

RECUPERACIÓN DE SALMUERAS CON LA TECNOLOGÍA DE DESIONIZACIÓN CAPACITIVA

Autores/Authors: *Antonio Ordóñez* (Director de I+D, GS Inima Environment, SA, ordonez@inima.com), *Belén Gutiérrez* (Responsable de Proyectos I+D+i, GS Inima Environment, SA, bgutierrez@inima.com), *Fernando Huertas* (Técnico de I+D, GS Inima Environment, SA, fernando.huertas@inima.com), *Jesús Palma* (Investigador Senior, Imdea Energía, jesus.palma@imdea.org), *Julio Lado* (Investigador Posdoctoral, Imdea Energía, julio.lado@imdea.org), *Enrique García-Quismondo* (Investigador Titular, Imdea Energía, enrique.garcia@imdea.org), *Ángel de Miguel* (Director Gerente, Proingesa, a.miguel@proingesa.es).

Resumen:

La escasez de agua dulce para el consumo ha llevado a la necesidad de transformar las aguas salobres continentales, principalmente aguas subterráneas, en agua apta para su uso, mediante tecnologías de desalación.

Si nos centramos en las plantas de ósmosis inversa de agua salobre, la salinidad de la salmuera de una planta desalobradoradora depende del agua bruta y del rendimiento de la planta, pero en general se trata de concentraciones mesosalinas (20-50 g/L de sales), próximas por tanto a la concentración de agua marina. La elevada salinidad no es el único problema ambiental que presentan las aguas de rechazo ya que a menudo, los vertidos derivados del pretratamiento del agua bruta de la planta son incorporados a la salmuera. Hasta el momento no se ha obtenido un tratamiento definitivo que solucione el problema de la gestión y tratamiento de estas salmueras que permita minimizar su impacto.

El proyecto “Desionización Capacitiva para el tratamiento de Salmueras procedentes de plantas de Ósmosis Inversa de Agua Salobre”, con acrónimo DC-SOIAS y enmarcado dentro de la convocatoria del MINECO, Retos Colaboración 2015, nace con el objetivo de desarrollar una tecnología basada en la desionización capacitiva, capaz de tratar las salmueras procedentes de los procesos de desalación por ósmosis inversa de aguas salobres (principalmente subterráneas o continentales). Esta tecnología busca: minimizar el impacto que este tipo de efluentes residuales tiene sobre el medio ambiente, un aprovechamiento más eficiente de los recursos hídricos (aumento de al menos un 20% más de agua dulce con el mismo caudal de entrada y el mismo consumo energético) y una reducción volumétrica del caudal de salmuera y por tanto de los costes de gestión de la misma.

En este proyecto se han desarrollado diferentes reactores de desionización capacitiva a escalas distintas, hasta la construcción de una planta piloto con un prototipo de cinco celdas con electrodos de 1200 cm² que ha sido operado en las instalaciones del Instituto IMDEA Energía en colaboración con GS Inima Environment, SA y Proingesa. Próximamente se va a escalar este sistema a un reactor con electrodos de 2400 cm² y al menos 10 celdas que permitirán verificar los valores de desionización, eficiencia energética y rendimiento del proceso en condiciones reales en una planta desalobradoradora de la Universidad de Alicante. Los resultados obtenidos supondrán dar un paso más en la búsqueda del vertido cero en las plantas desaladoras.

1 INTRODUCCIÓN

Los principales problemas que presentan los procesos de desalación y de ósmosis inversa de agua salobre están relacionados con la elevada salinidad de las aguas de rechazo, pero también con la presencia de otras sustancias contaminantes como vertidos derivados del pretratamiento del agua bruta o productos de limpieza de las membranas. Esta agua de rechazo tiene, en general, varios posibles destinos: acuíferos profundos mediante inyecciones, balsas de evaporación, emisario o salmueroducto submarino, vertido directo a humedales o vertido directo a ramblas y ríos. Sin embargo, todas estas prácticas suponen un impacto medioambiental significativo.

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo la demostración práctica de la aplicación de la tecnología de Desionización Capacitiva (CDI, en su acrónimo en inglés, *Capacitive Deionization*) para la mejora en el despacho de salmueras efluentes en procesos de desalación de aguas salobres subterráneas. Concretamente, se propone la integración de la tecnología de desionización en los procesos de Ósmosis Inversa, de manera que se logre producir una salmuera con mayor contenido salino y menor caudal volumétrico, resultando en un residuo más fácil de gestionar [1].

