descrito en la bibliografía [34,35], mediante el cual se adapta el cultivo de microorganismos electrogénicos antes de su inoculación en el compartimento anódico del reactor bioelectroquímico, y después se permite que la biopelícula de

microorganismos se desarrolle sobre la superficie del ánodo de modo que pueda proporcionar la corriente eléctrica suficiente para producir la migración de los iones en su interior (desalación). De este modo se reduce significativamente el período de puesta en marcha del sistema. Una vez alcanzado este punto, la Celda de Desalación Microbiana fue capaz de producir agua desalinizada a partir de aguas salobres y marina. La **Figura 4** muestra la disminución de la conductividad para varios experimentos con varias concentraciones iniciales de NaCl. **Tabla 2** resume los principales resultados obtenidos.

En primer lugar, es importante indicar que la desalación en ambos experimentos se llevó a cabo de manera completa (esto es, conductividad eléctrica del agua $< 1 \text{ mS cm}^{-1}$). Este hecho es de gran significancia debido a que en la mayoría de las publicaciones científicas relativas a Celdas de Desalación Microbiana se indica que solamente es posible la desalación parcial del agua de mar utilizando esta tecnología. En segundo lugar, la producción de agua desalinizada alcanza valores superiores al



■ **Figura 4.** Conductividad eléctrica (CE) en el tanque salino vs tiempo empleando la Celda de Desalación Microbiana escala laboratorio con catolito líquido. La línea horizontal muestra la conductividad eléctrica correspondiente al agua potable (1 mS cm^{-1}).

Tabla 2. Resultados para la Celda de Desalación Microbiana a escala laboratorio con diferentes efluentes salinos: agua salobre y marina (sintéticas).

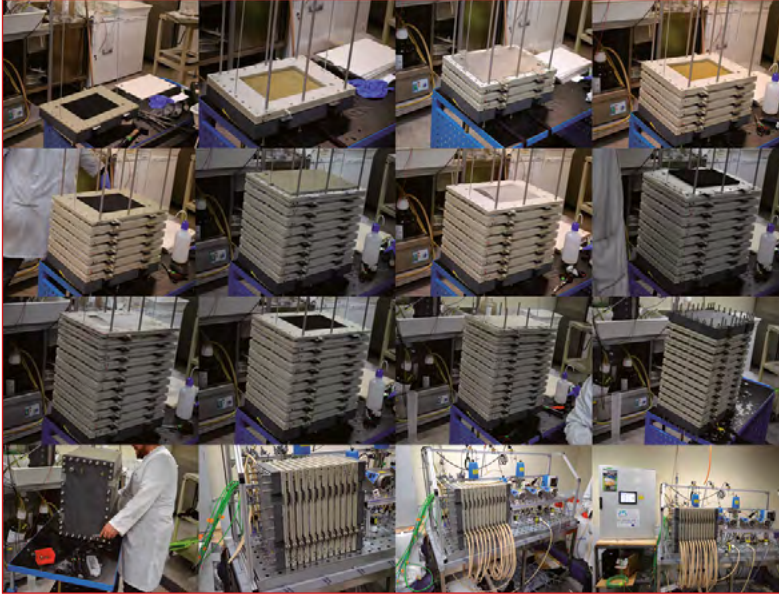
Salinidad (g L ⁻¹ NaCl)	Volumen salino (L)	Volumen Anólito (L)	Volumen católito (L)	Tiempo de desalación (h) (CE < 1 mScm ⁻¹)	Tasa Nominal de Desalación, TND (Lm ⁻² h ⁻¹)	Eficiencia en corriente, η_c (%)	Tasa de eliminación de DQO (kg DQO m ⁻³ día ⁻¹)
7,3 (agua salobre)	0,37	2,15	2,15	23	1,5	81	7,14
35,0 (agua de mar)	0,37	2,15	2,15	43	0,7	108	19,7

reportado en la literatura (0,077 L m⁻² h⁻¹ para desalación parcial de 52,4 a 20 mS cm⁻¹) [25]. Los resultados experimentales muestran que la tecnología de Celda de Desalación Microbiana es capaz de producir hasta 0,82 Lm⁻² h⁻¹ para la desalación completa de agua de mar.

