

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO
DE UN PROCESO DE ELECTRODIÁLISIS
CON MEMBRANAS BIPOLARES EN
CONTINUO ALIMENTADO POR UN
SIMULADOR FOTOVOLTAICO**

**(Energy consumption analysis of a
continuous bipolar membrane
electrodialysis process supplied by a
photovoltaic simulator)**

Para acceder al Título de

Graduado/a en Ingeniería Química

Autor: Estefanía Alonso Pelayo

TÍTULO	Análisis del consumo energético de un proceso de electrodiálisis con membranas bipolares en continuo alimentado por un simulador fotovoltaico		
AUTOR	Estefanía Alonso Pelayo		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Raquel Ibáñez Mendizábal / Antonio Domínguez Ramos		
TITULACIÓN	<i>Grado en Ingeniería Química</i>	FECHA	20/07/2017

PLABRAS CLAVE

EDBM, electrodiálisis, membranas bipolares, concentrados de desalación, valorización, energía solar fotovoltaica, simulador solar.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escasez de agua disponible hace necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento como la desalación de aguas salinas [1,2,3]. Sin embargo, en estos procesos se generan corrientes de concentrado, las cuales deben ser gestionadas con el fin de minimizar los daños en la flora y fauna marinas mitigando así el impacto ambiental [4].

La electrodiálisis, y más concretamente la electrodiálisis con membranas bipolares (EDBM) es una tecnología emergente potencialmente de interés en el tratamiento y valorización de dichos concentrados, permitiendo generar ácidos (HCl) y bases (NaOH) para su posterior comercialización o uso en las etapas de pre-tratamiento, limpieza y mantenimiento de la propia planta desaladora [5]. La tecnología EDBM es intensiva en cuanto al consumo de energía eléctrica se refiere, lo que viene limitando su implantación a escala industrial.

Este TFG tiene como objetivo contribuir a la I+D orientada a la mejora energética de los procesos EDBM. Se ha trabajado sobre una planta comercial de EDBM a escala de laboratorio en la que se ha integrado un simulador solar fotovoltaico como primera etapa con el objetivo de determinar las condiciones de operación más adecuadas para la reducción del consumo energético para la producción de ácidos y bases a partir de concentrados de desalación. Un simulador solar fotovoltaico es una fuente de potencia capaz de proveer un par intensidad de corriente/voltaje similar al que se obtendría con un panel real, con características definidas. Con el fin de cumplir con este cometido, se establecen los siguientes objetivos: i) realizar una caracterización/puesta a punto del simulador utilizado, ii) demostrar la viabilidad de la integración del simulador solar fotovoltaico como fuente de energía en la instalación EDBM a escala de laboratorio, iii) analizar el consumo energético del proceso, haciendo hincapié en la estimación de la resistencia equivalente del sistema EDBM para la relación entre el voltaje y la intensidad de corriente. La conexión del simulador solar fotovoltaico aun sistema EDBM a escala de laboratorio se justifica como etapa previa de la I+D necesaria para escalar el proceso a nivel de planta piloto.

RESULTADOS

Se seleccionó un simulador solar fotovoltaico *Chroma Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150S Series*. La caracterización y puesta a punto de dicho simulador fotovoltaico consistió en el registro de los valores de tensión y corriente obtenidos utilizando perfiles de irradiación solar en distintos meses y localidades (Santander y Almería, España). Se

analizó así la eficiencia fotovoltaica en diversos escenarios de irradiación, según un conjunto de resistencias conectadas al simulador. Los valores obtenidos variaron entre el 3,9% y 14,9% (respecto de un máximo nominal de 14,2%).

Se realizaron experimentos en continuo a tiempos largos de operación de 30 horas para demostrar la viabilidad técnica del proceso integrado operando en continuo utilizando membranas comerciales. En un primer caso, se utilizó la fuente de la instalación (conexión a red) en condiciones galvanoestáticas como referencia, obteniendo concentraciones 1 M y 1,5 M de HCl y NaOH respectivamente. En segundo lugar, se realizó un experimento utilizando como fuente de potencia el simulador solar fotovoltaico bajo un perfil de irradiación definido; en esta ocasión las concentraciones obtenidas fueron 1 M y 1,6 M de HCl y NaOH respectivamente. De esta forma se demostró la capacidad técnica del sistema EDBM-PV alimentado con el simulador de paneles fotovoltaicos para generar ácidos y bases.

En cuanto al análisis del consumo energético, se estudió la eficiencia energética del teórico proceso de conversión de energía, obteniendo un valor de 6,4%. Por otra parte, se realizó una comparación entre los consumos energéticos específicos para la producción de HCl y NaOH, 24 kWh/kg y 13 kWh/kg respectivamente, con otros trabajos anteriores resultando valores con similares ordenes de magnitud [5]. Se observó que los valores mayores obtenidos se deben a una mayor densidad de corriente media aplicada. Por otra parte, se estudió la eficiencia del teórico proceso de conversión de energía en el panel solar, obteniendo un valor de 6,4%. Por último, se realizó un ajuste de las variables voltaje e intensidad para ambos experimentos con el fin de conocer el valor de la resistencia equivalente del sistema, entendida como la suma de la resistencia aportada por las membranas y las disoluciones. Se obtuvieron valores de R de 3 Ω y 1,76 Ω para el experimento con el simulador solar fotovoltaico y la fuente de potencia conectada a red respectivamente. Esta diferencia se debe a la pérdida de conductividad en un comportamiento por la mayor intensidad aplicada. Se estimó una resistencia equivalente del sistema a partir de las concentraciones de las especies iónicas en los compartimentos de la celda. Se observó de esta forma que la resistencia debida a la variación de la concentración de las disoluciones utilizadas es mayor que la debida a las membranas empleadas.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha demostrado la viabilidad de incorporar un simulador solar fotovoltaico, junto con un perfil de irradiación a una instalación EDBM a escala de laboratorio en operación en continuo, produciendo HCl y NaOH con una concentración 1 M y 1,6 M respectivamente, integrando de esta forma el comportamiento variable en el tiempo obtenido durante 30 horas. Así mismo, mediante la caracterización y puesta a punto realizada a dicho simulador, ha sido posible determinar la eficiencia en la conversión del teórico panel, según distintas localizaciones y épocas del año, obteniendo valores dentro del rango esperado, por debajo del máximo de 14,2%. Por otra parte, se analizaron los consumos energéticos específicos del sistema EDBM conectado al simulador (13 kWh/kg NaOH y 24 kWh/kg HCl). Los valores obtenidos fueron superiores a los de la bibliografía debido a la mayor densidad de corriente media. La eficiencia de la conversión fotovoltaica del proceso fue de 6,4% para este experimento. Por último, se propuso una expresión para estimar la resistencia

equivalente del sistema en función de variables como la concentración de las especies iónicas en los compartimentos y el espesor de los mismos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. OMS/UNICEF (Organización mundial de la salud/Fondo de naciones unidas para la infancia). 2015. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2015 y evaluación del ODM*. Suiza. ISBN 978 92 4 350914 3.
- [2]. Charcosset, C. 2009. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 245, pp.214-231.
- [3]. World Water Council:
(<http://www.worldwatercouncil.org/es/noticias/noticias/article/2050-water-supplies-to-dwindle-in-parts-of-the-world-threatening-food-security-and-livelihoods/>)
- [4]. Gutiérrez López, B. 2012. *Recuperación de energía de la salmuera*. A, Hernández Muñoz (dir.) Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [5]. Muñoz Rodríguez, B. 2016. *Estudio del comportamiento de membranas aniónicas modificadas para la valorización de salmueras de desalación mediante un proceso de electrodiálisis con membranas bipolares*. Ibáñez Mendizábal, R; Domínguez Ramos, A. Trabajo fin de grado, Universidad de Cantabria.

TITLE	Energy consumption analysis of a continuous bipolar membrane electro dialysis process supplied by a photovoltaic simulator		
AUTHOR	Estefanía Alonso Pelayo		
DIRECTOR/CODIRECTOR	Raquel Ibáñez Mendizábal / Antonio Domínguez Ramos		
DEGREE	<i>Chemical engineering</i>	FECHA	20/07/2017

KEYWORDS

EDBM, electro dialysis, bipolar membranes, desalination brines, valorization, solar photovoltaic energy, solar simulator.

SCOPE

The shortage of available water does necessarily the research of new supply sources like the desalination of waters saltworks [1,2,3]. However, in these processes it generates currents of concentrated, which must be managed previously with the aim of avoid damages in the flora and marine fauna mitigating the environmental impact [4].

The electro dialysis, and more specifically the electro dialysis with bipolar membranes wich is an emergent technology used in the treatment and valuation of these concentrated, allowing generate acids (HCl) and bases (NaOH) for his commercialisation or use in the stages of pre-treatment, cleaning and maintenance of the desalination plant [5]. EDBM technology is intensive in terms of electrical energy consumption, which limits its implementation on an industrial scale.

This project aims to contribute I+D for improving the energy of EDBM processes. This project has been done on a commercial EDBM laboratory scale in which a photovoltaic solar simulator has been integrated as a first step, with the objective of determining the most suitable operating conditions for reduction energy consumption to produce acids and bases from desalination brines. Photovoltaic solar simulator is a power source capable of providing a pair of current /voltage intensity like obtained with a real panel with defined characteristic. To fulfill this task, the following objectives are established: i) perform a characterization/set-up of simulator used, ii) demonstrate the feasibility of integrating photovoltaic solar simulator as an energy source in EDBM installation at laboratory scale, iii) analyze energy consumption of processes emphasizing the equivalent resistance estimation of EDBM system for the relationship between voltage and current. The connection of photovoltaic solar simulator to laboratory scale EDBM system is justified as a previous stage of necessary I+D to scale the process at the pilot plant level.

RESULTS

Photovoltaic solar simulator “*Chroma Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150SSeries*” was selected. The characterization of the photovoltaic simulator consisted in the recording of voltage and current obtained, using solar irradiation profiles in different months and localities (Santander and Almeria, Spain). Photovoltaic efficiency was analyzed in different irradiation scenarios, according to resistance set connected to simulator. The values obtained ranged from 3,9% to 14,9% (in regard to maximum value of 14,2%).

Experiments were carried out continuously for long operating times of 30 hours to demonstrate the technical feasibility of integrated process by continuously operating using commercial membranes.

First, the source of the installation (grid connected) was used under galvanic conditions, obtaining 1 M and 1,5 M concentrations of acid and base respectively. Secondly, an experiment was performed using photovoltaic solar simulator under defined irradiation profile; on this occasion, the concentrations obtained were 1 M and 1,6 M of acid and base respectively. In this way, the technical capacity of the EDBM-PV system fed with the simulator to generate acids and bases, which was demonstrated.

In addition, the energy efficiency of the photovoltaic process was studied, obtaining a value of 6,4%. On the other hand, a comparison was made between the specific energy consumptions to produce HCl and NaOH, 24 kWh/kg and 13 kWh/kg respectively, with other previous work resulting values with similar orders of magnitude [5]. It was observed higher values obtained are due to higher average current density applied. On the other hand, the efficiency of theoretical process was studied obtaining a value of 6,4%.

Finally, a lineal adjustment of the parameters, voltage and intensity for both experiments was made to know the value of the overall resistance of the system, understood as the sum of the resistance provided by the membranes and the solutions. R values of 3 Ω and 1,76 Ω were obtained for the photovoltaic experiment and the source respectively. This difference is due to the loss of conductivity by the higher intensity applied. An equivalent resistance of system was estimated from the concentrations of ionic species in the cell compartments. It was observed the resistance due to the variation of the concentration of the solution used is greater than due to the membrane used.

CONCLUSIONS

This work has demonstrated the feasibility of incorporating a photovoltaic simulator to the commercial installation during continuous operations, producing HCl and NaOH with a concentration of 1 M and 1,6 M respectively, integrating the variable behavior in the time obtained during 30 hours. Likewise, through the characterization and set-up of this simulator, it was possible to determinate the efficiency in the conversion of theoretical panel, per different locations and time of year, obtaining values within the expected range, below the maximum of 14,2%. On the other hand, the specific energy consumption of EDBM system (13 and 24 kWh / kg NaOH-HCl) was analyzed. The values obtained were higher than those in the literature due to the higher average current density. The photovoltaic conversion efficiency was 6,4% for this experiment. Finally, an expression was proposed to estimate the equivalent resistance as a function of variables such as the ionic species concentration in the compartments and the thickness of the same.

REFERENCES

- [1]. OMS/UNICEF (Organización mundial de la salud/Fondo de naciones unidas para la infancia). 2015. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2015 y evaluación del ODM*. Suiza. ISBN 978 92 4 350914 3.