La Desionización Capacitiva es una tecnología de tratamiento de aguas basada en el concepto de almacenamiento de energía de los supercondensadores [2]–[5]. Se basa en la aplicación de voltaje o corriente entre dos electrodos sumergidos en una disolución con iones de manera que los electrodos se polarizan, uno positiva y otro negativamente, y producen el desplazamiento de iones de la disolución hacia los electrodos, cationes hacia el electrodo negativo y los aniones hacia el positivo. De esta manera se produce la adsorción de los iones en el electrodo formando la denominada doble capa eléctrica. El proceso posterior de regeneración se lleva a cabo invirtiendo la dirección de la corriente eléctrica de manera que se fomenta la desorción de los iones adsorbidos previamente [6]. Además, durante la etapa de desorción de iones es posible recuperar parte de la energía consumida en el proceso de eliminación de iones de la misma manera que si se descargara eléctricamente un supercondensador. Los dos mecanismos se muestran esquemáticamente en la Figura 1.

El mecanismo de regeneración presenta la particularidad de que cuando los electrodos se despolarizan, los iones pueden ser expulsados pasando al seno de la disolución. Así, en las condiciones de operación adecuadas, este procedimiento da como resultado una corriente de mayor concentración (salmuera) y por tanto un efluente de menor caudal volumétrico, disminuyendo el impacto medioambiental asociado a su tratamiento o descarga [7]. En definitiva, la retirada de iones de los electrodos por medio de la electrodesorción está relacionada directamente con la capacidad de producir una disolución adaptada a los requerimientos del proceso, en este caso los requisitos son incrementar la recuperación de agua de la planta global.

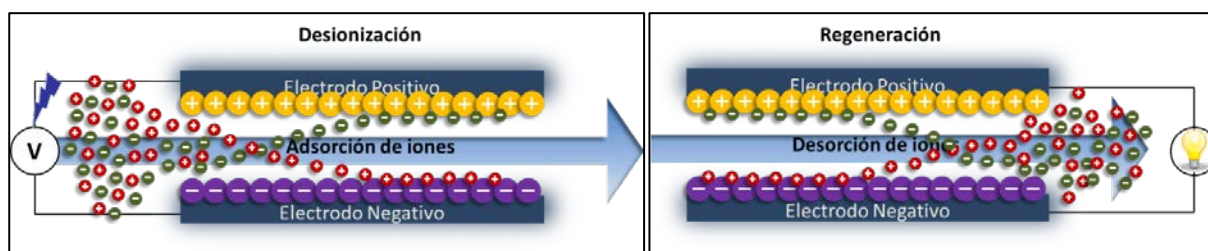


Figura 1. Representación esquemática de los procesos de desionización (carga) y de regeneración o retirada de iones de interés (descarga).

En este trabajo se presentan las actividades de diseño y construcción de un reactor de flujo de 1200 cm² de dimensiones geométricas de electrodo con cinco (5) compartimentos para el primer escalado del concepto CDI a escala piloto. Además, se muestran los resultados experimentales fruto de la operación del mismo durante los primeros meses del pilotaje.

2 METODOLOGÍA

En este trabajo se han evaluado las capacidades de electro-adsorción de un prototipo de desionización capacitiva de cinco compartimentos ensamblado con electrodos de carbón activado de 1200 cm² de área geométrica adaptados a distribuidores de flujo desarrollados específicamente para mejorar el contacto líquido-electrodo en el interior de los compartimentos.

El caudal de operación ha sido de 300 mL/min. Las muestras, tomadas justo antes de la desionización, inmediatamente después de la misma, y al final de la etapa de regeneración, han permitido determinar la concentración de iones sodio y cloruros mediante cromatografía iónica. Además, la eliminación de iones se evaluó mediante un medidor de control de conductividad (Hach HQ 40d) a intervalos de 1 segundo de forma continua, que se conecta a la salida de la corriente de agua purificada. Para el ensayo del prototipo se utilizó una instalación con sondas de pH, y bombas de impulsión. En la Figura 4, más abajo, se muestra el set-up experimental utilizado.

Los ensayos de desionización se realizaron empleando una disolución de trabajo de aproximadamente 2 L de cloruro de sodio con una concentración inicial de 10-15 g/L. Se estableció una conexión eléctrica del prototipo en serie, de manera que la conexión de los electrodos es bipolar, es decir que las caras de cada electrodo tienen diferente polaridad. La conexión hidráulica interna del dispositivo ha sido configurada en paralelo.

En todos los casos la operación de ciclos de desionización – regeneración se ha llevado a cabo aplicando un pulso de potencia hasta que se alcance el límite de voltaje fijado para la desionización (1.2 V por celda) momento en el cual el sistema experimenta una caída en potencia que permite mantener la máxima tensión de modo que los iones disueltos en el agua se desplazan hacia los electrodos con carga opuesta, donde quedan absorbidos. Posteriormente se invierte la potencia aplicada y el sistema procede a descargarse igual que sucede durante la descarga de un supercondensador, expulsando los iones que son retirados en el agua saliente. Si durante este proceso los electrodos se conectan a una carga electrónica regenerativa, la corriente eléctrica producida puede recuperarse para ciclos posteriores, o puede ser revertida a la red.