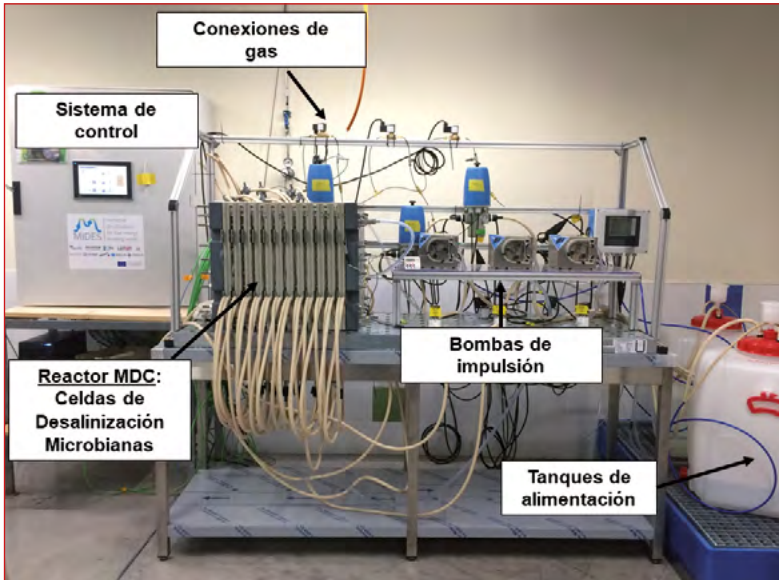
3. DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE UN SISTEMA DE CELDA DE DESALACIÓN MICROBIANA A ESCALA PILOTO INDUSTRIAL

Una vez validado el diseño de la configuración a escala de laboratorio (sección transversal: 100 cm², 1 celda unitaria), el sistema se amplió a escala piloto (sección transversal: 600 cm², 15-20 celdas unitarias) con el objetivo de comparar el rendimiento de ambos sistemas (laboratorio y piloto) y ganar conocimiento del comportamiento del sistema operando con aguas reales (agua residual real, efluentes salinos reales). La **Figura 5** se muestra la secuencia del montaje de la Celda de Desalación Microbiana a escala piloto: placas de apriete, juntas, compartimentos, membranas, colectores de corriente, electrodos, conexión a equipos auxiliares: bombas, medidores de caudal, integración de sistema de automatización y control.

La **Figura 6** muestra la configuración final del sistema piloto de Celda de Desalación Microbiana. La operación con el siste-



■ **Figura 5.** Secuencia de montaje del sistema de Celda de Desalación Microbiana piloto.



■ **Figura 6.** Celda de Desalación Microbiana piloto para la desalinización sostenible de agua salobre y marina utilizando materia orgánica. Celdas unitarias: Sección transversal: 600 cm². Compartimentos: 15-20 unidades (9000-12000 cm²). Electrodo: grafito isostático + fieltro de grafito. Membranas: membranas de intercambio iónico (aniónicas y catiónicas).

ma piloto es útil para conocer en profundidad el comportamiento bioelectroquímico del sistema: potencial eléctrico de los electrodos durante el ciclo de desalación, influencia de la salinidad en el proceso, análisis de los principales parámetros para el correcto funcionamiento del sistema, funcionamiento del sistema con aguas reales, etc.

Los párrafos siguientes muestran los principales resultados para la desalación de agua salobre y marina.

