

APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA CONTENIDA EN EL GRADIENTE SALINO, EGS, MEDIANTE LA TECNOLOGÍA EDR

Autores: Lucía Gómez-Coma (Contratado proyecto, Universidad de Cantabria, lucia.gomezcoma@unican.es), Víctor M. Ortiz-Martínez (Contratado proyecto, Universidad de Cantabria, victormanuel.ortiz@unican.es), Marcos Fallanza (Profesor ayudante doctor, Universidad de Cantabria, marcos.fallanza@unican.es), Alfredo Ortiz (Profesor contratado doctor, Universidad de Cantabria, alfredo.ortizsainz@unican.es) Raquel Ibañez (Catedrática de Universidad, Universidad de Cantabria, raquel.ibanez@unican.es) Inmaculada Ortiz (Catedrática de Universidad, Universidad de Cantabria, inmaculada.ortiz@unican.es).

Resumen:

La obtención de energía mediante gradiente salino (EGS) representa una alternativa prometedora al uso de combustibles fósiles. Uno de los grandes retos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDARes) es reducir su elevado consumo energético. A este respecto, la tecnología EGS podría ayudar a conseguir este objetivo. Este trabajo demuestra la viabilidad técnica del uso de la tecnología de electrodiálisis reversa (EDR) para la producción de energía empleando agua de salinidad similar a la de mar como corriente concentrada ($C_c=0.66$ M) y agua procedente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cantabria como corriente de baja salinidad o corriente diluida ($C_d=0.036$ M). Igualmente se presenta un modelo capaz de predecir los resultados experimentales. Para ello se realiza un estudio de dos variables críticas de operación, el caudal de alimentación y la temperatura, y se comparan los resultados experimentales y simulados. Trabajando con un número de Reynolds equivalente a $200 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ se consigue una potencia bruta máxima de 0.66 W. La temperatura de operación muestra una fuerte influencia sobre la potencia obtenida, resultando en una disminución del 42 % cuando se disminuye la temperatura desde 297 K hasta 286 K.

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de nuevas fuentes de energía renovable como alternativa a los combustibles fósiles resulta fundamental frente a su agotamiento y los problemas medioambientales que plantean. La obtención de energía eléctrica a partir de gradiente salino (EGS), mediante el uso de corrientes de agua dulce y salada, es una opción prometedora ya que estimaciones previas establecen una disponibilidad global de energía de 1.4 a 2.6 TW utilizando la tecnología EGS y las corrientes de desembocadura de ríos en el mar [1]. Además, este rango puede aumentar considerablemente, si se incluyen otras fuentes alternativas de gradiente salino, tales como lagos interiores hipersalinos, reservas y acuíferos subterráneos salinizados, así como la descarga de aguas residuales tratadas. A nivel global, los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales cuando son vertidos al mar pueden ofrecer un potencial de hasta 18.5 GW [2].

Dos tecnologías han mostrado mayor viabilidad para la transformación de la energía azul en energía eléctrica: i) la ósmosis retardada por presión o PRO en su acrónimo inglés, ii) la electrodiálisis reversa o EDR. En el caso de la PRO, diversos estudios han señalado ciertas limitaciones, por lo que actualmente los esfuerzos se centran en la mejora de la eficiencia de la tecnología EDR.

1.1 Antecedentes

Pese al potencial de la tecnología EGS esta tecnología se encuentra todavía poco desarrollada. Únicamente hay dos plantas piloto operativas en todo el mundo. Una de ellas ha sido puesta en marcha por la compañía REDstack B.V dentro del proyecto Blue Energy y está situada en Afsluitdijk (Holanda). Esta planta está operativa desde 2014, con un objetivo de potencia bruta de 50kW utilizando agua de mar como corriente concentrada y agua dulce como corriente diluida [3].

La otra planta piloto existente, ha sido realizada gracias al proyecto europeo REAPower y se encuentra en Marsala (Italia). Esta planta utiliza salmuera y agua salobre (procedente de un pozo) como corrientes concentrada y diluida respectivamente. En la actualidad consigue una potencia bruta de 330 W trabajando con aguas reales [4].

1.2 Objetivo

Atendiendo a los antecedentes descritos, el objetivo fundamental de este trabajo, es llevar a cabo una evaluación técnica preliminar de una instalación basada en la tecnología de membranas EDR, para transformar la energía azul o energía contenida en el gradiente salino entre aguas de alta y baja salinidad en energía eléctrica. Se ha seleccionado, como caso de estudio, una corriente diluida y concentrada, preparadas de forma sintética, con el contenido de cloruro sódico típico, del agua tratada en estaciones depuradoras de aguas residuales urbanas de Cantabria, y de agua de mar respectivamente.