3 RESULTADOS

3.1 Diseño y Construcción de la Unidad Piloto de Desionización Capacitiva de 1200 cm²

Se ha diseñado un prototipo de desionización capacitiva basado en configuraciones de reactores tipo filtro prensa ya que presentan unas adecuadas proporciones superficie de electrodo vs. volumen, donde para tener la mayor capacidad de adsorción de iones interesa que haya una relación alta. Además, para asegurar una distribución del flujo de agua adecuada dentro del conjunto del reactor, se ha propuesto la integración de un colector primario interno a partir del cual el líquido entra en una precámara que amortigua la velocidad del flujo con una trayectoria con patrón de zig-zag y finalmente lo distribuye de una manera "laminar" a través del electrodo mediante un distribuidor secundario. En la Figura 2 se muestra en detalle el despiece de componentes del sistema, así como el distribuidor de flujo interno.



Figura 2. Descripción de componentes del sistema (izquierda) y distribuidor de flujo (derecha)

En base al diseño seleccionado, se han adaptado electrodos con una elevada conductividad eléctrica a una estructura de carbón activado y se han hecho crecer hasta alcanzar un área geométrica proyectada de 1200 cm², habiéndose preparado una decena de electrodos para la construcción del prototipo de desionización. En la Figura 3 se muestran los electrodos preparados y el detalle del stack de desionización ensamblado.

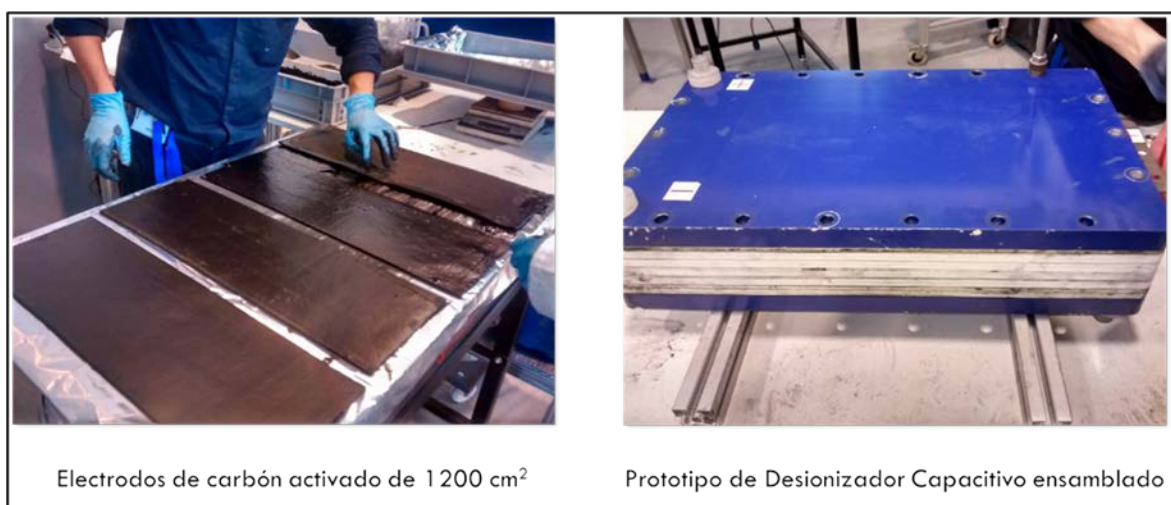
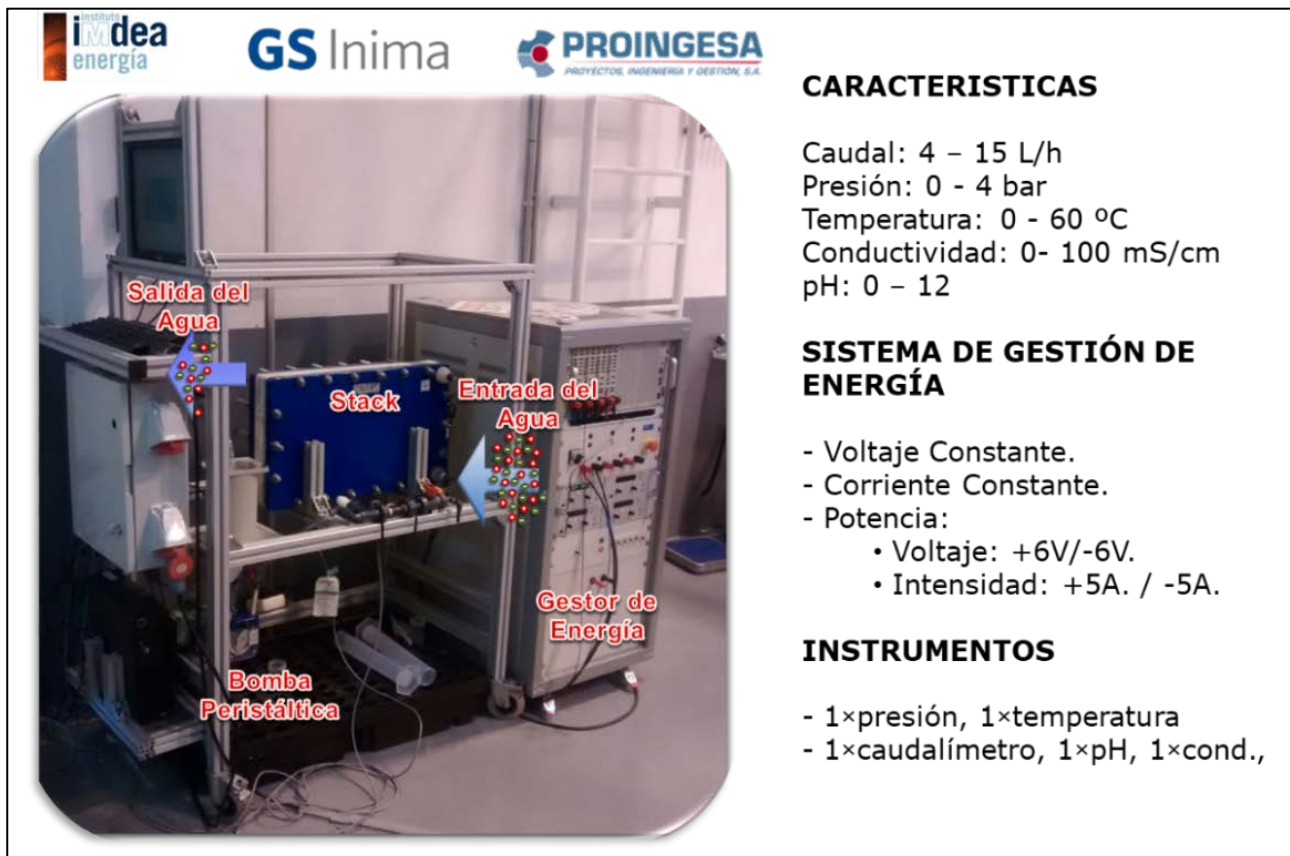