3.1. Resultados de desalación de agua salobre

La siguiente tabla muestra los principales resultados para la desalación de agua salobre sintética y real utilizando el sistema piloto de Celda de Desalación Microbiana. Además, se han empleado aguas residuales sintéticas e industriales (industria agroalimentaria) como fuente de materia orgánica para alimentar al sistema, con el objetivo de comparar el rendimiento en ambos casos y determinar la capacidad de degradación de la demanda química de oxígeno (DQO) en el efluente de agua residual utilizado para llevar a cabo la desalación. Los experimentos se llevaron a cabo utilizando catolito líquido con ferro-ferricianuro como aceptor de electrones ($0,06 \text{ M}$, $\text{pH} = 7,4$, i.e. $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-} + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$, $E^0 = 0,36 \text{ V}$).

La Tasa Nominal de Desalación (TND) para la desalación de agua salobre fue de $3,9 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ cuando se emplea aguas residuales reales y salobres reales (industria alimentaria, cervecería). La diferencia entre este valor y $11,24 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (utilizando aguas residuales sintéticas como anolito) se debe principalmente a la diferencia en la conductividad inicial del anolito (sintético: $9,16 \text{ mS cm}^{-1}$ y aguas residuales: $2,55 \text{ mS cm}^{-1}$), lo que indica que este parámetro juega un papel clave en el rendimiento de la Celda de Desalación Microbiana. En este sentido, la menor conductividad eléctrica en las aguas residuales reales aumenta la resistencia interna, reduciendo la energía disponible para impulsar el proceso de desalación. Por lo tanto, esta consideración debe tenerse en cuenta cuando se utilizan aguas residuales reales como alimentación.

Tabla 3. Principales resultados de Celda de Desalación Microbiana a escala piloto para la desalación de agua salobre (real y sintética).

Id.	Corriente salina	Anolito	Conductividad compartimento salino	Conductividad compartimento anolito	Tasa Nominal de Desalación (TND)	Eficiencia en corriente, η_C	Eficiencia coulombica	Producción de energía	Tasa de eliminación de DQO
			$t \gg 0$ ($mS\ cm^{-1}$)	$t \gg 0$ ($mS\ cm^{-1}$)	$L\ m^{-2}\ h^{-1}$	%	%	$kWh\ m^{-3}$	$kg\ DQO\ m^{-3}\ día^{-1}$
1	NaCl 5 g/L	Medio sintético (FWM)	10,60	9,28	1,27	44,8	32,41	1,706	8,45
2	NaCl 1,75 g/L	Medio sintético (FWM)	3,16	9,16	6,25	31,8	31,27	0,691	13,70
3	Río Racons, Dénia	Medio sintético (FWM)	2,20	9,16	11,24	33,1	57,39	0,409	7,26
4	Río Racons, Dénia	Agua residual industrial (cervecera)	2,92	2,55	3,9	40,3	52,51	0,243	3,56

En general, la conductividad eléctrica de las aguas residuales influiría en el proceso de desalación, por lo que aguas residuales con conductividad eléctrica en el rango de 6-9 $mS\ cm^{-1}$ podrían ser consideradas como óptimas para el proceso de desalación microbiana. En cualquier caso, el rendimiento de Celda de Desalación Microbiana a escala piloto representa un gran avance, ya que la comparación de los resultados con los análogos a escala laboratorio demuestran que el sistema puede ser escalado manteniendo la eficiencia y el rendimiento tanto en la desalación, en la degradación de materia orgánica (tratamiento de agua residual) y en la producción de energía eléctrica.

3.2. Resultados de desalación de agua marina

Los experimentos realizados con agua de mar se resumen en la siguiente tabla. De nuevo, los experimentos se llevaron a cabo utilizando catolito líquido con ferro-ferricianuro como aceptor de electrones (0,06 M, pH = 7,4).

Tabla 4. Principales resultados de Celda de Desalación Microbiana a escala piloto para la desalación de agua marina (real y sintética).