2 METODOLOGÍA

Para poder llevar a cabo los experimentos, se ha puesto a punto una planta a escala laboratorio (Figura 1). Para ello se ha utilizado una unidad de electrodiálisis reversa, compuesta por 20 de pares de membranas de 200 cm² de intercambio iónico de alta permselectividad y baja resistencia. Cada par de celda está compuesto por una membrana aniónica, un separador, una membrana catiónica y otro separador. Los separadores están fabricados con polietersulfona de 270 μm de espesor y 82.5 % de porosidad y permiten mantener la distancia entre las membranas, creando compartimentos para el flujo de las corrientes de agua, que circulan en co-corriente, y promueven las turbulencias. En los extremos laterales del stack de EDR se instala electrodos (ánodo y cátodo, respectivamente) en los que tienen lugar reacciones redox que transforman el flujo de iones en corriente eléctrica. El circuito eléctrico se cierra externamente mediante una carga (resistencia) que consume la energía eléctrica generada por la unidad EDR.

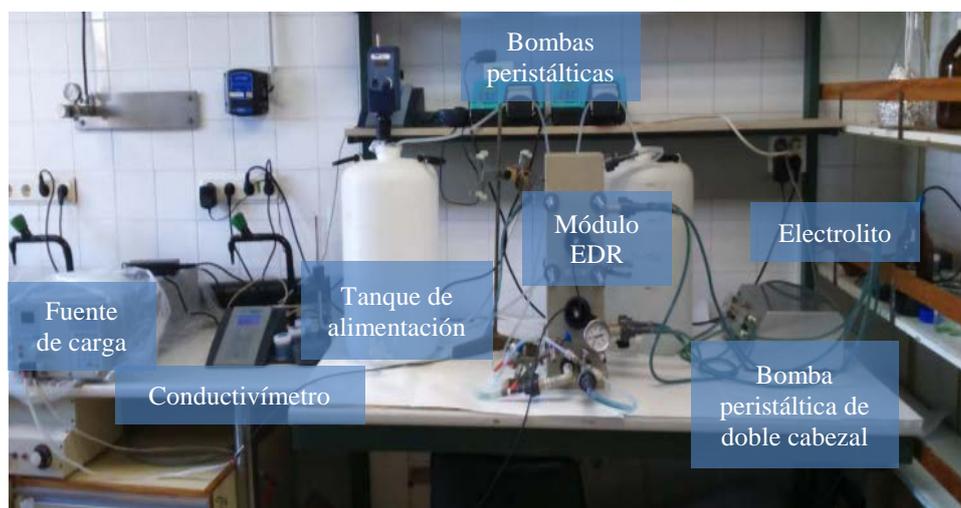


Figura 1.

Planta EDR

escala laboratorio.

Para este caso de estudio, se preparó agua de alimentación sintética para el compartimento concentrado teniendo en cuenta la concentración típica de cloruro sódico del mar ($C_c=0.66$ M). Para el compartimento diluido se empleó la concentración cloruro sódico típica de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cantabria ($C_d=0.0036$ M), cual fue seleccionada por su proximidad al mar y la homogeneidad de la composición a lo largo de las estaciones.

Para el modelado del proceso, se utilizó el software Aspen Custom Modeler, en el que se implementa un modelo matemático capaz de simular distintos escenarios tanto desde el punto de vista de operación como de diseño del módulo de membranas.

3 RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de forma experimental y simulada a diferentes caudales y temperaturas de operación.

3.1 Caudal de las corrientes de entrada

El caudal de las corrientes de alimentación en las plantas de electrodiálisis reversa es una variable crítica ya que gran parte de los costes de operación vienen dados por la potencia de bombeo.

Para el estudio de esta variable de operación, se llevó a cabo diversos experimentos en un rango de caudal de entre $100 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ y $500 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ que se corresponden con valores de número de Reynolds de entre 2.7 y 13.6, respectivamente, manteniendo la misma velocidad en ambos compartimentos (concentrado y diluido) a una temperatura constante de 297 ± 1 K y unas concentraciones de entrada $C_c=0.66$ M (concentración del mar Cantábrico) y $C_d=0.036$ M.