Figura 3. Electrodos de 1200 cm² y detalle del stack de desionización ensamblado

Como parte integrada en el sistema se ha diseñado y construido un gestor de energía adaptado para que el desionizador pueda trabajar bajo diferentes modos de operación y con distintos perfiles de carga y descarga. Esta flexibilidad es una de las mayores ventajas del sistema de desionización capacitiva ya que permite acomodar la electricidad proveniente de la descarga del dispositivo para inyectarla de vuelta a la red, de manera que parte de la energía empleada en la etapa de desionización se recupere [8]. En la siguiente figura se muestra la Unidad de CDI con todos los elementos auxiliares instalados; stack, bomba, gestor de energía y control del sistema, y con un listado de sus características principales.



CARACTERISTICAS

Caudal: 4 – 15 L/h
 Presión: 0 - 4 bar
 Temperatura: 0 - 60 °C
 Conductividad: 0- 100 mS/cm
 pH: 0 – 12

SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA

- Voltaje Constante.
- Corriente Constante.
- Potencia:
 - Voltaje: +6V/-6V.
 - Intensidad: +5A. / -5A.

INSTRUMENTOS

- 1×presión, 1×temperatura
- 1×caudalímetro, 1×pH, 1×cond.,

Figura 4. Vista de la unidad de CDI desarrollada por el consorcio formado por GS Inima Environment, SA, Proingesa e Imdea Energía.

3.2 Operación de la Unidad de Desionización Capacitiva en Planta Piloto

La Unidad de CDI se puso en marcha a principios de Noviembre, desde entonces y hasta la fecha, se están realizando diferentes ensayos que han permitido estudiar las prestaciones del sistema en diferentes condiciones de operación. De acuerdo con el procedimiento descrito en el apartado de Metodología, se llevaron a cabo una serie de experimentos de desalación preliminares para comprobar la capacidad de retención de sal del prototipo de desionización capacitiva construido. Las concentraciones de sal empleadas en este trabajo están basadas en análisis de aguas altamente salobres provenientes del rechazo de plantas de ósmosis inversa, cuya concentración de sal es de aproximadamente 10–25 g/L.