- [2]. Charcosset, C. 2009. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, 245, pp.214-231.
- [3]. World Water Council:
(<http://www.worldwatercouncil.org/es/noticias/noticias/article/2050-water-supplies-to-dwindle-in-parts-of-the-world-threatening-food-security-and-livelihoods/>)
- [4]. Gutiérrez López, B. 2012. *Recuperación de energía de la salmuera*. A, Hernández Muñoz (dir.) Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [5]. Muñoz Rodríguez, B. 2016. *Estudio del comportamiento de membranas aniónicas modificadas para la valorización de salmueras de desalación mediante un proceso de electrodiálisis con membranas bipolares*. Ibáñez Mendizábal, R; Domínguez Ramos, A. Trabajo fin de grado, Universidad de Cantabria.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, un agradecimiento especial a mis directores de proyecto, Dra. Raquel Ibáñez Mendizábal y Dr. Antonio Domínguez Ramos por haber confiado en mí para el desarrollo de este proyecto, pero sobre todo por la ayuda y el buen asesoramiento recibido por su parte. Mención especial merece también la Ing. Marta Herrero González, por su ayuda y dedicación, estando siempre disponible para ayudarme en todo lo necesario.

Gracias al Departamento de Ingenierías Química y Biomolecular por brindarme todo lo esencial para la realización de este TFG, permitiéndome hacer uso de sus instalaciones y equipos siempre que ha sido necesario.

Muchas gracias a mis compañeros y amigos por haber formado parte de estos años, por hacer de ellos unos años inmejorables.

Y, por último, dar las gracias a mi familia por su gran apoyo y porque sin su ayuda esto no hubiese sido posible.

INDICE

1. INTRODUCCION	13
1.1 Tecnologías de desalación	14
1.2 Impactos ambientales asociados a los procesos de desalación	17
1.3 Combinación de tecnología EDBM y fuentes de energía	18
1.4 Antecedentes en el uso de EDBM-PV	22
1.5 Objetivos	23
2. EQUIPOS Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL	24
2.1 Descripción de la instalación comercial de EDBM a escala de laboratorio	24
2.1.1 Celda de electrodiálisis	25
2.1.2 Baño termostático	26
2.1.3 Fuente de potencia	27
2.1.4 Simulador solar	27
2.2 Técnicas analíticas	29
2.2.1 Valoración ácido-base	29
2.2.2 Análisis mediante cromatografía iónica	30
2.3 Reactivos y materiales	32
2.4 Procedimiento experimental	33
2.4.1 Diseño experimental	33
2.4.2 Experimentos EDBM en continuo alimentados con fuente de potencia	35
2.4.3 Experimentos EDBM en continuo alimentados con simulador solar	35
3. RESULTADOS	36
3.1 Caracterización del simulador solar “Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150S”	36
3.2 Experimentos en continuo con fuente y con energía fotovoltaica obtenida a partir del simulador solar	39
3.3 Determinación de la resistencia óhmica aparente ofrecida por el sistema	44

4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION	49
5. ANEXO	51
6. BIBLIOGRAFIA	53

LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS

• LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Uso de las distintas fuentes de energía a lo largo del tiempo.....	14
Figura 2. Esquema de osmosis inversa.....	16
Figura 3. Esquema de una celda de ED con una configuración - CAC +.	16
Figura 4. Esquema de una celda de electrodiálisis con membranas bipolares [14].	18
Figura 5. Curvas características I-V y P-V de una célula fotovoltaica [16].....	20
Figura 6. Curva I-V con parámetros principales [16].....	20
Figura 7. Equipo comercial de EDBM utilizado.....	24
Figura 8. Diagrama de la instalación comercial de EDBM.	25
Figura 9. a) Celda de electrodiálisis; b) Separadores y rejillas.....	26
Figura 10. Baño termostático utilizado.	27
Figura 11. Fuente de potencia de la instalación comercial EDBM.	27
Figura 12. Simulador solar.	28
Figura 13. Funcionamiento del Photovoltaic Geographical system (PVGIS).	28
Figura 14. Programa Chroma Solar Array Simulation Soft Panel.....	29
Figura 15. Equipos de cromatografía DX-120, ICS-1100 y automuestreador AS40.	30
Figura 16. Capturas de pantalla del programa Chromeleon.	31
Figura 17. Esquema de la configuración de la celda de electrodiálisis.	34
Figura 18. Perfiles de irradiancia frente al tiempo	38
Figura 19. Perfil de irradiación solar utilizado en el desarrollo de las pruebas.....	39
Figura 20. Evolución de la concentración de las distintas especies del sistema alimentado por la fuente comercial.	40
Figura 21. Evolución de la concentración de las distintas especies en el sistema alimentado por el simulador solar.....	40
Figura 22. Representación del consumo energético específico de NaOH frente a la densidad de corriente aplicada.	43
Figura 23. Representación del consumo energético específico de HCl frente a la densidad de corriente aplicada.	44
Figura 24. Comparativa entre el voltaje experimental y los valores teóricos obtenidos de voltaje simulado en el experimento alimentado con energía fotovoltaica.	47
Figura 25. Comparativa entre el voltaje experimental y los valores teóricos obtenidos de voltaje simulado en el experimento alimentado por la fuente.	47

• **LISTADO DE FIGURAS Y TABLAS**

Tabla 1. Combinaciones de las principales tecnologías de desalación y fuentes de energía renovables. T= energía térmica, E= energía eléctrica, M= energía mecánica. Azul= procesos térmicos con cambio de fase, Naranja= procesos sin cambio de fase [8,9,10].....15

Tabla 2. Ventajas y desventajas de energías convencionales frente a energías renovables.18

Tabla 3. Ventajas de la combinación EDBM- PV19

Tabla 4. Elementos que componen la instalación comercial24

Tabla 5. Características de las membranas catiónicas y aniónicas.26

Tabla 6. Características de las membranas bipolares.26

Tabla 7. Condiciones de análisis cromatográfico.....31

Tabla 8. Tiempos de retención de los iones analizados y patrones de calibrado.....31

Tabla 9. Concentraciones iniciales y caudales de las bombas peristálticas.33

Tabla 10. Condiciones de las pruebas realizadas.....37

Tabla 11. Valores medidos de eficacia.....38

Tabla 12. Eficiencias del sistema con energía fotovoltaica.41

Tabla 13. Estimación del consumo energético específico en la producción de bases con el sistema experimental EDBM alimentado por la fuente, los paneles y el simulador fotovoltaicos.42

Tabla 14. Estimación del consumo energético específico en la producción de ácidos con el sistema experimental EDBM alimentado por la fuente, los paneles y el simulador fotovoltaicos.43

Tabla 15. Concentraciones y número de espaciadores utilizados en el experimento.....45

Tabla 16. Valores obtenidos del ajuste a la recta R vs 1/C.....45

Tabla 17. Valores teóricos obtenidos de las distintas resistencias.....46

Tabla 18. Parámetros del ajuste lineal a la recta V-I.....46

Tabla 19. Medida del RMSE obtenido por tramos horarios.....48

1. INTRODUCCION

En la actualidad, más del 40% de la población mundial se ve afectada por la escasez de agua, situándose en torno a 663 millones de personas las que carecen de acceso a fuentes mejoradas de agua potable, mientras que una de cada tres personas no disponen de servicios de saneamiento [1].

Según el World Water Council y la FAO, las previsiones para el año 2050 apuntan a que un consumo excesivo y la degradación del agua junto con el efecto del cambio climático reducirán el suministro de agua mundial en muchas regiones, situándose por debajo del 17% de la demanda mundial [2], siendo los más afectados los países que se encuentran en vías de desarrollo [3].

En cuanto a las extracciones de agua dulce, aumentaron a nivel mundial en un 1% desde los años 80, debido a un incremento en la demanda por parte de los países en desarrollo [4]. Estos datos reflejan el problema existente respecto a su escasez, lo que hace necesario la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento, como la desalación de las aguas salobres. Se estima que mediante el uso de plantas de desalación se obtienen en torno a 90-100 millones de m³ de agua dulce al día [5].

Estas plantas de desalación requieren para su funcionamiento una gran cantidad de energía, cuya demanda se ve incrementada por el crecimiento de la población.

Dicha energía puede ser obtenida por distintas fuentes. Hasta ahora, el petróleo, el carbón y el gas han sido clave en el aumento de la producción de energía, sin embargo, se espera un cambio en el uso de estos combustibles como se observa en la Figura 1.

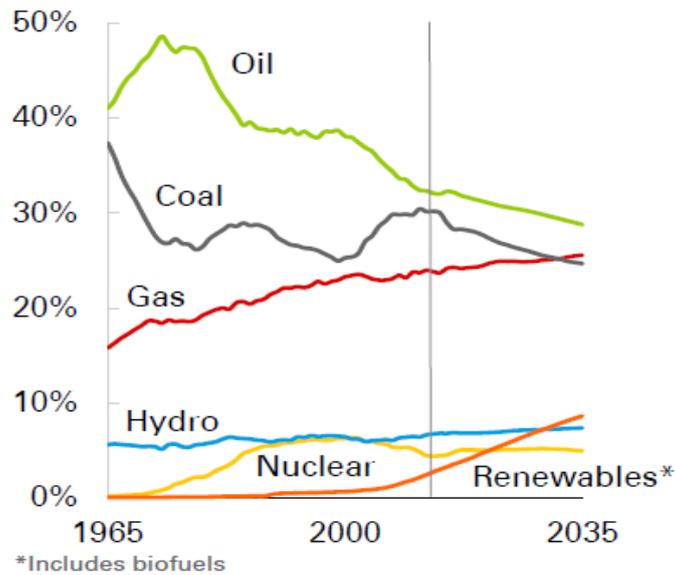


Figura 1. Uso de las distintas fuentes de energía a lo largo del tiempo

Actualmente los combustibles fósiles continúan siendo la fuente de energía dominante a nivel mundial. En cuanto al gas, este se sitúa como el combustible fósil de más rápido crecimiento, mientras que el petróleo experimenta un crecimiento constante, aunque su aportación sigue una tendencia descendente. En contraposición, el carbón sufre una reversión en su fortuna, después de haber ganado participación se prevé que su crecimiento desacelere bruscamente por lo que su futuro pasa por la búsqueda de nuevas tecnologías con el objetivo de mitigar las emisiones de CO₂. En cuanto a las energías renovables, en las que se incluyen los biocombustibles, experimentan un crecimiento rápido haciendo que su utilización aumente del 3% al 9% en 2035 y llegando a alcanzar una participación mundial del 16% en el mismo año. Tal crecimiento está respaldado por una disminución en los costes, sobre todo en la energía eólica y solar fotovoltaica, las cuales sufrirán un descenso en sus precios entorno al 25% y 40% respectivamente en los próximos 20 años [6,7].

1.1 Tecnologías de desalación

Como se ha dicho anteriormente, actualmente se persigue la búsqueda de nuevas rutas de obtención de agua dulce debido a la escasez que esta presenta. Una de ellas es la desalación de agua de mar, la cual consiste en reducir la concentración de sales hasta una concentración apropiada para su uso. En la Tabla 1 se recogen algunas de las

combinaciones tecnología-energía disponibles, donde las más prometedoras son marcadas con un tic [8,9].

Tabla 1. Combinaciones de las principales tecnologías de desalación y fuentes de energía renovables. T= energía térmica, E= energía eléctrica, M= energía mecánica. Azul= procesos térmicos con cambio de fase, Naranja= procesos sin cambio de fase [8,9,10].

	Solar		Eólica		Geotérmica		Maremotriz		
	T	E	M	E	T	E	E	M	T
Evaporación flash multi-etapa (MSF)	✓				•				
Evaporación de efecto múltiple (MED)	✓	•		•	•	•	•		•
Compresión térmica de vapor (TVC)	•				•				•
Compresión mecánica de vapor (MVC)		•	•	•		•	•	•	
Destilación Solar (SD)	•								
Humidificación multi-efecto (MEH)	•				•				•
Destilación por membranas (MD)	•				•				•
Electrodiálisis (ED)		✓	•	•		•	•	•	
Osmosis Inversa (RO)		✓	•	✓		•	•		

Entre los anteriores, los procesos térmicos con cambio de fase cuentan con el inconveniente de llevar asociados altos costes, ya que requieren grandes cantidades de energía para el cambio de fase, además, son tecnologías menos compactas que la ED y RO. Todo ello unido al descenso en los precios de las membranas frente a un aumento en los costes de electricidad, hace más viable optar por procesos como la ED o la RO para la desalación de agua salobre. Se procede a explicar estos últimos a continuación. En osmosis inversa, la solución salina está separada del agua dulce mediante una membrana semipermeable, sin embargo, parte del agua dulce pasará a la solución salina aumentando el nivel de esta. La presión osmótica de la disolución salina corresponde a esta diferencia de nivel, de manera que, si se aplica una presión sobre la solución salina mayor que la presión osmótica, el agua pasará a través de la membrana hacia donde se encuentra el agua dulce aumentando su nivel [9] (Figura 2).