Id.	Corriente salina	Anolito	Conductividad compartimento salino	Conductividad compartimento anolito	Tasa Nominal de Desalación (TND)	Eficiencia en corriente, η_C	Eficiencia coulombica	Producción de energía	Tasa de eliminación de DQO
			$t \gg 0$ (mS cm ⁻¹)	$t \gg 0$ (mS cm ⁻¹)	L m ⁻² h ⁻¹	%	%	kWhm ⁻³	kg DQO m ⁻³ día ⁻¹
5	NaCl 35 g/L	Medio sintético (FWM)	46,4	8,36	0,42	152,0	27,61	0,202	7,46
6	Agua marina real	Medio sintético (FWM)	28,32	8,73	0,59	90,7	21,58	0,691	15,36
7	Agua marina real	Agua residual industrial (cervecera)	2,20	9,16	0,14	33,1	57,39	0,409	7,26

Los resultados experimentales obtenidos para la desalación de agua de mar muestran tasas nominales de desalación (TND) en el rango de 0,1 a 0,6 L m⁻² h⁻¹, mostrando estos valores buena concordancia con los obtenidos a escala de laboratorio. De un modo general, se puede resaltar que tanto la energía producida como la tasa de degradación son significativamente mayores en comparación con los mismos parámetros para la desalación de agua salobre, debido principalmente a la menor resistencia interna del sistema durante el proceso de desalación. En cuanto a la tasa nominal de desalación (TND), en el caso de agua de mar es inferior que en el agua salobre, debido principalmente a la mayor concentración de sales disueltas.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVA FUTURA DE LA TECNOLOGÍA

Las Celdas de Desalación Microbianas representan una tecnología reciente que podría contribuir significativamente a aumentar la sostenibilidad en la desalación de agua, ya que per-

mitiría disminuir el coste energético de las actuales plantas de Ósmosis Inversa. Sin embargo, hay algunos puntos claves que deben abordarse antes de la aplicación práctica real de estos sistemas y que debería enfocar los esfuerzos futuros para demostrar la viabilidad económica y técnica de estos sistemas, tal y como se indica brevemente a continuación:

Desarrollo de membranas: las membranas de intercambio iónico son elementos clave para la tecnología de Celdas de Desalación Microbianas y, en general, para todas las tecnologías electroquímicas microbianas. Sería deseable continuar desarrollando membranas específicas para desalación en dispositivos bioelectroquímicos, además de mejorar la resistencia al ensuciamiento biológico y prestar especial atención a mejorar las propiedades de baja difusión, transporte de agua (de la cámara salina a las adyacentes), mejorar la estabilidad mecánica y disminuir los costes de producción.

Desarrollo de electrodos: además de los esfuerzos en disminuir el coste económico de los materiales carbonosos empleados como electrodos, sería deseable también estudiar materiales innovadores que posean una mayor adhesión microbiana a la superficie y/o una estructura porosa específica que mejorase la colonización microbiana.

Regeneración del catolito: la principal ventaja del empleo de catolito líquido en Celdas de Desalación Microbianas es que es posible incrementar el potencial proporcionado por el sistema para llevar a cabo la desalinización, y así conseguir la desalinización completa del efluente salino. Sin embargo, el catolito líquido debe regenerarse una vez agotado. Por esta razón, es necesario desarrollar una estrategia sencilla y eficiente para la regeneración del catolito agotado. Esto podría incluir la integración de energía renovables (es decir, energía fotovoltaica, eólica) o el acoplamiento de reacciones electroquímicas microbianas (por ejemplo, biocátodos) para la regeneración.

Disponibilidad de sustrato orgánico: la limitación de sustratos orgánicos podría ser un factor negativo para la implementación

de estos sistemas, especialmente en áreas aisladas o remotas. En este sentido, el estudio de sustratos orgánicos alternativos podría ser clave para ampliar el concepto de desalación sostenible mediante Celdas de Desalación Microbianas (por ejemplo: microalgas, residuos agrícolas, etc.).