En general la carga se ha llevado a cabo aplicando una corriente constante desde una tensión inicial de 0 V hasta la tensión máxima seleccionada y después de ha aplicado una corriente constante inversa hasta la tensión inicial de 0 V para simular las condiciones de regeneración. La Figura 5 (izquierda) muestra la variación de la tensión registrada durante el ciclo de purificación seguido de la etapa de despolarización. En general, las curvas de todos los experimentos mostraron el típico comportamiento de un

supercondensador que se caracteriza por un rápido ascenso del voltaje entre bornes del prototipo, consecuencia de la formación de la doble capa eléctrica y consiguiente retención de iones salinos procedentes del seno de la disolución. Seguidamente, este voltaje se mantiene hasta el cese del flujo de iones hacia la interfase electrodo/electrolito, que se observa mediante el plateau en la evolución de la concentración, y que indica la saturación de los electrodos. Durante la despolarización (descarga) se observa una pauta similar, aunque ahora la pendiente voltaje-tiempo es decreciente, y tan pronto como decae el voltaje la concentración de sal en el efluente crece rápidamente ya que los iones están siendo desorbidos de los electrodos. El ciclo de desionización-regeneración dura aproximadamente 1 hora.

En las condiciones estudiadas se han obtenido unas reducciones en el contenido salino de la disolución en torno a 3-4 g/L, señal indicativa de que el prototipo permite alcanzar suficiente grado de desionización como para obtener las bases de cálculo para realizar un adecuado balance de materia y energía y definir así las condiciones de operación y el diagrama de proceso del sistema, lo cual permitirá estimar sus prestaciones en condiciones reales. Además, la cantidad de iones desorbidos es equivalente a los adsorbidos previamente durante la etapa de desionización. Esto confirma que la etapa de regeneración es efectiva y permite estimar el funcionamiento completo del sistema si se separara el agua desionizada producida durante la adsorción de iones del efluente generado durante la desorción de los electrodos.

El pH a lo largo de los experimentos (no mostrado en este artículo) se mantuvo en un rango entre 6 y 7, señal indicativa de que en las condiciones estudiadas la posibilidad de que tengan lugar fenómenos secundarios como la electrolisis del agua o la degradación de los electrodos es minimizada.

A partir del salto de voltaje al inicio de cada etapa, desionización y regeneración, se ha calculado la resistencia óhmica del prototipo dando valores en torno a 0.27-0.32 Ω (equivalente a 70-80 $\Omega \cdot \text{cm}^2$), valores consistentes con los resultados obtenidos con los mismos materiales pero en tamaño pequeño, y por otros dispositivos reportados anteriormente [9]. Esto indica que al escalado de los electrodos ha sido exitoso y que incluso con dimensiones de 1200 cm^2 y con la conexión de cinco (5) compartimentos se ha conseguido un buen contacto entre electrodo y colectores de corriente y se garantiza una adecuada estabilidad mecánica y química de todo el conjunto con un paso de agua constante.

Los ensayos preliminares de carga y descarga han arrojado unos resultados muy atractivos, tanto desde el punto de vista de las prestaciones del sistema como de la capacidad de adaptarse a diferentes regímenes de funcionamiento energético. Uno de los objetivos del pilotaje del sistema es observar el comportamiento de la Unidad de CDI, a diferentes condiciones de demanda energética. En la Figura 5 (derecha) se muestran los resultados comparados de distintos experimentos a diferentes intensidades de corriente manteniendo fijas el resto de las variables operativas, 1.2 V por celda (6 V en todo el stack) y 0.0 V de tensión máxima y mínima respectivamente, con un flujo de líquido de 100 mL/min. En estas condiciones se operó el sistema en condiciones de alta potencia, baja potencia, y con demanda energética intermedia.

Los resultados del pilotaje en estas condiciones se muestran en la Figura 5 (derecha) basados en un ciclo representativo una vez que se alcanzó la estabilidad, e indican que la velocidad de adsorción depende de la intensidad de corriente que pasa por los electrodos, como se deduce a partir de la pendiente de la concentración con el tiempo, que es mayor para la operación a alta potencia y disminuye cuando la demanda de energía baja. Esto resulta coherente con el comportamiento de un supercondensador electroquímico, en el que la velocidad de formación de la doble capa eléctrica se rige por la magnitud de la corriente que pasa por el circuito. Sin embargo, desde el punto de vista de la capacidad de eliminación, las condiciones intermedias de potencia son las que proporcionan la mayor caída de concentración en la solución, desde los 18.7 g/L de concentración salina inicial hasta 16 g/L, en total 2.7 g/L de reducción de salinidad.