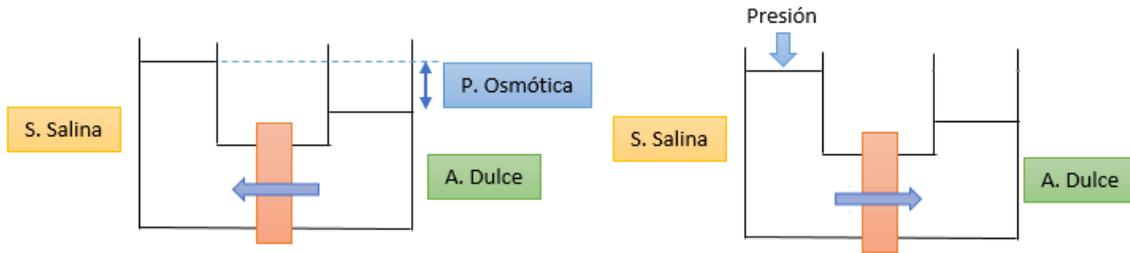


Figura 2. Esquema de osmosis inversa.

La electrodiálisis consiste en una técnica de separación por membranas en la cual las especies se transportan a través de una membrana de intercambio iónico (catiónicas y aniónicas) bajo la acción de un campo eléctrico, de manera que son separadas de la disolución acuosa. Una vez que la salmuera, la cual contiene especies ionizadas (Na^+ y Cl^-), atraviesa los compartimentos de la celda de electrodiálisis los aniones se dirigen hacia el ánodo (positivo) mientras que los cationes lo hacen hacia el cátodo (negativo) [11]. En el interior de las celdas, las membranas se encuentran dispuestas siguiendo una configuración determinada, de manera que los iones positivos y negativos son eliminados de la alimentación y transferidos a los compartimentos vecinos, obteniéndose así corrientes diluidas y otras más concentradas en dichas especies iónicas como se muestra en la Figura 3.

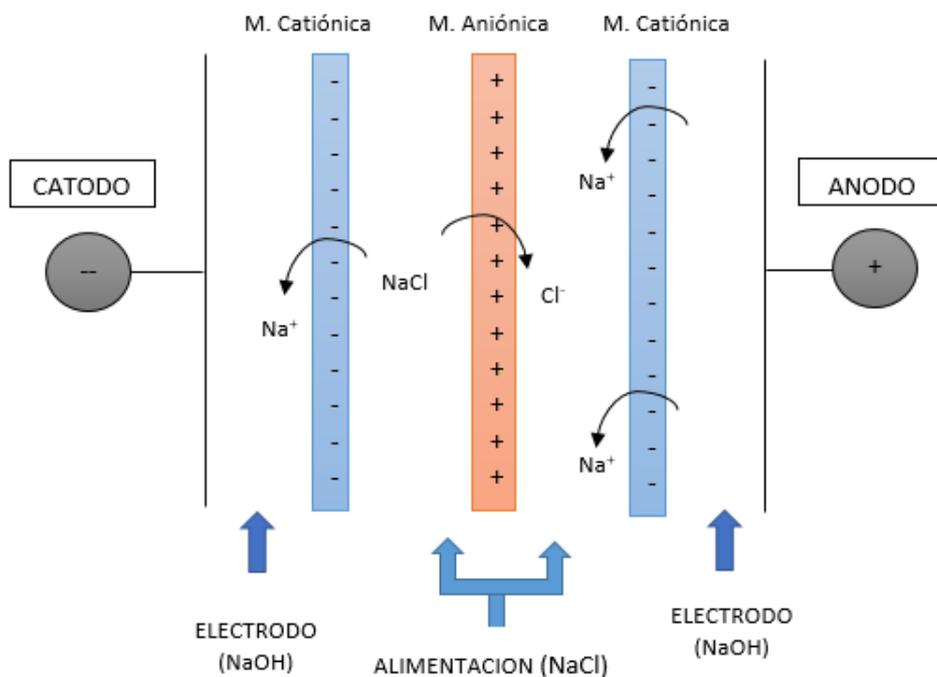


Figura 3. Esquema de una celda de ED con una configuración -CAC+.

1.2 Impactos ambientales asociados a los procesos de desalación

Sin embargo, los procesos de desalación no están exentos de problemas, como es el caso de la generación de salmueras, corrientes de rechazo que contienen una elevada concentración de sales. La salinidad de esta agua es notablemente superior a la que están sometidos los organismos que componen el hábitat marino [12] lo que puede repercutir negativamente en la flora y la fauna marina.

De tal manera, la preocupación por el medio ambiente conduce al desarrollo de procesos sostenibles para la recuperación y valorización de los concentrados procedentes de las plantas desaladoras.

La electrodiálisis con membranas bipolares (EDBM) es una tecnología emergente muy utilizada en el tratamiento y valorización de corrientes de concentrado procedentes de plantas de desalación [13].

La EDBM se basa en el mismo fundamento que la electrodiálisis con la única diferencia de que en este caso la celda incorpora además de las membranas catiónicas y aniónicas membranas bipolares que son capaces de disociar las moléculas de agua en protones (H^+) y grupos hidroxilos (OH^-) (figura 4). El objetivo que se persigue utilizando este tipo de tecnologías es el de valorizar el residuo concentrado obteniéndose como productos ácidos clorhídrico (HCl) e hidróxido de sodio (NaOH), los cuales son productos altamente demandados en la industria y que además pueden ser utilizados en las etapas de mantenimiento y limpieza de las propias plantas desaladoras [15].

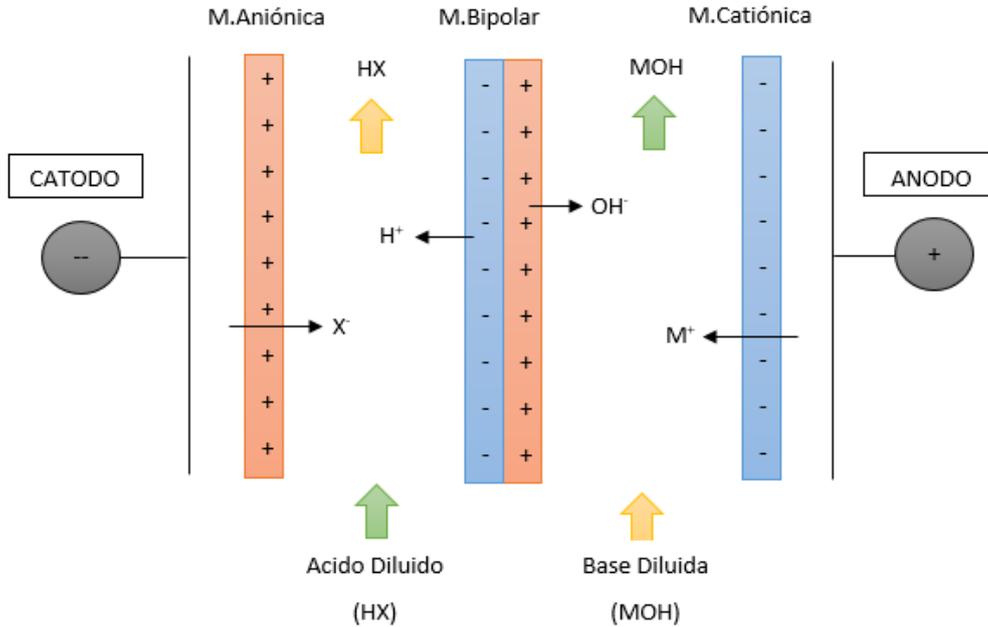


Figura 4. Esquema de una celda de electrodiálisis con membranas bipolares [14].

1.3 Combinación de tecnología EDBM y fuentes de energía

Las tecnologías de tratamiento de salmueras requieren grandes cantidades de energía para su funcionamiento, por ello, teniendo en cuenta las ventajas de las renovables, recogidas en la Tabla 2, frente a energías convencionales [5] y la prometedora situación a la que se enfrentan, en este trabajo fin de grado se optará por utilizar fuentes de energía renovables como alimentación.

Tabla 2. Ventajas y desventajas de energías convencionales frente a energías renovables.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ENERGIAS CONVENCIONALES	<ul style="list-style-type: none"> Menores costes de producción Amplia disponibilidad Facilidad de extracción 	<ul style="list-style-type: none"> Gran cantidad de combustible necesario para la obtención de pequeños volúmenes de agua Producción de gases contaminantes Son fuentes de energía finitas
ENERGIAS ALTERNATIVAS	<ul style="list-style-type: none"> Energías más sostenibles ambientalmente Energías libres de contaminación y generación de residuos Son fuentes de energía inagotables 	<ul style="list-style-type: none"> Altos coste de inversión y uso de suelo. No es posible predecir su disponibilidad

Una vez decidido que se optará por fuentes de energía alternativas para alimentar el proceso, de acuerdo con la Tabla 1 y las ventajas recogidas en la Tabla 3 se observa que la fuente más apropiada es la energía solar fotovoltaica (PV) combinada con EDBM.

Tabla 3. Ventajas de la combinación EDBM- PV

EDBM-PV	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología más adecuada en lugares remotos, debido a un mantenimiento y modo de operación más simple. • Mejor adaptación a entradas de energía irregulares. • Costes más bajos a pequeña escala. • No se requiere pretratamiento de las aguas de la alimentación. • Mayor eficiencia del proceso al realizarse en menos etapas.
----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

La energía solar fotovoltaica se basa en el efecto fotovoltaico, el cual consiste en la transformación de la energía lumínica procedente del sol en energía eléctrica. Para ello se usan células solares construidas con materiales semiconductores, siendo el más común el silicio [16].

La luz solar que incide sobre el panel está compuesta por fotones, los cuales tienen distintos valores de energía que transmiten a los átomos de las células fotovoltaicas permitiendo que el electrón se libere del enlace que le une con el átomo dejando por tanto huecos libres. Si el electrón se separa en el lado p del material, este pasa poco tiempo libre ya que se recombina con un hueco rápidamente. Sin embargo, si el par electrón-hueco es creado cerca de la unión hay posibilidad de que se difunda en ella. Una vez que el electrón cruza la unión quedará en el lado n, donde la probabilidad de que se recombine con otro hueco es baja [16].

Algo similar ocurre cuando el electrón se separa en el lado n, en este caso es el hueco el que se difunde en la unión hacia el lado p donde hay pocos electrones. El desequilibrio de carga en una célula iluminada crea una diferencia de potencial, de manera que si los dos lados se conectan mediante un cable exterior se produce un flujo de electrones desde el lado n hacia el lado p realizando trabajo en una carga exterior [16].

A partir del análisis de la curva característica corriente vs voltaje (I-V) de los módulos fotovoltaicos es posible definir los parámetros principales que definen su comportamiento eléctrico.

Esta curva representa un ejemplo de los valores de tensión y corriente medidos experimentalmente, sometidos a unas ciertas condiciones de irradiación y temperatura y por consiguiente los valores de potencia a través de la Ecuación 1 (Figura 5).

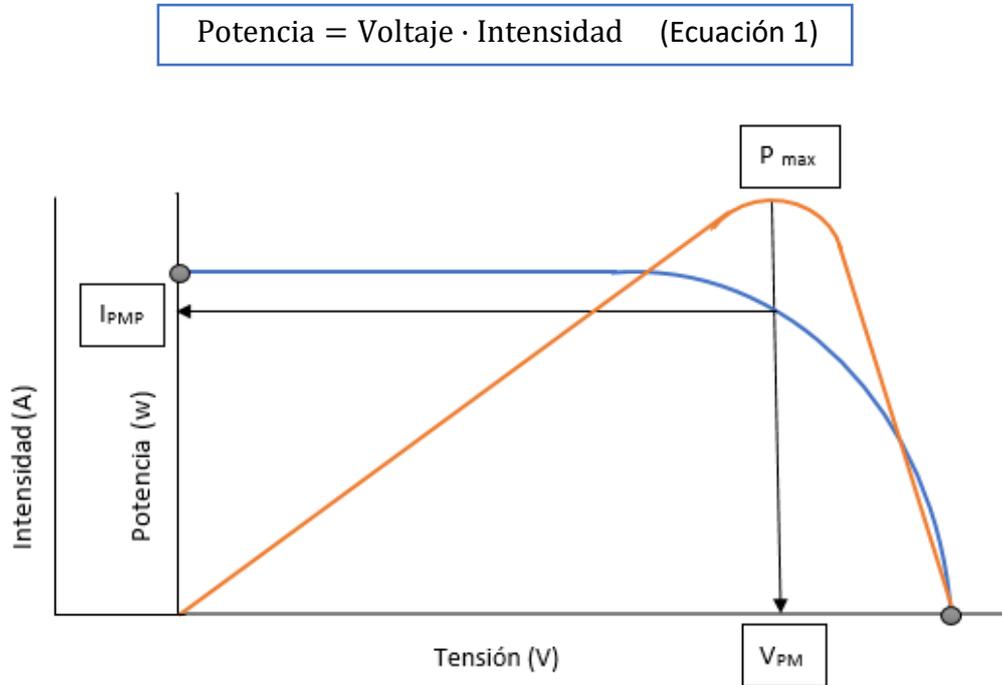


Figura 5. Curvas características I-V y P-V de una célula fotovoltaica [16].