Aceptación social de la tecnología: el agua potable de alta calidad y segura es esencial para la salud, el bienestar público y un activo importante para la economía. La percepción social de la producción de agua potable mediante el uso de aguas residuales podría ser un problema para el desarrollo comercial de la tecnología de Celdas de Desalación Microbianas. En la práctica, el agua potable podría obtenerse incluso si se producen pequeñas fugas o contaminación cruzada en la celda de desalación microbiana mediante un post tratamiento del agua apropiado, por ejemplo, filtración por membranas y posterior desinfección, lo que garantizaría la calidad del agua tratada. Por esta razón, las medidas para aumentar la aceptación social de la tecnología podrían ser importantes para el futuro de la implementación de estos sistemas de desalación sostenible.

Nuevos nichos de aplicación: La tecnología de Celdas de Desalación Microbianas podría ser una alternativa viable para tratar aguas salinas industriales como por ejemplo de las industrias de galvanoplastia, minería, petroquímica y agroalimentaria. Además, la tecnología podría emplearse para la recuperación selectiva de recursos de alto valor añadido de aguas residuales como nutrientes, ácidos grasos volátiles y metales. Estas aplicaciones alternativas podrían aumentar la circularidad de los recursos clave de corrientes de aguas residuales industriales, permitiendo un tratamiento efectivo y sostenible de las mismas.

En resumen, la tecnología de Celdas de Desalación Microbianas posee un gran potencial para la desalación y el tratamiento de aguas de manera simultánea, y podría aumentar significativamente el proceso de obtención de agua potable a partir de agua salobre o marina (en comparación con tecnologías convencionales como Ósmosis Inversa o procesos térmicos). Ade-

más, podrían emplearse como tecnología independiente para el tratamiento y el reciclaje de agua o también podrían integrarse con las plantas tradicionales de ósmosis inversa como estrategia para reducir el coste energético al disminuir la salinidad del agua de alimentación. Finalmente, es necesario profundizar en los aspectos claves anteriormente citados para facilitar la implementación a escala real de la tecnología como tecnología de desalación sostenible.

5. REFERENCIAS

1. U. Schröder, F. Harnisch, L.T. Angenent, Microbial electrochemistry and technology: terminology and classification, *Energy Environ. Sci.* 8 (2015) 513–519. <https://doi.org/10.1039/C4EE03359K>.
2. M. Ramírez-Moreno, P. Rodenas, M. Aliaguilla, P. Bosch-Jimenez, E. Borràs, P. Zamora, V. Monsalvo, F. Rogalla, J.M. Ortiz, A. Esteve-Núñez, Comparative Performance of Microbial Desalination Cells Using Air Diffusion and Liquid Cathode Reactions: Study of the Salt Removal and Desalination Efficiency, *Front. Energy Res.* 7 (2019) 135. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00135>.
3. B.E. Logan, M.J. Wallack, K.-Y. Kim, W. He, Y. Feng, P.E. Saikaly, Assessment of Microbial Fuel Cell Configurations and Power Densities, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2 (2015) 206–214. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00180>.
4. M. Ramírez-Moreno, A. Esteve-Núñez, J.M. Ortiz, Desalination of brackish water using a microbial desalination cell: Analysis of the electrochemical behaviour, *Electrochim. Acta.* 388 (2021) 138570. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2021.138570>.
5. X. Cao, X. Huang, P. Liang, K. Xiao, Y. Zhou, X. Zhang, B.E. Logan, A New Method for Water Desalination Using Microbial Desalination Cells, *Environ. Sci. Technol.* 43 (2009) 7148–7152. <https://doi.org/10.1021/es901950j>.
6. Y. Kim, B.E. Logan, Microbial desalination cells for energy production and desalination, *Desalination.* 308 (2013) 122–130. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.07.022>.
7. K.S. Jacobson, D.M. Drew, Z. He, Use of a Liter-Scale Microbial Desalination Cell As a Platform to Study Bioelectrochemical Desalination with Salt Solution or Artificial Seawater, *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 4652–4657. <https://doi.org/10.1021/es200127p>.
8. K.S. Jacobson, D.M. Drew, Z. He, Efficient salt removal in a continuously operated upflow microbial desalination cell with an air cathode, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 376–380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.030>.
9. X. Chen, X. Xia, P. Liang, X. Cao, H. Sun, X. Huang, Stacked microbial desalination cells to enhance water desalination efficiency, *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 2465–2470. <https://doi.org/10.1021/es103406m>.