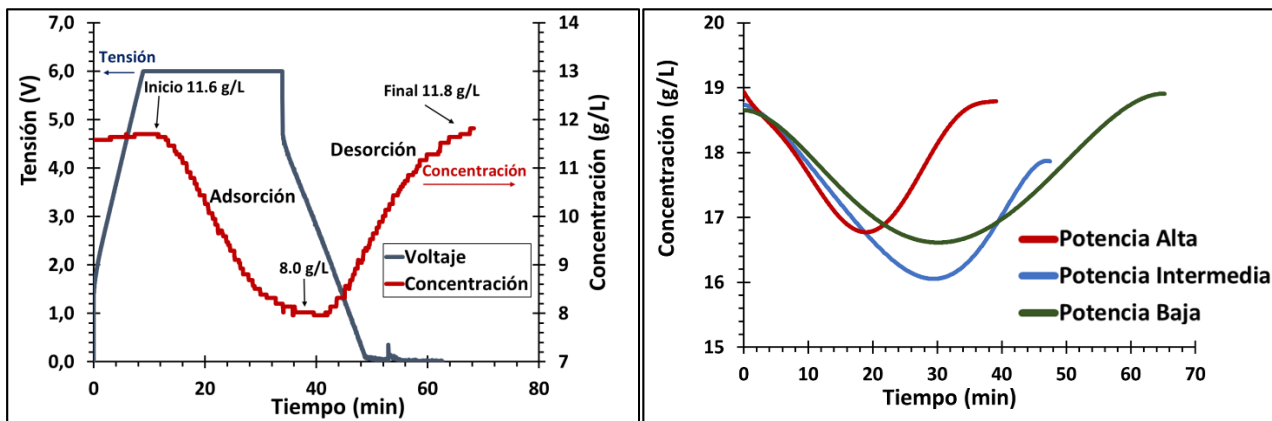


Figura 5. (Izquierda) Evolución de la tensión y la concentración en los procesos de desionización y de regeneración con el prototipo estudiado. (Derecha) Evolución de la concentración en los procesos de desionización y de regeneración en diferentes condiciones de demanda energética.

De este comportamiento se puede deducir que cuando se aplica una intensidad de corriente relativamente elevada, el mecanismo de adsorción de iones es rápido, pero puede resultar poco ordenado dentro de la estructura de los electrodos y provocar por tanto la formación de regiones saturadas en la parte superficial creando zonas semivacías en el interior, y disminuyendo en la práctica la capacidad neta de eliminación.

No obstante, a la vista de los resultados, la operación en condiciones de máxima demanda de potencia permite aumentar la velocidad de desionización alcanzando el punto de mayor reducción de salinidad en tan solo 20 minutos, 10 minutos antes que cuando el dispositivo se operó en condiciones intermedias de potencia, pero con unas prestaciones de eliminación reducidas, en aproximadamente un 60%, desde los 18.7 g/L de concentración salina inicial hasta 16.7 g/L, en total un salto de 1.0 g/L.

Lo que parece claro a partir de este comportamiento es que si fuera necesario, sería posible adaptar la capacidad de retirada de iones del sistema de desionización capacitiva según los requerimientos de cada planta de ósmosis inversa, sólo adaptando la demanda de potencia, o incluso dentro del funcionamiento habitual de una planta específica, es posible adaptar la entrada puntual de ciertos contaminantes a la intensidad de corriente aplicada de manera que se correlacione el caudal másico de especies a adsorber con los fenómenos difusivos que tienen lugar dentro del desionizador.

Esta flexibilidad en los modos de operación puede resultar de gran utilidad para la funcionalidad de generar una corriente de mayor concentración (salmuera) en la etapa de regeneración pues permitirá adaptar la concentración del efluente en función de parámetros fácilmente controlables en planta como la intensidad de corriente aplicada en descarga y el caudal de agua. El estudio de los aspectos de la etapa de regeneración para lograr un efluente de rechazo con mayor concentración de sales y por tanto de menor caudal volumétrico se va a llevar a cabo en los próximos meses de este proyecto operando la Unidad de CDI mostrada en este trabajo.

En la Tabla 1 se puede ver un resumen de las prestaciones de este prototipo de desionización en términos de capacitancia, resistencia, velocidad de los procesos de desionización y de regeneración, así como el balance de iones entre adsorción y desorción. En la actualidad esta Unidad Piloto operaría a una potencia nominal de 12 W durante la desionización llegando a almacenar energía equivalente a 700 Faradios. En términos de retirada de iones tiene capacidad para adsorber aproximadamente 8 gramos por ciclo a una velocidad de casi 30 g/(h·m²), pudiendo recuperar prácticamente la totalidad de los iones adsorbidos en la etapa posterior de regeneración que permitiría revertir a la red aproximadamente 4 W de potencia.

Tabla 1 Resultados de Desionización - Regeneración

Condiciones	Capacitancia (F)	Resistencia (Ω)	Desionización		Regeneración	
			Adsorción (g)	Velocidad (g/(h·m ²))	Recuperación iones (%)	Velocidad (g/(h·m ²))
6.0 V _{stack} 300mL/(min) 12 W : 4 W	700	0.27	7.6 (15.0 mg/g _{CA})	29	95-100	28

En la actualidad se está escalando el sistema para disponer de un reactor electroquímico con electrodos del doble de tamaño, 2400 cm². Este sistema se operará con aguas reales generadas en una instalación de ósmosis inversa de una planta desalobradoradora de la Universidad de Alicante.