Cada punto intensidad-voltaje se obtiene variando la resistencia desde cero hasta infinito como se observa en la Figura 6.

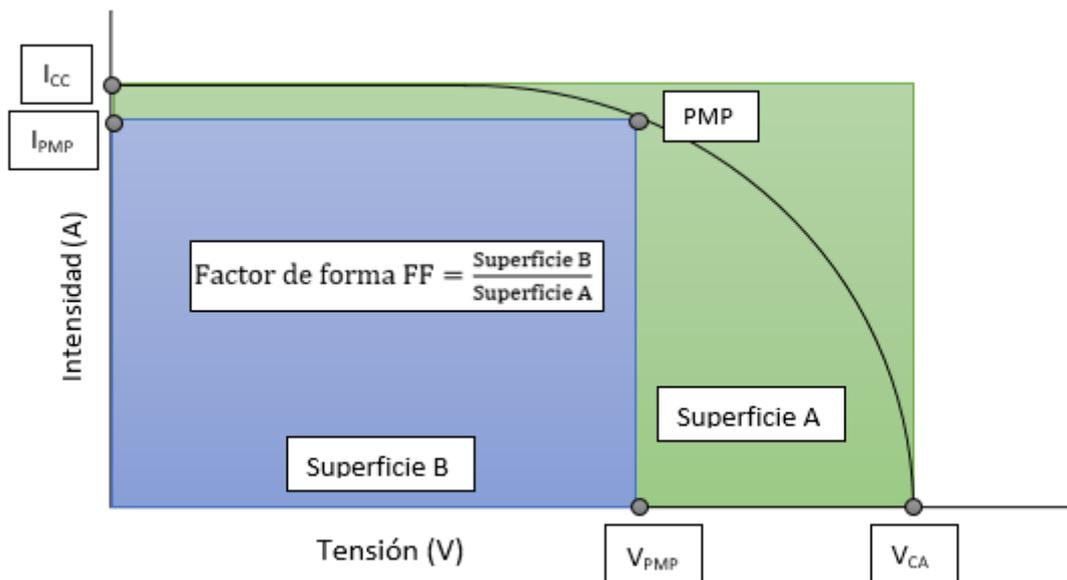


Figura 6. Curva I-V con parámetros principales [16].

Como se puede observar en la figura anterior, el mayor valor de corriente se obtiene en condiciones de cortocircuito ($V=0$), este valor se denota como intensidad de cortocircuito (I_{CC}). En el caso de que el dispositivo se mantenga en circuito abierto ($I=0$) este se autopolariza con una cierta tensión que será la máxima que pueda soportar, este valor de tensión se denota como tensión de circuito abierto (V_{CA}).

La superficie B representa la mayor área bajo la curva posible y viene dada por el producto de I_{PMP} y V_{PMP} que proporciona la máxima potencia, como se puede observar, esta área es menor que el de la superficie A, que corresponde a la máxima corriente que puede extraerse de la célula (I_{CC}) por la mayor tensión (V_{CA}). El cociente entre ambas áreas es conocido como factor de forma (FF), este parámetro suele tomar valores entre 0,7-0,8 variando de unos dispositivos a otros. A partir del factor de forma puede definirse la máxima potencia como:

$$P_{max} = FF \cdot V_{CA} \cdot I_{CC} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Anteriormente, en la Universidad de Cantabria se utilizaron los paneles solares colocados en el tejado de la E.T.S. I.I. y T. para el desarrollo de estudios anteriores; sin embargo, en este trabajo fin de grado se plantea integrar en el proceso el simulador solar fotovoltaico “*Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150SSeries*”(Chroma, Países Bajos), el cual permite simular las condiciones de operación de paneles solares, independientemente del equipo instalado, de forma más flexible, con independencia de las condiciones meteorológicas y la localización geográfica en un tiempo muy reducido. Un simulador solar fotovoltaico consiste en una fuente de potencia capaz de generar el par intensidad de corriente/voltaje que se obtendría en un panel solar real de las características especificadas y bajo el perfil de irradiación seleccionado.

Estos cuentan con un simulador de panel fotovoltaico interno el cual es útil para programar algunos parámetros como la tensión para la cual la potencia será máxima (V_{mp}), el punto de máxima potencia (P_{mp}) y el factor de forma (FF) y simular tanto las curvas I-V como P-V características para diferentes tipos de células solares con tiempos de respuesta más rápidos.

A través de “*Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*” es posible obtener perfiles de irradiancia de cualquier parte del mundo en diferentes estaciones [17] con el

fin de poder recrear distintos escenarios en cuanto a la climatología y la estación del año únicamente introduciendo en el simulador los perfiles de deseados.

1.4 Antecedentes en el uso de EDBM-PV

El departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria, ha llevado a cabo un estudio de viabilidad técnica de producción de agua dulce a partir de electrodiálisis alimentada con energía solar fotovoltaica, para ello, se ha tomado como caso de estudio la producción de agua dulce en las Islas Canarias evaluando la tecnología ED alimentada por energía PV frente al proceso convencional de RO [8]. Posteriormente, en la Universidad de Cantabria se han desarrollado otras vertientes de investigación relacionadas con la EDBM-PV, en concreto en el trabajo de fin de grado de Alexandra Mazón [18] en el que se pretende valorizar las corrientes de concentrado procedentes de la tecnología RO con el objetivo de evitar su vertido directo al mar, lo que puede generar cambios en la salinidad del agua provocando efectos muy negativos en la vida marina [19]. Las conclusiones obtenidas en dicho proyecto son las siguientes:

- i) Se demuestra la viabilidad de trabajar en continuo con el sistema EDBM; mejorando la sostenibilidad ambiental al implementar en el sistema dos paneles solares fotovoltaicos;
- ii) Se ha verificado que a través de EDBM-PV es posible obtener corrientes de ácido y bases con concentraciones de 1,2 y 1,5 M, respectivamente, a tiempos largos manteniendo esas concentraciones constantes
- iii) Desde el punto de vista energético, se obtuvieron valores de eficiencia en el rango de 3,5-6,5%, frente al valor máximo teórico de 14,2% que presentan los paneles.

1.5 Objetivos

En base a los antecedentes recogidos en el apartado anterior y a la situación actual de la tecnología EDBM alimentada con energía solar fotovoltaica desarrollada a escala de laboratorio, el objetivo general de este trabajo es analizar el consumo energético de la tecnología EDBM alimentada con energía solar fotovoltaica obtenida a partir de un simulador solar fotovoltaico. Como caso de estudio se considera la valorización de concentrados procedentes de desaladoras. Para ello, se plantean los siguientes objetivos como labor previa a la integración a mayor escala de la tecnología EDBM con solar fotovoltaica:

1. Realizar la caracterización/puesta a punto del simulador solar fotovoltaico *Chroma Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150S*, con el objeto de ser capaz de ajustar y poner a punto su comportamiento para simular la energía entregada por un panel solar real con unas características definidas por el usuario y bajo un perfil de irradiación conocido.
2. Integrar dicho simulador en la tecnología EDBM con el fin de producir ácidos y bases de concentración similar a los obtenidos utilizando corriente de red.
3. Estudio energético del proceso mediante el cálculo de la resistencia equivalente del sistema y su comparación que referencias que emplean corriente de red.

2. EQUIPOS Y METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A continuación, se procede a describir los materiales y equipos utilizados en la elaboración del presente proyecto. Los experimentos realizados se llevaron a cabo en el laboratorio 530 del departamento de Ingenierías Química y Biomolecular de la Escuela Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicaciones de la Universidad de Cantabria.

2.1 Descripción de la instalación comercial de EDBM a escala de laboratorio

El equipo de EDBM utilizado pertenece a la casa PC Cell (*PC CELL B-ED 1-4*, Alemania) (Figura 7).



Figura 7. Equipo comercial de EDBM utilizado.

La instalación está formada por los siguientes elementos (Figura 8):

Tabla 4. Elementos que componen la instalación comercial

1	Celda de electrodiálisis
2	Bombas peristálticas
3	Válvulas, que permiten un caudal máximo de 100 L/h
4	Tanques encamisados, con un volumen de 2,25 L aproximadamente
5	Fuente de potencia
6	Manómetros
7	Rotámetros
8	pHmetro
9	Sondas de conductividad
10	Baño termostático
11	Ordenador
12	Simulador solar

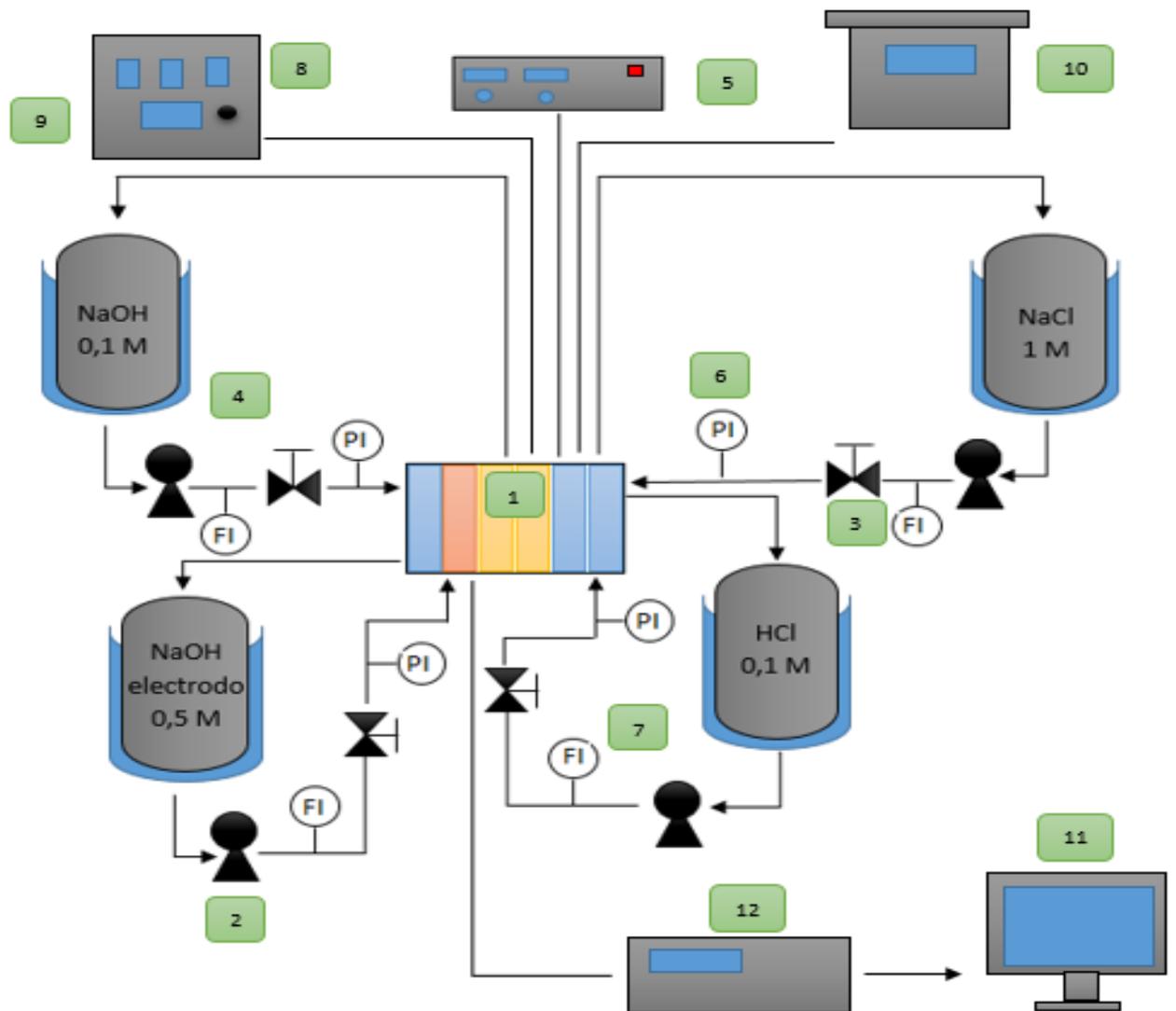


Figura 8. Diagrama de la instalación comercial de EDBM.

A continuación, se describen los elementos que conforman la instalación de ED:

2.1.1 Celda de electrodiálisis

La celda Elektrolyse Proyect (Países Bajos) está compuesta por dos electrodos de polaridad opuesta fabricados en titanio y con un área efectiva de 100 cm^2 . Además, se encuentran cubiertos de óxido de rutenio (Figura 9a).

En el interior de la celda es posible establecer diferentes configuraciones en función de cómo estén ordenadas las membranas y los espaciadores, los cuales permiten separar los compartimentos evitando así que las disoluciones utilizadas se mezclen, estos a su

vez contienen rejillas en su interior que permiten una mejor distribución del fluido (Figura 9b).