La Tabla 1 muestra los resultados de potencial obtenido a circuito abierto (OCV, intensidad = 0) experimentales y simulados, así como la potencia bruta máxima obtenida en función del número de Reynolds (Re). Igualmente, se muestran los resultados obtenidos con el modelo para su validación. A mayor velocidad de flujo, el potencial a circuito abierto es mayor debido a que el tiempo de residencia es menor y por tanto se mantiene una alta diferencia de gradiente salino en toda la celda de electrodiálisis, y la polarización de la concentración es pequeña entre ambos compartimentos. La comparación de los valores experimentales y simulados muestra cómo el modelo es capaz de predecir los resultados, ya que el mayor error obtenido ha sido del 1.59 %, para el caso de un $Re=13.6$.

Respecto a la máxima potencia bruta máxima obtenida para cada número de Reynolds, los mayores valores se consiguen trabajando a $Re=5.4$ y $Re=8.1$ con valores de 0.66 W y 0.70 W, respectivamente. Sin embargo, debido a que los costes de bombeo son mayores en el segundo caso, es preferible un $Re=5.4$. Cuando se trabajó con números de Reynolds de 2.7 y 13.6, se consiguió prácticamente el mismo valor de potencia (0.56 W y 0.57 W) debido al bajo valor de la resistencia interna en el primer caso y al elevado valor de OCV en el segundo caso. Al igual que ocurría con el potencial a circuito abierto, los valores simulados de potencia máxima predicen los resultados experimentales; en todos los casos el error es menor de 7.5 %, excepto en para un $Re=13.6$; posiblemente este se debe a que, a esta velocidad, la celda se encontraba trabajando en su máximo caudal recomendado.

Tabla 1. Valores de voltaje a circuito abierto y máxima potencia bruta experimental y simulado y error entre ambos valores.

Re	Exp. OCV (V)	Sim. OCV (V)	Error OCV (%)	Exp. Pmax (W)	Sim. Pmax (W)	Error Pmax (%)
Cc=Cd=2.7	3.77	3.79	0.53	0.56	0.52	7.14
Cc=Cd=5.4	4.11	4.15	0.97	0.66	0.62	6.06
Cc=Cd=8.1	4.28	4.31	0.70	0.70	0.66	5.71
Cc=Cd=10.9	4.37	4.41	0.92	0.65	0.61	6.15
Cc=Cd=13.6	4.40	4.47	1.59	0.57	0.63	10.53

3.2 Temperatura

Para el estudio de esta variable de operación, se llevaron a cabo experimentos a tres temperaturas distintas: 286 K, correspondiente a la temperatura del agua del mar Cantábrico en invierno, 291 K y 297 ± 1 K, correspondiente a la temperatura del agua de mar en verano a un número de Reynolds de 5.4. Estudios previos ya señalaron la importancia de esta variable en el proceso; una mayor temperatura permite conseguir mayores valores de potencia.

La Tabla 2 muestra los valores de potencial abierto (OCV) obtenidos a distintas temperaturas de forma experimental y simulada, así como el error entre ambos valores. Como se ve, una mayor temperatura permite obtener mayores valores de potencial; un descenso de temperatura de 297 K a 286 K produce un descenso de los valores del voltaje del 4.62 % pasando de 4.11 V a 3.92 V.

La disminución de temperatura también produce un efecto negativo sobre la resistencia de las membranas en términos globales. Cuando se pasa de una temperatura de 286 K a otra de 297 K, la resistencia interna disminuye más de un 70 %, pasando de $7.11\cdot 10^{-3} \Omega\cdot m^2$ a $4.16\cdot 10^{-3} \Omega\cdot m^2$, respectivamente.

Tabla 2. Valores experimentales y simulados de potencial abierto a distintas temperaturas.

T (K)	OCV (Exp.)	OVC (Sim.)	Error (%)
286±1 K	3.92	4.00	2.04
291±1 K	3.97	4.07	2.52
297±1 K	4.11	4.15	0.97