3.3 Análisis del Consumo Eléctrico de la Unidad Piloto de Desionización Capacitiva

Si se estudia el proceso de desionización desde el punto de vista energético es posible comparar el comportamiento eléctrico del sistema, en términos del gasto energético, con la capacidad de retención de iones. Así, a partir de la operación del sistema es posible obtener una estimación del consumo de energía durante la adsorción y considerando también la recuperación de energía durante la regeneración.

En la etapa de desionización el consumo de energía termodinámica está determinado por el cambio en la concentración de la entrada a la salida, por lo tanto, el consumo teórico mínimo para eliminar una cantidad dada de iones vendrá definido por la siguiente ecuación:

$$W_{deionization} = \frac{1}{2} Q \cdot V$$

donde V es el voltaje de la celda, en Voltios y Q es la carga empleada (Amp·s) que depende del número de electrones involucrados, de la constante de Faraday (96485 Amp/mol) y del cambio de la concentración de iones de entrada a salida. En este punto, la desionización es similar a la electrodiálisis, donde el consumo de energía es equivalente al trabajo aplicado para eliminar los iones disueltos de la solución. Sin embargo, en desionización el consumo neto de energía es la diferencia entre la energía suministrada durante la desionización y la energía recuperada durante la regeneración (descarga de supercondensador) también conocida como eficiencia de round-trip, como consecuencia, el consumo neto de energía en desionización capacitiva está relacionado con las eficiencias de carga y descarga mediante la siguiente ecuación [3]:

$$W_{CDI} = W_{desionización} \cdot \left(\frac{1}{\eta_{carga}} - \eta_{descarga} \right)$$

donde $W_{desionización}$ es el trabajo consumido en desionización, η_{carga} y $\eta_{descarga}$ son eficiencias de carga y descarga que combinadas dan la eficacia de round-trip expresada en porcentaje (%) que no deben confundirse con la conversión, parámetro empleado en la ósmosis inversa para la recuperación de agua.

Según este tipo de análisis, con el prototipo estudiado se puede obtener una eficiencia de desionización en torno al 40%, después durante la desorción de iones se recupera el 34% de la energía empleada en desionizar, que puede ser vertido de vuelta a la red, lo que arroja un gasto de energía neto de 1.5 kJ por

cada gramo de sal retirada del circuito, valor muy próximo al termodinámico (1.7 kJ/g). En la siguiente tabla se muestran los resultados energéticos promedio de la operación con el prototipo.

Tabla 2 Resultados a nivel de Prototipo

Condiciones	Eficiencia Culómbica (%)	Desionización		Regeneración		Consumo neto (kJ/g)
		Energía (kJ)	Eficiencia (%)	Energía Recuperada (kJ)	Round-Trip (%)	
6.0 V _{stack} 300mL/(min) 12 W : 4 W	94	17.8 (2.3 kJ/g)	40	6.1	34	1.5

Fruto de estos experimentos se ha detectado que una parte importante de la energía empleada en adsorber los iones en los electrodos se desperdicia debido probablemente a que en el sistema se han introducido elementos que aumentan las pérdidas energéticas y eso tiene un impacto tanto en la capacidad de adsorción de iones de los electrodos como en la posterior recuperación de energía (Round-Trip). Parece claro que es necesario mejorar el desionizador en términos de diseño y eficiencia energética para alcanzar mejores prestaciones globales del sistema.

Además, en el marco de este proyecto se ha estudiado la durabilidad de los electrodos que conforman el reactor electroquímico. A partir de los resultados obtenidos se puede determinar que las prestaciones del sistema se han mantenido durante los meses de operación en que ha acumulado más de 200 ciclos.

4 CONCLUSIONES

En el marco del proyecto “Desionización Capacitiva para el tratamiento de Salmueras procedentes de plantas de Ósmosis Inversa de Agua Salobre”, con acrónimo DC-SOIAS, se ha desarrollado un nuevo proceso que consiste en integrar la ósmosis inversa con la tecnología desionización capacitiva de manera que esta última reduzca el contenido salino del rechazo de la primera reduciendo la generación de efluentes de la planta global, y todo ello con un consumo energético por m³ de agua tratada contenido.

Para evaluar el rendimiento del proceso, se ha diseñado y construido una planta piloto, actualmente en operación, con 10 electrodos de carbón activado de 1200 cm² de área geométrica ensamblados en 5 compartimentos integrados en un reactor electroquímico que incluye los elementos auxiliares más importantes (bomba de impulsión, sensores, gestor de energía y control del sistema).