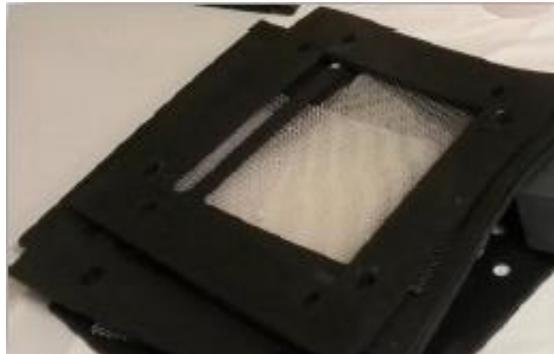


Figura 9. a) Celda de electrodiálisis; b) Separadores y rejillas.

En el desarrollo de los experimentos se utilizaron membranas catiónicas (RALEX CM-PP), aniónicas (RALEX AM-PP) y bipolares (FUMASEP-FBM). En las Tabla 5 y 6 se recogen las características de cada modelo.

Tabla 5. Características de las membranas catiónicas y aniónicas.

		RALEX CM-PP (M. Catiónica)	RALEX AM-PP (M. Aniónica)
Material principal		Polietileno (PE)	Polietileno (PE)
Aditivos		Polipropileno (PAD)	Polipropileno (PAD)
Grupo intercambio iónico		R-SO ₃ ⁻	R-(CH ₃) ₃ N ⁺
Espesor (mm)	Dilatado	Max. 0,45	Max. 0,45
	Seco	Max. 0,70	Max. 0,75
Permeabilidad hidrodinámica (ml/(h/m²))		0	0

Tabla 6. Características de las membranas bipolares.

		FUMASEP-FBM (M. Bipolar)
Voltaje separación agua (V)		0,8
Eficiencia separación agua (%)		> 98
Espesor (mm)		0,2-0,25

2.1.2 Baño termostático

El baño termostático, de la casa PolyScience (Estados Unidos), utiliza una disolución al 50% de etanol 50% agua, con el fin de mantener la temperatura en valores que no ocasionen problemas en la instalación. La disolución circula desde el baño hasta llenar

el encamisado de los tanques manteniendo la temperatura a través del intercambio de calor (Figura 10).



Figura 10. Baño termostático utilizado.

2.1.3 Fuente de potencia

La fuente de potencia pertenece a la casa Statron (Suiza), es capaz de operar en un rango de 0-36 V y 0-22 A. Consta de un polo positivo y otro negativo los cuales van conectados a la celda de electrodiálisis con el objetivo de conducir la potencia hasta ella. Además, cuenta con dos potenciómetros para ajustar el amperaje o el voltaje de salida de la fuente (Figura 11).



Figura 11. Fuente de potencia de la instalación comercial EDBM.

2.1.4 Simulador solar

Para la realización de los experimentos se decidió implementar en la instalación de EDBM un simulador solar de la casa Chroma (Países Bajos) (*Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150S*) (Figura 12).



Figura 12. Simulador solar.

El simulador permitió recrear el comportamiento de los paneles solares instalados en la azotea que se utilizaron con anterioridad en otros estudios en distintas condiciones meteorológicas y situaciones geográficas introduciendo el perfil de irradiancia-temperatura deseado, para disponer de los datos necesarios se recurrió a la base de datos PVGIS en la cual se recogen perfiles de irradiancia diarios o mensuales de cualquier lugar de Europa, Asia y América (Figura 13). Esta base de datos proporciona la irradiancia global (G), la irradiancia difusa (G_d) y la irradiancia global con cielo completamente despejado (G_c).

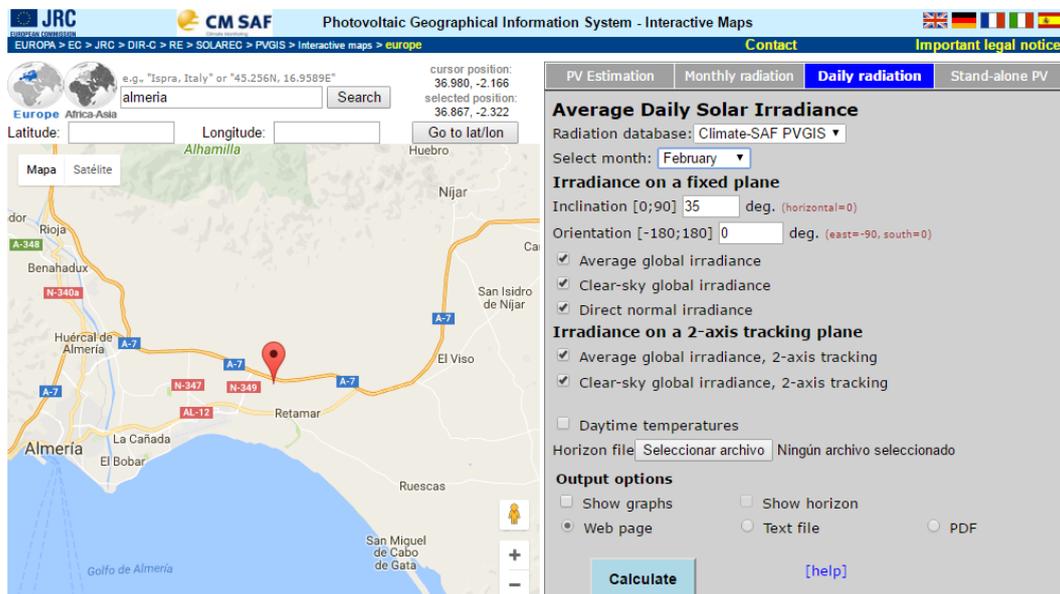


Figura 13. Funcionamiento del Photovoltaic Geographical system (PVGIS).

El simulador solar utiliza un software (Figura 14) en el que una vez establecido el perfil deseado y las características del panel que se pretende simular como el punto de máxima potencia (P_{mp}), el voltaje al que se obtiene la máxima potencia (V_{mp}), el factor

de forma (FF) y el intervalo de tiempo, es posible obtener las curvas I-V y P-V correspondientes a través del modelo matemático Sandia (Simplified Photovoltaic I-V Curve Model) en un menor tiempo que si se hiciese con paneles solares. Una vez finalizado el experimento el software guarda un report donde se recogen todos los valores de intensidad, voltaje y potencia medidos y su valor medio.

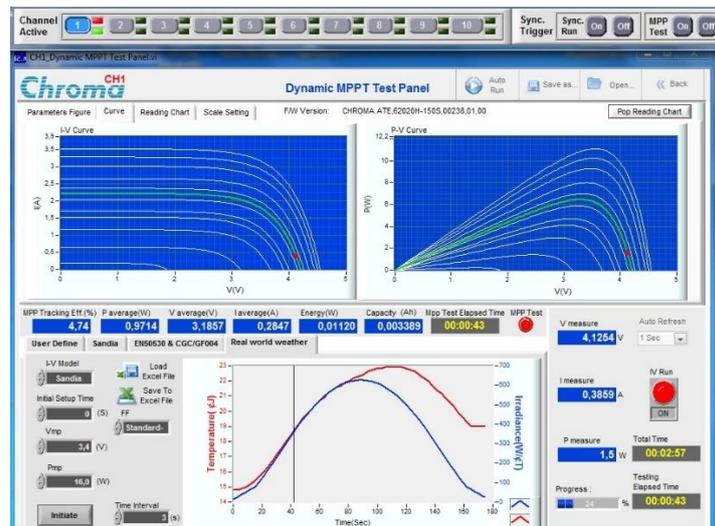


Figura 14. Programa Chroma Solar Array Simulation Soft Panel.

2.2 Técnicas analíticas

Las técnicas utilizadas en el desarrollo del presente proyecto con el fin de evaluar la evolución de la instalación de EDBM fueron la valoración ácido-base y la cromatografía iónica.

2.1.1 Valoración ácido-base

La valoración ácido-base es una técnica de análisis cuantitativo que consisten en determinar la concentración de ácido o de base que contiene una disolución mediante su reacción con una base o un ácido de concentración conocida.

Esta técnica se basa en la reacción de neutralización ácido-base y mediante el uso de indicadores es posible conocer el momento en que la reacción ha finalizado.

En este caso para valorar el ácido se utilizó una disolución de hidróxido de sodio 0,1 M, mientras que la valoración de la base se hizo utilizando una disolución de ácido clorhídrico 0,1 M empleando fenolftaleína como indicador.

2.1.2 Análisis mediante cromatografía iónica

La cromatografía líquida es una técnica analítica que permite la separación de iones mediante el uso de resinas de intercambio iónico. Como resultado se obtienen cromatogramas donde la posición de los picos máximos indica el ion presente en la disolución y el área de estos la concentración.

En este caso se cuantificaron los iones cloruro (Cl^-) y sodio (Na^+). Para cuantificar los aniones Cl^- y SO_4^- se utilizó el cromatógrafo de intercambio aniónico Dionex DX-120 y en el caso de los cationes Na^+ el cromatógrafo de intercambio catiónico Dionex ICS-1100 (Figura 15). Antes de introducir las muestras en ambos cromatógrafos fue necesario hacer diluciones de estas con el objetivo de proteger los equipos ya que la conductividad máxima que pueden medir es de $1000 \mu\text{S}$.



Figura 15. Equipos de cromatografía DX-120, ICS-1100 y automuestreador AS40.

A continuación, en las Tablas 7 y 8 se recogen las características técnicas de ambos equipos, así como las específicas de los iones cuantificados.

Tabla 7. Condiciones de análisis cromatográfico.

	Columna	Eluyente	Flujo	Iones
Dionex DX-120	CS12A	18 mM Ac. metanosulfónico	1 ml/min	Na ⁺
Dionex ICS-1100	AS9-HC	9 mM Na ₂ CO ₃	1 ml/min	Cl ⁻

Tabla 8. Tiempos de retención de los iones analizados y patrones de calibrado.

	Tiempo de retención (min)	Patrones de calibrado (mg/L)	Validación de los patrones (mg/L)
Na ⁺	3,8	10-25-50-100	20
Cl ⁻	7,2	10-25-50-100	20

En la Figura 16 se muestra un par de capturas de pantalla del software utilizado para el tratamiento de los datos (Chromeleon) con una cromatografía a modo de ejemplo. En ella se puede observar distintos picos, los cuales hacen referencia a los iones Cl⁻ y Na⁺ presentes en la muestra y cuyas áreas proporcionan los valores de concentración de cada uno.

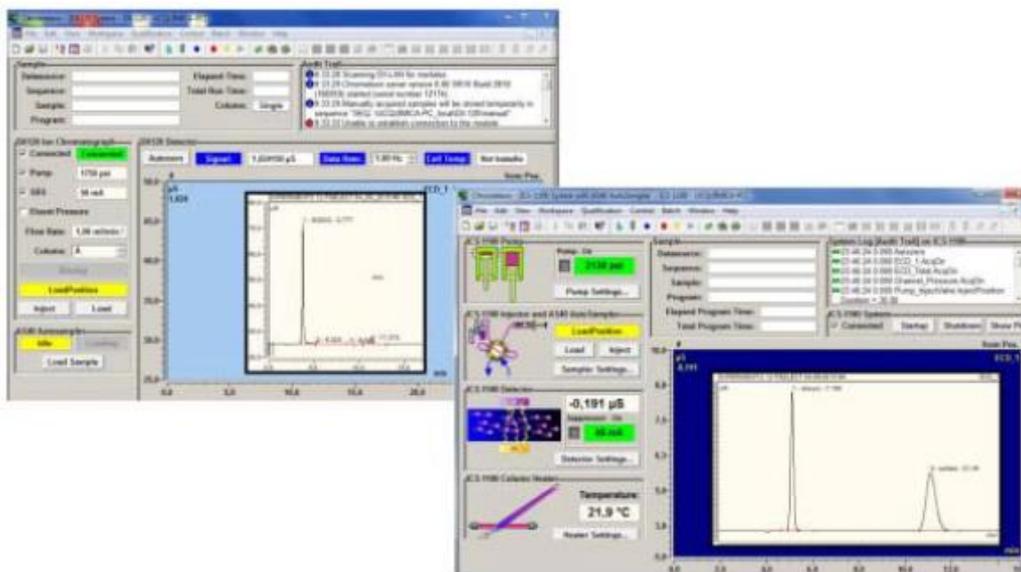


Figura 16. Capturas de pantalla del programa Chromeleon.

2.3 Reactivos y materiales

Para el desarrollo de este proyecto se empleó cloruro sódico (NaCl), hidróxido de sodio (NaOH) de concentración 0,1 M (Scharlau) y en forma de pellets (Scharlau), ácido clorhídrico (HCl) 0,1 M (Panreac); 2 M (Scharlau) y al 37% (Panreac) y fenolftaleína (Panreac).

Los eluyentes utilizados para realizar las cromatografías fueron ácido metanosulfónico y carbonato sódico. Además, se empleó Helio (Air liquide) con una pureza del 99,99% con el fin de desgasificar el eluyente en el cromatógrafo DX-120.