10. Y. Kim, B.E. Logan, Series Assembly of Microbial Desalination Cells Containing Stacked Electrodialysis Cells for Partial or Complete Seawater Desalination, *Environ. Sci. Technol.* 45 (2011) 5840–5845. <https://doi.org/10.1021/es200584q>.
11. X. Chen, P. Liang, Z. Wei, X. Zhang, X. Huang, Sustainable water desalination and electricity generation in a separator coupled stacked microbial desalination cell with buffer free electrolyte circulation, *Bioresour. Technol.* 119 (2012) 88–93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.135>.
12. Y. Qu, Y. Feng, X. Wang, J. Liu, J. Lv, W. He, B.E. Logan, Simultaneous water desalination and electricity generation in a microbial desalination cell with electrolyte recirculation for pH control, *Bioresour. Technol.* 106 (2012) 89–94. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.11.045>.
13. B. Zhang, Z. He, Integrated salinity reduction and water recovery in an osmotic microbial desalination cell, *RSC Adv.* 2 (2012) 3265. <https://doi.org/10.1039/c2ra20193c>.
14. H. Yuan, I.M. Abu-Reesh, Z. He, Enhancing desalination and wastewater treatment by coupling microbial desalination cells with forward osmosis, *Chem. Eng. J.* 270 (2015) 437–443. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.02.059>.
15. F. Zhang, M. Chen, Y. Zhang, R.J. Zeng, Microbial desalination cells with ion exchange resin packed to enhance desalination at low salt concentration, *J. Memb. Sci.* 417–418 (2012) 28–33. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.06.009>.
16. A. Morel, K. Zuo, X. Xia, J. Wei, X. Luo, P. Liang, X. Huang, Microbial desalination cells packed with ion-exchange resin to enhance water desalination rate, *Bioresour. Technol.* 118 (2012) 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.04.093>.
17. S. Chen, H. Luo, Y. Hou, G. Liu, R. Zhang, B. Qin, Comparison of the removal of monovalent and divalent cations in the microbial desalination cell, *Front. Environ. Sci. Eng.* 9 (2013) 317–323. <https://doi.org/10.1007/s11783-013-0596-y>.
18. H. Luo, P. Xu, P.E. Jenkins, Z. Ren, Ionic composition and transport mechanisms in microbial desalination cells, *J. Memb. Sci.* 409–410 (2012) 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2012.02.059>.
19. A. Ebrahimi, D.Y. Kebria, G.N. Darzi, Enhancing biodegradation and energy generation via roughened surface graphite electrode in microbial desalination cell, *Water Sci. Technol.* 76 (2017) 1206–1214. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.280>.
20. C. Santoro, M.R. Talarposhti, M. Kodali, R. Gokhale, A. Serov, I. Merino-Jimenez, I. Ieropoulos, P. Atanassov, Microbial Desalination Cells with Efficient Platinum-Group-Metal-Free Cathode Catalysts, *ChemElectroChem.* 4 (2017) 3322–3330. <https://doi.org/10.1002/celec.201700626>.
21. M. Mehanna, T. Saito, J. Yan, M. Hickner, X. Cao, X. Huang, B.E. Logan, Using microbial desalination cells to reduce water salinity prior to reverse osmosis., *Energy Environ. Sci.* 3 (2010) 1114–1120. <https://doi.org/10.1039/c002307h>.