Los resultados de la evaluación de la Unidad de Desionización, después de acumular más de 200 ciclos de operación, indican que el escalado del concepto a un sistema pre-industrial permite alcanzar buenas prestaciones de adsorción y de eficiencia eléctrica, pero es necesario optimizar los procesos para maximizar las prestaciones del sistema.

Los resultados obtenidos sugieren que la lógica de aplicar una potencia alta para acelerar la velocidad del proceso choca con el necesario acomodo de los iones en la estructura de los electrodos, por lo que es necesario alcanzar un equilibrio entre demandas energéticas relativamente elevadas que se ajusten a la cinética de adsorción de especies en los electrodos.

Como actividades futuras, es necesario explorar el mecanismo de desorción de iones para adquirir mayor conocimiento en la cinética que gobierna el movimiento de los iones dentro del reactor. De esta manera se puede conseguir aumentar la concentración salina del efluente generado a partir del empleo de

intensidades de corriente adecuadas que permitan provocar la formación de gradientes de concentración que produzcan un caudal de rechazo de pequeño volumen pero saturado de iones.

Además, en los próximos meses se espera poder escalar este sistema a un reactor con electrodos del doble de tamaño, con un área geométrica proyectada de 2400 cm², para verificar los valores de desionización, eficiencia energética y rendimiento del proceso. Esta operación se llevará a cabo en condiciones reales en una planta desalobradora de la Universidad de Alicante.

Finalmente, utilizando los resultados obtenidos del pilotaje en planta en condiciones reales, se llevará a cabo un análisis técnico-económico del proceso de integración de la tecnología de desionización en una planta de ósmosis inversa de agua salobre incluyendo consumos y producciones. Además, se realizará una aproximación de las necesidades de espacio, materiales, equipos e instrumentos, de manera que se estimen de forma precisa parámetros económicos como el coste de inversión, los costes operativos, el valor actual neto y la tasa interna de retorno de la solución propuesta.

5 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad (MINECO) a través del Programa Nacional de Investigación para el Programa Retos Colaboración 2015 (RTC-2015-3969-5 (proyecto DC-SOIAS)) y la cooperación de sus participantes (GS Inima Environment, SA, Imdea Energía y Proingesa). Además, J.J. Lado agradece a la Comunidad de Madrid por la beca posdoctoral como parte del Programa de Atracción de Jóvenes Talentos (2016-T2 / AMB-1310). De igual manera los autores agradecen la colaboración de la Universidad de Alicante para la instalación, el estudio y la operación de una planta piloto de demostración en sus instalaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Gutiérrez, F. Huertas, A. Ordóñez, R. Parrado, A. De Miguel, E. García – Quismondo, J. Lado, J. Palma “Capacitive Deionization for the Treatment of Brine from Brackish Water Reverse Osmosis Plants,” International Desalination Association (IDA 2017) Sao Paulo, Brasil. 15-20 Octubre 2017.
- [2] S. Porada, R. Zhao, A. Van Der Wal, V. Presser, and P. M. Biesheuvel, “Review on the science and technology of water desalination by capacitive deionization,” *Prog. Mater. Sci.*, vol. 58, no. 8, pp. 1388–1442, 2013.
- [3] M. A. Anderson, A. L. Cudero, and J. Palma, “Capacitive deionization as an electrochemical means of saving energy and delivering clean water. Comparison to present desalination practices: Will it compete?,” *Electrochim. Acta*, vol. 55, no. 12, pp. 3845–3856, Apr. 2010.
- [4] A. Subramani and J. G. Jacangelo, “Emerging Desalination Technologies for Water Treatment: A Critical Review,” *Water Res.*, vol. 75, pp. 164–187, Feb. 2015.
- [5] F. A. AlMarzooqi, A. A. Al Ghaferi, I. Saadat, and N. Hilal, “Application of Capacitive Deionisation in water desalination: A review,” *Desalination*, Mar. 2014.
- [6] M. E. Suss, S. Porada, X. Sun, P. M. Biesheuvel, J. Yoon, and V. Presser, “Water desalination via capacitive deionization: what is it and what can we expect from it?,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 8, no. 8, pp. 2296–2319, 2015.
- [7] E. García-Quismondo, C. Santos, J. Soria, J. Palma, and M. A. Anderson, “New Operational Modes to Increase Energy Efficiency in Ca- capacitive Deionization Systems,” 2016.
- [8] P. Długołęcki and A. van der Wal, “Energy recovery in membrane capacitive deionization.,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 47, no. 9, pp. 4904–10, May 2013.

[9] Y. Qu, T. F. Baumann, J. G. Santiago, and M. Stadermann, "Characterization of Resistances of a Capacitive Deionization System," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 16, pp. 9699–9706, 2015.