Los reactivos NaCl, HCl 0,2 M y NaOH en forma de pellets fueron utilizados para la preparación de las disoluciones con la concentración requerida. Mientras que, el HCl 0,1 M y el NaOH 0,1 M se emplearon en las valoraciones ácido-base junto con el indicador químico fenolftaleína. La disolución de HCl al 37% se utilizó para la preparación de disoluciones de mayor concentración.

Para el calibrado y medida del pH fueron necesarios patrones de calibrado de la casa Crison de pH 4,01; 7 y 9,21 y conductividad 12,88; 80,4 y 111,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Por último, se empleó agua desionizada de una unidad Elix (Millipore) para la preparación de las disoluciones y limpieza del material utilizado.

2.4 Procedimiento experimental

En este apartado se recogen los experimentos llevado a cabo a lo largo del desarrollo del presente TFG. Se describirán los fundamentos de operación del sistema EDBM en continuo y los ensayos realizados para la determinación de las resistencias ofrecidas por el sistema.

2.4.1 Diseño experimental

Con el fin de alcanzar los objetivos específicos de este TFG se realizaron dos experimentos en continuo cuyas condiciones de operación se encuentran recogidas en la Tabla 9.

Tabla 9. Concentraciones iniciales y caudales de las bombas peristálticas.

	NaCl	NaOH	HCl	Electrodo
Concentraciones iniciales	0,5 M	1,5 M	1 M	0,5 M
Caudales peristálticas	2 ml/min	1 ml/min	1 ml/min	-
Concentraciones peristálticas	1 M	0,1 M	0,1 M	-

Se decidió trabajar con estos valores de concentración por ser iguales a las alcanzadas en el equilibrio del ensayo en discontinuo [18], en el caso del NaCl la concentración elegida fue de 0,5 M ya que a partir de este valor sería posible verter al medio sin provocar efectos negativos en él. La estimación realizada para seleccionar los caudales de las bombas peristálticas fue obtenida de la misma fuente bibliográfica.

En ambos casos la configuración de la celda sigue el esquema -CABCC+ como se muestra en la Figura 17.

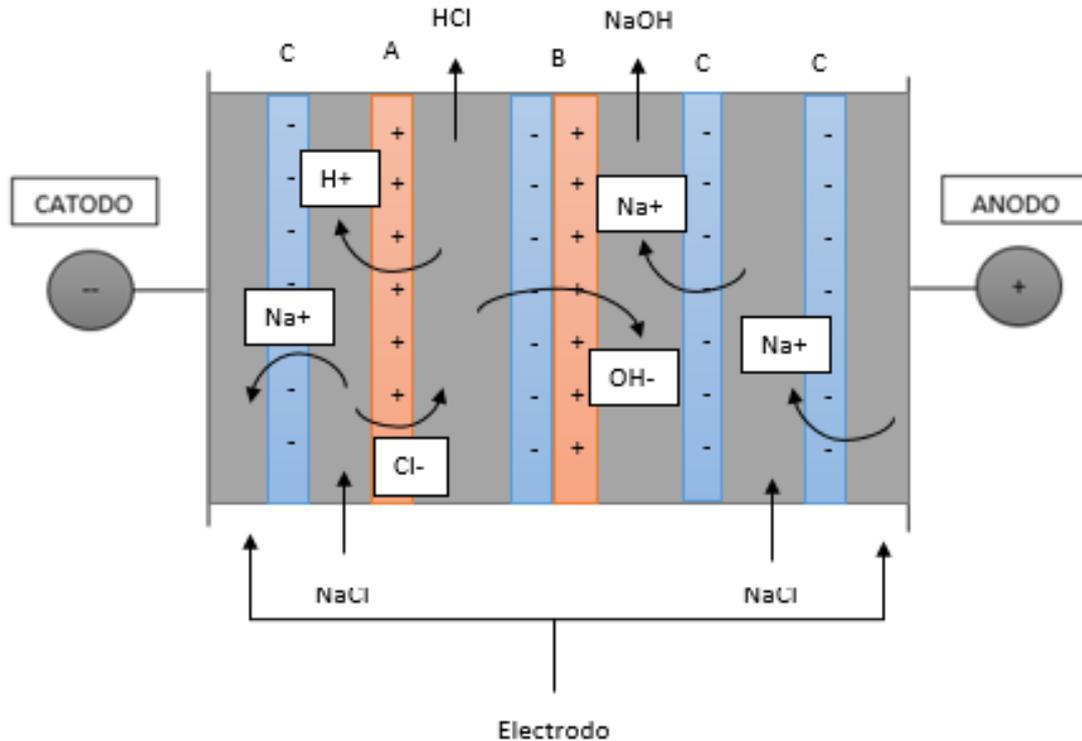


Figura 17. Esquema de la configuración de la celda de electrodiálisis.

En los experimentos las disoluciones son bombeadas hacia el interior de la celda desde los tanques donde se encuentran almacenadas, gracias a un conjunto de bombas peristálticas que impulsan los fluidos.

Dentro de la celda, la acción de las membranas, los espaciadores y la densidad de corriente aplicada provocan la disociación de las moléculas de agua, que posteriormente serán recombinadas con los iones cloruro y sodio procedentes de la alimentación.

Como consecuencia del transporte de iones Na^+ y Cl^- a través de la membrana la alimentación se va empobreciendo a lo largo del desarrollo del experimento a la vez que los productos ven aumentada su concentración hasta llegar a un valor constante, es por ello por lo que la alimentación es regenerada a través de una bomba peristáltica mientras que la disolución empobrecida sale del tanque por rebosadero.

Con otra bomba, se introducen las disoluciones 0,1 M de HCl y NaOH en los tanques para formar los productos. Una vez que el ácido y la base son producidos son enviados a un bidón de mayor tamaño.

Con el fin de mantener el balance de Na^+ se utilizó una disolución electrolítica de NaOH 0,5 M, aunque no es previsible que interfiera en el proceso y únicamente se recircula constantemente.

2.4.2 Experimentos EDBM en continuo alimentados con fuente de potencia

En este experimento la fuente de alimentación de la instalación comercial suministra la corriente necesaria para llevar a cabo el proceso en condiciones galvanostáticas, con una densidad de corriente de 250 A/m^2 . La duración del experimento consta de un total de 30 horas.

2.4.3 Experimentos EDBM en continuo alimentados con simulador solar

En esta ocasión se utilizó un simulador solar con el fin de suministrar a la instalación la corriente necesaria. Como se ha explicado en apartados anteriores, el uso de un simulador requiere un perfil de irradiancia-temperatura para generar dicha potencia, en este caso el escenario recreado fue un día del mes de julio en la provincia de Almería. La duración del experimento consta de un total de 30 horas.

3. RESULTADOS

En este apartado se procede al desarrollo de los correspondientes resultados que se han obtenido en los distintos experimentos realizados, con el fin de lograr el objetivo general propuestos en este TFG, y concretamente, los objetivos específicos de la caracterización y puesta a punto del simulador solar y la determinación de las resistencias con las que cuenta el sistema.

3.1 Caracterización del simulador solar “Solar Array Simulation Soft Panel 62020H-150S”

Como se ha comentado en apartados previos, en líneas de investigación anteriores se decidió utilizar los paneles solares situados en la azotea de la escuela como fuente de energía en el desarrollo de los experimentos. Sin embargo, en el presente TFG se propuso sustituir estos por un simulador solar por una serie de ventajas ya expuestas. Para ello, una vez realizada la puesta a punto de la instalación, se decidió realizar una serie de pruebas con el fin de caracterizar el simulador y conocer así la eficiencia resultante para comprobar que se aproximan a la obtenida con los paneles solares convencionales.

Para llevar a cabo dichas pruebas fueron utilizados perfiles de irradiancia-temperatura en los meses de enero y julio en las localidades de Santander y Almería. Los experimentos se realizaron con dos configuraciones diferentes de resistencias, en primer lugar, se dispuso un ladrillo con dos resistencias conectadas en serie con el fin de observar como varía la eficiencia al aumentar la resistencia al paso de la corriente. A continuación, se decidió repetir los experimentos, pero esta vez disminuyendo el valor de R colocando un total de siete resistencias en paralelo. En la Tabla 10 se recogen las pruebas realizadas.

Tabla 10. Condiciones de las pruebas realizadas.

Mes	Localización	Configuración de resistencias	Valor R equivalente (Ω)
Enero	Santander	2 en serie	9,4
		7 en paralelo	0,67
	Almería	2 en serie	9,4
		7 en paralelo	0,67
Julio	Santander	2 en serie	9,4
		7 en paralelo	0,67
	Almería	2 en serie	9,4
		7 en paralelo	0,67

En la pantalla del programa Chroma se puede observar como a medida que el tiempo del experimento avanza y recorre el perfil de irradiancia se van generando las curvas intensidad-voltaje y potencia-voltaje. Con los datos obtenidos y mediante la Ecuación 3 es posible obtener los valores de eficiencia. Siendo E_{ED} la energía inyectada al sistema, la cual se calcula como el área bajo la curva de la potencia aplicada P_{ED} . La potencia P_{ED} se define como el producto de la intensidad de corriente (I_{ED}) que atraviesa el sistema por el voltaje entre el cátodo y el ánodo (V_{ED}). Por último, el término E_{PV} hace referencia a la energía que llega a los módulos solares y es posible calcularla como el área bajo la curva de la irradiación solar (G).

Por tanto, la eficiencia energética se define como la relación entre la energía que es transformada en electricidad respecto a la energía que llega al sistema.

El cálculo de las integrales se realizó mediante el teorema del trapecio compuesto.

$$\text{Eficiencia} = \frac{E_{ED}}{E_{PV}} = \frac{\int_{t=ti}^{t=tf} P_{ED} dt}{\text{Area} \cdot \int_{t=ti}^{t=tf} G dt} = \frac{\int_{t=ti}^{t=tf} I \cdot V dt}{\text{Area} \cdot \int_{t=ti}^{t=tf} G dt} \quad (\text{Ecuación 3})$$

La Figura 18 representa los perfiles de irradiación solar en los meses de enero y julio en las distintas localidades estudiadas.

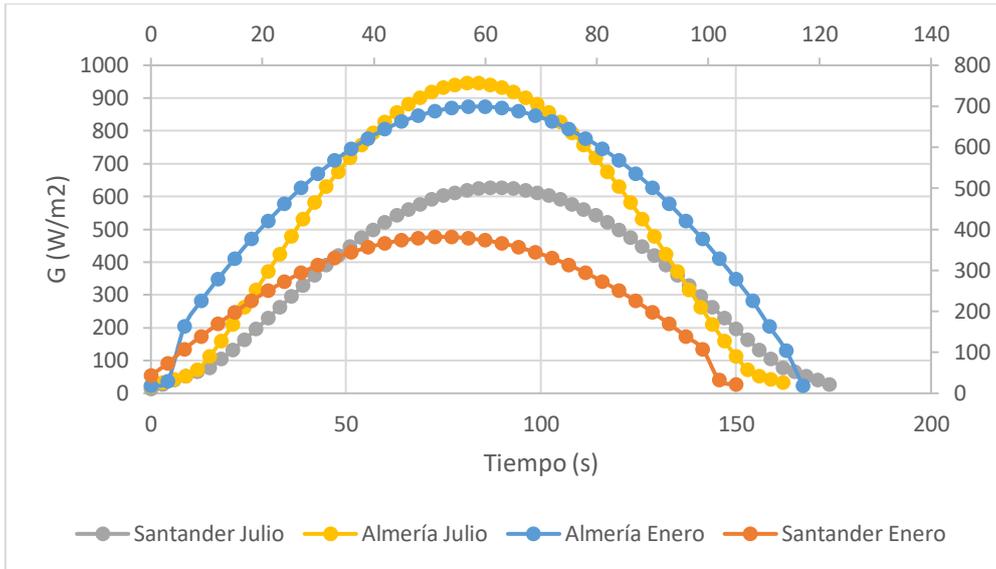


Figura 18. Perfiles de irradiancia frente al tiempo

Como se observa en el gráfico, los perfiles crecen hasta alcanzar un valor máximo, posteriormente, estos comienzan a disminuir a lo largo del tiempo. La diferencia tan significativa entre los perfiles se debe a dos factores, la meteorología y la localización. Estos parámetros determinan los perfiles de irradiancia, puesto que la localidad de Almería tiene mayor latitud que Santander el clima será más cálido y los valores de irradiación en consecuencia, serán más elevados a lo largo del tiempo.

En la Tabla 11 se muestran los valores de energía inyectada al sistema, la energía aportada por el simulador y la eficiencia energética obtenida.

Tabla 11. Valores medidos de eficacia.

			Energía inyectada (W)	Energía aportada (W)	Eficiencia (%)
Santander	Enero	2 serie	166	3083	5,38
		7 paralelo	311	3083	10,08
	Julio	2 serie	276	7047	3,91
		7 paralelo	966	7047	13,7
Almería	Enero	2 serie	223	6223	3,58
		7 paralelo	919	6223	14,76
	Julio	2 serie	288	9732	2,95
		7 paralelo	1411	9732	14,49

Como se puede observar en la Tabla 11, en los experimentos en los que la fuente se encuentra conectada al conjunto de 7 resistencias en paralelo, se obtienen los valores más altos de eficiencia ya que se ajusta mejor al punto de máxima potencia del panel seleccionado.