22. K. Zuo, J. Chang, F. Liu, X. Zhang, P. Liang, X. Huang, Enhanced organics removal and partial desalination of high strength industrial wastewater with a multi-stage microbial desalination cell, *Desalination*. 423 (2017) 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.DESAL.2017.09.018>.
23. K. Zuo, M. Chen, F. Liu, K. Xiao, J. Zuo, X. Cao, X. Zhang, P. Liang, X. Huang, Coupling microfiltration membrane with biocathode microbial desalination cell enhances advanced purification and long-term stability for treatment of domestic wastewater, *J. Memb. Sci.* 547 (2018) 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.MEMSCI.2017.10.034>.
24. E.T. Sayed, N. Shehata, M.A. Abdelkareem, M.A. Atieh, Recent progress in environmentally friendly bio-electrochemical devices for simultaneous water desalination and wastewater treatment, *Sci. Total Environ.* 748 (2020) 141046. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141046>.
25. F. Zhang, Z. He, Scaling up microbial desalination cell system with a post-aerobic process for simultaneous wastewater treatment and seawater desalination, *Desalination*. 360 (2015) 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.01.009>.
26. S.G. Salinas-Rodríguez, J. Arévalo, J.M. Ortiz, E. Borràs-Camps, V. Monsalvo-García, M.D. Kennedy, A. Esteve-Núñez, eds., *Microbial Desalination Cells for Low Energy Drinking Water*, IWA Publishing, 2021. <https://doi.org/10.2166/9781789062120>.
27. L. Zhang, G. Fu, Z. Zhang, High-efficiency salt, sulfate and nitrogen removal and microbial community in biocathode microbial desalination cell for mustard tuber wastewater treatment, *Bioresour. Technol.* 289 (2019) 121630. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121630>.
28. S.M. Iskander, J.T. Novak, Z. He, Enhancing forward osmosis water recovery from landfill leachate by desalinating brine and recovering ammonia in a microbial desalination cell, *Bioresour. Technol.* 255 (2018) 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.097>.
29. Y. Zhang, I. Angelidaki, Submersible microbial desalination cell for simultaneous ammonia recovery and electricity production from anaerobic reactors containing high levels of ammonia, *Bioresour. Technol.* 177 (2015) 233–239. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.11.079>.
30. Y. Lu, H. Luo, K. Yang, G. Liu, R. Zhang, X. Li, B. Ye, Formic acid production using a microbial electrolysis desalination and chemical-production cell, *Bioresour. Technol.* 243 (2017) 118–125. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.059>.
31. B. Ye, Y. Lu, H. Luo, G. Liu, R. Zhang, Tetramethyl ammonium hydroxide production using the microbial electrolysis desalination and chemical-production cell with long anode, *Bioresour. Technol.* 251 (2018) 403–406. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.12.049>.
32. G. Liu, Y. Zhou, H. Luo, X. Cheng, R. Zhang, W. Teng, A comparative evaluation of different types of microbial electrolysis desalination cells for malic acid production, *Bioresour. Technol.* 198 (2015) 87–93. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.149>.
33. P. Zhang, Z. Sun, J. Zhang, B. Pan, Y. Feng, A microbial electrochemical hybrid system for simultaneous sludge treatment, acid production, and desalination, *Sci. Total Environ.* 760 (2021) 144153. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144153>.

- 34.** Z. Borjas, J.M. Ortiz, A. Aldaz, J. Feliu, A. Esteve-Núñez, Strategies for reducing the start-up operation of microbial electrochemical treatments of urban wastewater, *Energies*. 8 (2015). <https://doi.org/10.3390/en81212416>.
- 35.** Z. Borjas, A. Esteve-Núñez, J.M. Ortiz, Strategies for merging microbial fuel cell technologies in water desalination processes: Start-up protocol and desalination efficiency assessment, *J. Power Sources*. (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.02.052>.