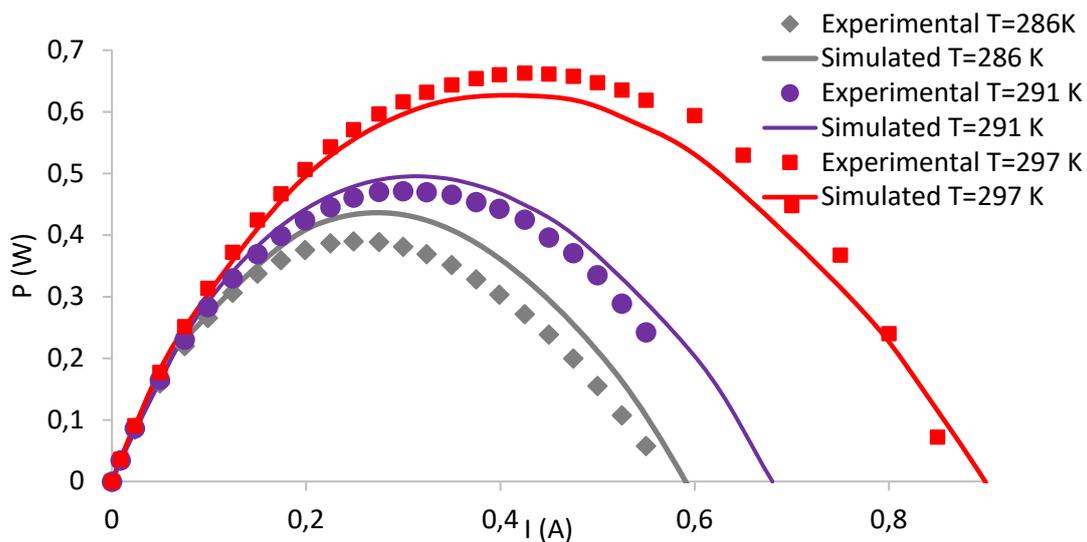


Figura 2. Efecto de la temperatura a distintas intensidades en la potencia.

La Figura 2 muestra las curvas potencia bruta (potencia frente a intensidad) obtenidas a distintas temperaturas. Para cada condición, los puntos representan valores experimentales y las líneas continuas valores simulados. De acuerdo con las curvas de potencia, a corrientes bajas, hasta 0.1 A, las curvas a distinta temperatura prácticamente se superponen. Sin embargo, si la intensidad supera este valor las curvas se separan progresivamente, consiguiéndose valores máximos de potencia de 0.39 W, 0.59 W y 0.66 W para valores de temperatura de 286 K, 291 K y 297 K respectivamente, con una diferencia del 42 % entre el valor más alto y más bajo de potencia máxima. Además, la corriente límite muestra una relación directa con temperatura: mientras que a 286 K sólo se alcanza una intensidad límite de 0.6 A, a 297 K se alcanza una intensidad límite de 0.9 A. Los resultados simulados demuestran que el modelo desarrollado predice adecuadamente los resultados experimentales.

4 CONCLUSIONES

Este trabajo demuestra el uso de la tecnología EDR como fuente de obtención de energía renovable. Los resultados son prometedores, ya que demuestran la posibilidad de emplear corrientes de agua de mar y de agua procedente de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cantabria como aguas de alimentación para obtención de energía. Para optimizar el proceso, es necesario fijar un caudal de alimentación que permita obtener la máxima potencia minimizando los costes de bombeo. Además, debido a que la temperatura del proceso es un parámetro crítico que favorece el proceso, es importante trabajar a la mayor temperatura posible. Por otro lado, se ha validado el modelo matemático desarrollado en este trabajo. Este modelo representa una herramienta útil y robusta para predecir los resultados en función de la geometría del módulo EDR y de las condiciones de operación. Como trabajo futuro, es importante el uso de aguas reales, para determinar el comportamiento del resto de iones así como validar el modelo con este tipo de aguas.

5. AGRADECIMIENTOS

Se agradece el soporte económico a la realización de este proyecto a través del Plan Regional de la Comunidad de Cantabria, Proyecto: Gradisal "RM16-XX-046-SODERCAN/FEDER". Así mismo los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad su apoyo a través de los proyectos CTQ2015-66078-R, CTM2014-57833-R and CTM2017-87850-R

5 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] J.W. Post, Blue Energy: electricity production from salinity gradients by reverse electrodialysis, (PhD Thesis), Wageningen University, 2009.

[2] B.E. Logan, M. Elimelech, Membrane-based processes for sustainable power generation using water. *Nature* 488 (2012) 313–319. doi:10.1038/nature11477.

[3] M. Tedesco, C. Scalici, D. Vaccari, A. Cipollina, A. Tamburini, G. Micale, Performance of the first reverse electrodialysis pilot plant for power production from saline waters and concentrated brines, *J. Memb. Sci.* 500 (2016) 33–45. doi:10.1016/j.memsci.2015.10.057.

[4] M. Tedesco, E. Brauns, A. Cipollina, G. Micale, P. Modica, G. Russo, J. Helsen, Reverse electrodialysis with saline waters and concentrated brines: A laboratory investigation towards technology scale-up, *J. Memb. Sci.* 492 (2015) 9–20. doi:10.1016/j.memsci.2015.05.020.