La eficiencia máxima que se puede obtener con los paneles fotovoltaicos instalados en la escuela es de un 14,2% [21]. En las condiciones del sistema utilizado, los valores de eficiencia obtenidos se sitúan en un rango entre 2,95-5,38% y 10,08-14,76% en función de la configuración empleada. Por tanto, ajustando el valor de la resistencia es posible mejorar la conversión de la energía incidente en energía inyectada.

3.2 Experimentos en continuo con fuente y con energía fotovoltaica obtenida a partir del simulador solar

Una vez se ha comprobado que ambas fuentes de energía pueden alcanzar una eficiencia máxima similar se procede a realizar dos experimentos, en primer lugar, utilizando la fuente de alimentación comercial y posteriormente con el simulador recreando el perfil de irradiancia correspondiente al mes de julio en Almería (Figura 19).

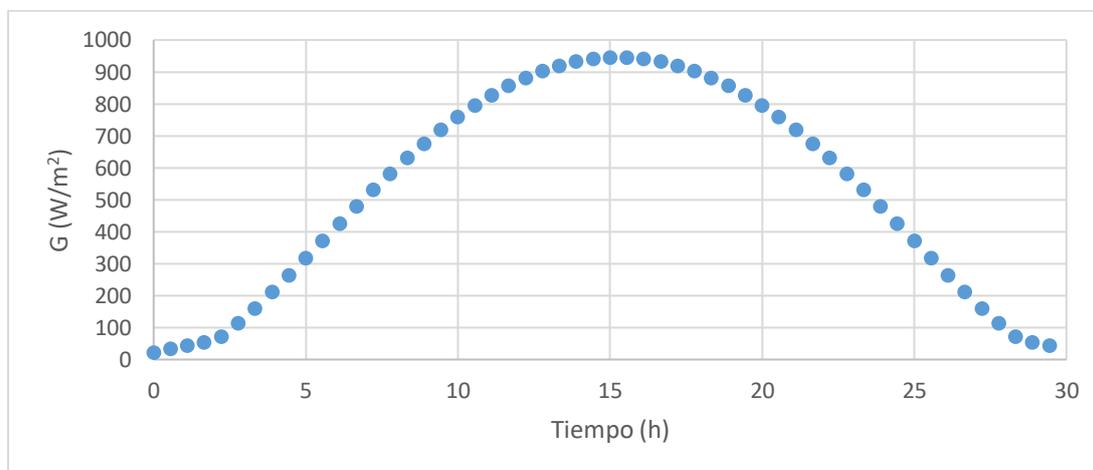


Figura 19. Perfil de irradiancia solar utilizado en el desarrollo de las pruebas.

En las pruebas realizadas con la fuente de alimentación del sistema comercial se decidió trabajar en condiciones galvanostáticas con un valor de intensidad fijo de 2,5 A, el óptimo para obtener un voltaje suficiente en la producción de ácido y base.

En dicho experimento se obtuvieron ácidos con una concentración alrededor de 1 M y bases en torno a 1,5 M (Figura 20). La concentración de la alimentación se mantiene aproximadamente constante salvando algunas fluctuaciones al inicio del experimento.

Sin embargo, la disolución de electrodo disminuyó tanto en volumen como en concentración debido a que esta no es regenerada y por tanto se va empobreciendo en iones sodio a lo largo del proceso.

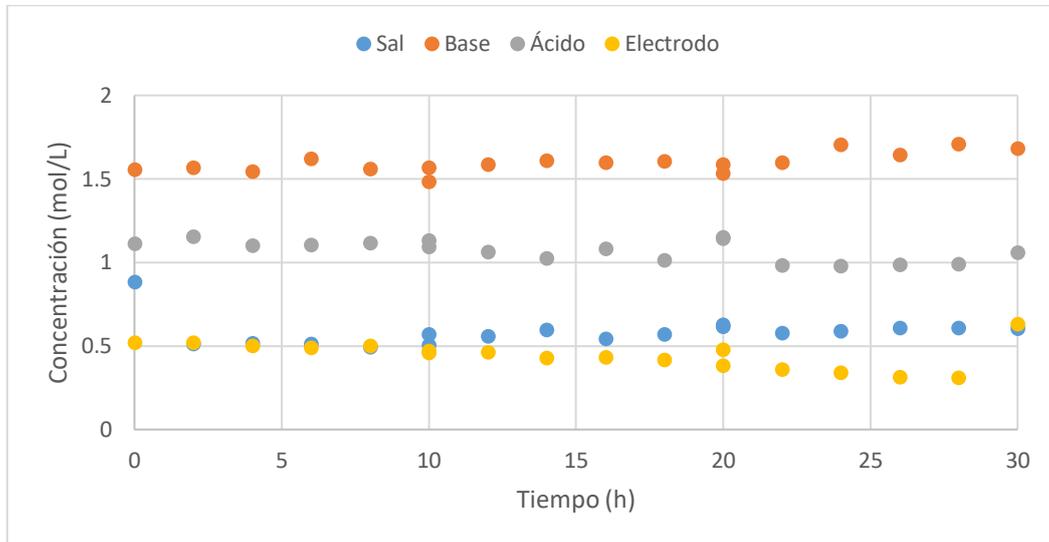


Figura 20. Evolución de la concentración de las distintas especies del sistema alimentado por la fuente comercial.

En el experimento realizado con el simulador solar, se obtuvieron ácidos y bases con una concentración de 1 M y 1,6 M respectivamente (Figura 21). Al igual que ocurría en el experimento con la fuente la concentración de la alimentación se mantuvo constante, apreciándose incluso menores variaciones que en el caso anterior. En cuanto a la disolución de electrodo, el valor de su concentración sufrió un fuerte descenso a medida que el experimento iba avanzando.

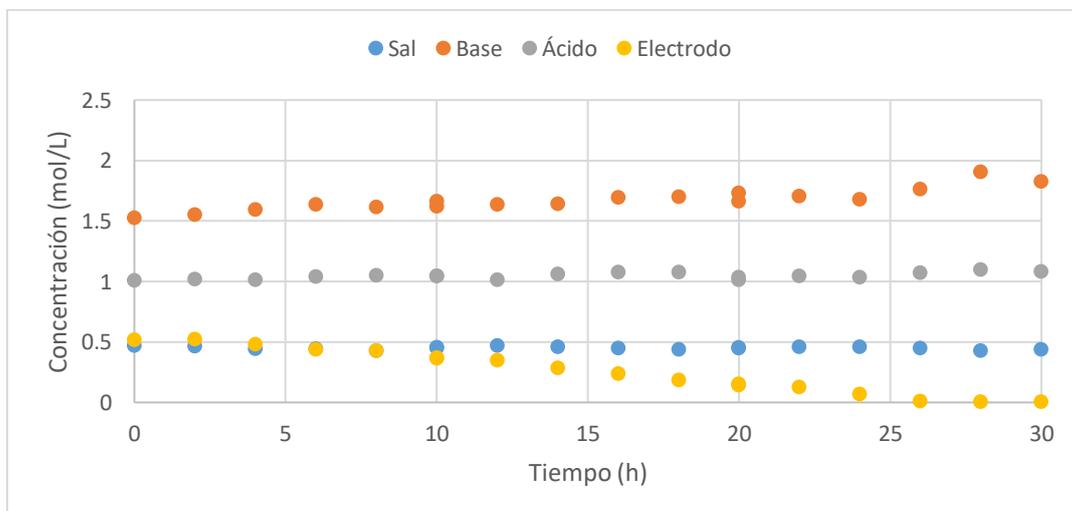


Figura 21. Evolución de la concentración de las distintas especies en el sistema alimentado por el simulador solar.

A la vista de estos resultados se puede afirmar que el sistema EDBM-PV es capaz de generar ácidos y bases mediante el uso de un simulador fotovoltaico. Sin embargo, es fundamental realizar un análisis de eficiencia energética para determinar la viabilidad económica del proceso.

Previamente es necesario distinguir entre la eficiencia del sistema, entendiendo esta como la transformación de la irradiación solar en energía eléctrica inyectada al sistema, y el consumo energético específico del sistema, el cual es independiente del origen de la electricidad.

La Tabla 12 recoge los valores de eficiencia obtenidos en las pruebas en las cuales se utilizó el simulador como fuente de energía y los obtenidos en estudios previos. Los cálculos seguidos para la obtención de estos valores se encuentran en el apartado 3.1.

Tabla 12. Eficiencias del sistema con energía fotovoltaica.

Experimento	Energía inyectada (kWh)	Energía recibida (kWh)	Eficiencia (%)
Irradiación solar simulada	1,51	23,50	6,42
Irradiación solar Santander, Mazon 2015	2,26	42,03	5,37

Como se puede apreciar el valor de eficiencia teórica obtenido con el simulador fotovoltaico está por encima del logrado en el experimento en el que se han utilizado los paneles solares, lo que puede ser debido a que se emplearon diferentes perfiles de irradiación y por tanto se operó con diferentes distancias al punto de máxima potencia. Por otra parte, en experimentos anteriores con diferentes condiciones de operación en los que se ha utilizado el simulador se han obtenido mayores eficiencias, por lo que en próximas investigaciones sería necesario mejorar el diseño de la conexión eléctrica con el objetivo de trabajar con valores de intensidad-voltaje más próximos al punto de máxima potencia de manera que se obtuvieran mayores valores de eficiencia.

Asimismo, para estimar el consumo energético se requieren los datos de energía inyectada (E_{ED}), la concentración media de salida (C_{ion}), el causal másico de ácido o base

producido (Q), la duración del experimento (t) y las masas moleculares del ion y producto (M).

La producción neta (p) es la cantidad total de ion que se obtiene durante un intervalo de tiempo. Se expresa como:

$$p = C_{ion} \cdot Q \cdot t \cdot M_{ion} \text{ (Ecuación 4)}$$

El consumo energético específico (ϵ_{esp}) se define como la cantidad de energía necesaria para producir una unidad de masa de producto. Se expresa como:

$$\epsilon_{esp} = \frac{E_{ED} \cdot M_{ion}}{p \cdot M_{producto}} \text{ (Ecuación 5)}$$

En las Tablas 13 y 14 se recogen los valores de energía inyectada al sistema, las concentraciones medias del ion sodio y cloro en la base y el ácido respectivamente, el caudal de producción, la densidad de corriente, la duración del proceso y el consumo específico expresado en función de la masa del ion y del producto.

Tabla 13. Estimación del consumo energético específico en la producción de bases con el sistema experimental EDBM alimentado por la fuente, los paneles y el simulador fotovoltaicos.

Experimento	Energía inyectada (kWh)	[Na ⁺] media (M)	Caudal producido (ml/min)	Base producida (kg Na ⁺)	Duración experimento (h)	Consumo específico (kWh/kgNa ⁺)	Consumo específico (kWh/kg NaOH)
Galvanoestático	0,57	1,49	1	0,081	30	7,03	4
Irradiación solar simulada	1,51	1,61	1	0,066	30	22,87	13,03
Galvanostático Mazón 2015	0,69	1,49	0,878	0,072	40	9,58	5
Irradiación solar Santander, Mazón 2015	2,26	1,51	0,878	0,073	40	30,95	18

Tabla 14. Estimación del consumo energético específico en la producción de ácidos con el sistema experimental EDBM alimentado por la fuente, los paneles y el simulador fotovoltaicos.

Experimento	Energía inyectada (kWh)	[Cl ⁻] media (M)	Caudal producido (ml/min)	Ácido producido (kg Cl ⁻)	Duración experimento (h)	Consumo específico (kWh/kgCl ⁻)	Consumo específico (kWh/kg HCl)
Galvanostático	0,57	0,87	1	0,07	30	8,14	7,43
Irradiación solar simulada	1,51	0,971	1	0,06	30	24,36	23,69
Galvanostático, Mazón 2015	0,69	1	0,940	0,08	40	9	8,4
Irradiación solar Santander, Mazón 2015	2,26	1,24	0,940	0,1	40	23	22,2

En las Figuras 22 y 23 se representan el consumo energético específico frente a la densidad de corriente aplicada tanto para el ácido como para la base producidos.

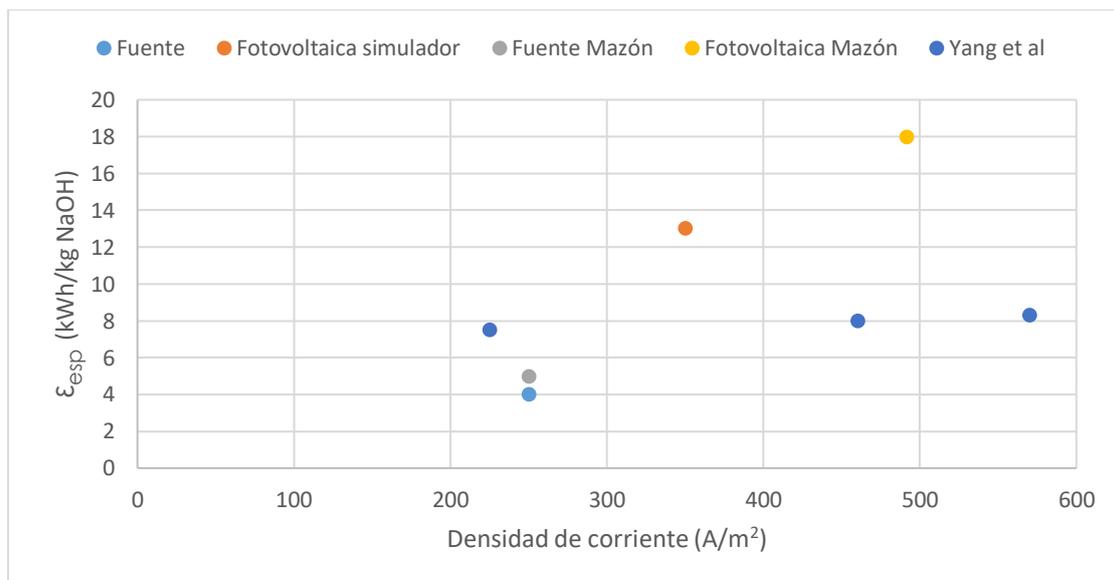


Figura 22. Representación del consumo energético específico de NaOH frente a la densidad de corriente aplicada.

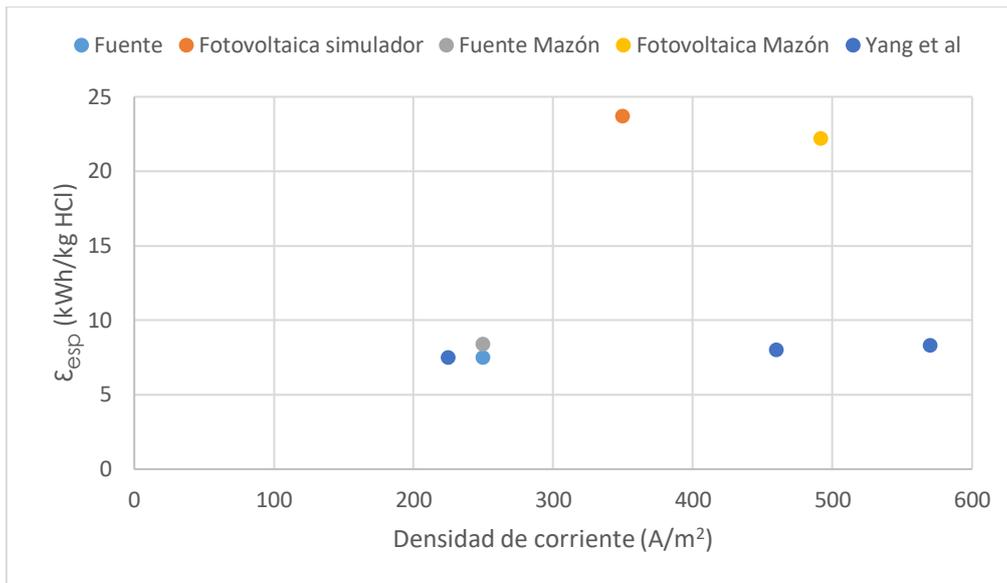


Figura 23. Representación del consumo energético específico de HCl frente a la densidad de corriente aplicada.

Observando ambos gráficos se llega a la conclusión de que al aumentar la densidad de corriente aplicada aumenta también el consumo energético específico. En ambos estudios, los experimentos realizados con la fuente se encuentran dentro del rango de 7,5-8,3 kWh/kg producto reportados en [23]. Sin embargo, las pruebas realizadas con energía fotovoltaica, tanto suministrada por el simulador como por los paneles solares, presentan una acusada pendiente al aumentar la densidad de corriente, es decir al aumentar dicha densidad el consumo aumenta notablemente ya que al sistema se aplica una corriente superior a la necesaria para los caudales establecidos. Por ello, en estudios posteriores sería necesario equilibrar el consumo, ajustando los caudales de las bombas a la densidad de corriente obtenida en los experimentos con energía fotovoltaica.

3.3 Determinación de la resistencia óhmica aparente ofrecida por el sistema

Una vez demostrada la capacidad del proceso alimentado por el simulador solar para generar ácidos y bases se procede a estudiar como varían los parámetros voltaje-intensidad durante el proceso. Ambos se relacionan mediante una expresión lineal expresada como [22]:

$$V = V_0 + I \cdot R \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde V e I son los datos registrados de voltaje-intensidad, V_0 el mínimo voltaje requerido para generar corriente y R la resistencia global del sistema. Es posible expresar

el valor de R como la suma, tanto, de la resistencia aportada por las membranas, la cual se encuentra especificada por el fabricante, como de la disolución, ya que el valor de R está influenciado por la conductividad de esta.

Una vez obtenidos los parámetros de ajuste de la ecuación lineal V_0 y R, es posible conocer, para una configuración diferente de stack, el voltaje generado introduciendo únicamente el valor de la densidad de corriente que se desea aplicar, con el fin de estimar el consumo energético generado.

Con el objetivo de cuantificar el valor de R global, se decidió calcular el valor de ambas resistencias para conocer, además, cuál de ellas tiene una mayor aportación (*Anexo*).

El experimento se llevó a cabo a cuatro concentraciones de NaCl diferentes, en ausencia de membranas utilizando únicamente las rejillas y los espaciadores. Las condiciones de operación de recogen en la Tabla 15.

Tabla 15. Concentraciones y número de espaciadores utilizados en el experimento.

Concentración disolución NaCl (M)	Número de espaciadores
0,1	8
	4
0,1398	8
	4
0,5	8
	4
1	8
	4

Una vez que el tanque se encuentra lleno de la disolución correspondiente de NaCl la fuente de potencia de la instalación suministra la corriente necesaria haciendo pasar la alimentación a través de la celda de electrodiálisis. El experimento se desarrolla variando el valor de la intensidad, primero cada 30 segundos y posteriormente cada 3 minutos, anotando el voltaje obtenido. Con ello es posible calcular la pendiente y la ordenada en el origen de la recta R vs $1/C$ (Tabla 16).

Tabla 16. Valores obtenidos del ajuste a la recta R vs $1/C$

Numero de espaciadores	Pendiente ($\Omega \cdot \text{mol}/\text{m}^3$)	Ordenada en el origen (Ω)
4	165	0,561
8	122	0,426

Estos datos se utilizarán posteriormente en los cálculos realizados para obtener el valor de la resistencia aportada por las disoluciones a través de la Ecuación 8.

$$Resistencia_i = a_{n,i} \cdot \frac{1}{C} + b_n \quad i = especie; n = compartimento \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde R_i es la resistencia ofrecida por cada disolución, C es la concentración de las disoluciones y $a_{n,i}$ y b_n son las constantes del ajuste lineal.

Por otra parte, la resistencia generada por las membranas utilizadas se calculó mediante la Ecuación 9.

$$R_{membranas} = R_S \cdot \left(\frac{\varepsilon_{max}}{S} \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde R_S es la resistencia específica, ε_{max} el espesor máximo en seco con unidades (m) y S el área de la membrana.

A partir de estas ecuaciones es posible obtener los valores de las resistencias ofrecidas por las membranas y las disoluciones y por tanto el valor global de R (Tabla 17) que junto con V_0 constituyen las constantes del ajuste lineal que relaciona la densidad de corriente aplicada con el voltaje generado (Tabla 18).

Tabla 17. Valores teóricos obtenidos de las distintas resistencias.

	R disolución (Ω)				R membranas (Ω)			R global (Ω)
	NaOH	Electrodo	NaCl	HCl	Aniónica	Catiónica	Bipolar	
Fotovoltaica	0,16	0,93	0,18	0,25	0,08	0,08	0,03	3
Fuente	0,16	0,33	0,16	0,25	0,08	0,08	0,03	1,76

Tabla 18. Parámetros del ajuste lineal a la recta V-I.

	V_0 (V)	R (Ω)
Fotovoltaica	2,38	3
Fuente	2,38	1,76

En vista a los resultados, el valor de la resistencia en los experimentos alimentados con energía fotovoltaica es ligeramente superior a los obtenidos con la fuente, como consecuencia de un descenso en la concentración de las disoluciones. Mientras que, en el experimento realizado con la fuente las concentraciones de todas las disoluciones se

mantuvieron aproximadamente constantes en las pruebas realizadas con el simulador la disolución del electrodo sufrió un fuerte descenso en su concentración, disminuyendo por tanto la cantidad de electrolitos presente provocando mayor oposición al paso de la corriente y por tanto un aumento de la resistencia.

Por otra parte, una vez obtenidas las constantes del ajuste lineal de la ecuación V-I es posible determinar los valores de voltaje simulado, para posteriormente ser comparados con los valores obtenidos de forma experimental (Figuras 24 y 25).

Figura 24. Comparativa entre el voltaje experimental y los valores teóricos obtenidos de voltaje simulado en el experimento alimentado con energía fotovoltaica.

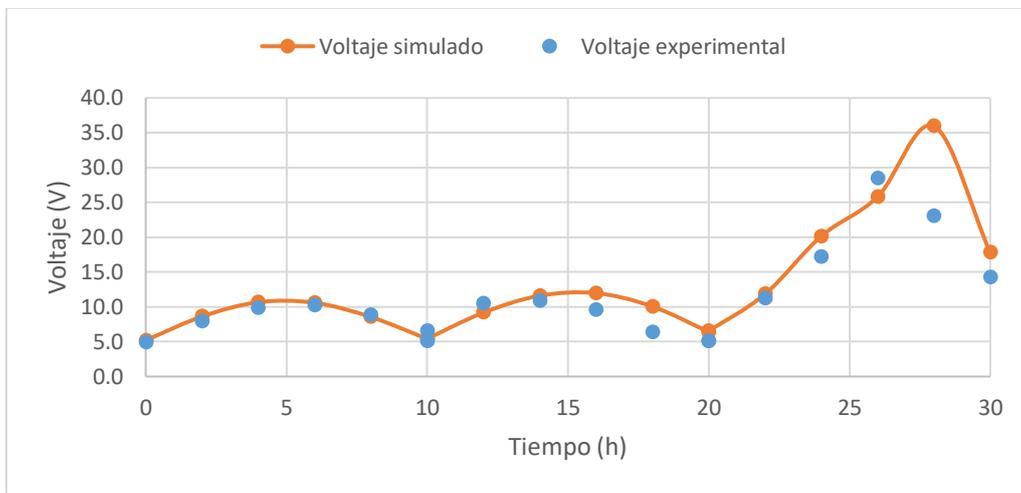
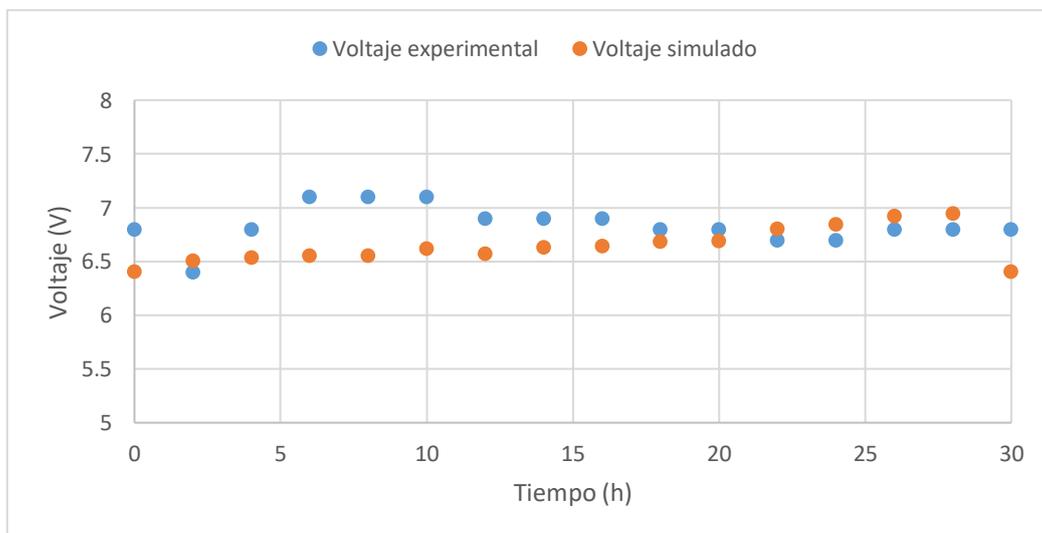


Figura 25. Comparativa entre el voltaje experimental y los valores teóricos obtenidos de voltaje simulado en el experimento alimentado por la fuente.



Como se observa en los gráficos, en el experimento de fotovoltaica, los datos de voltaje obtenidos de forma teórica se ajustan de forma correcta a los obtenidos experimentalmente como demuestra el valor de RMSE (root-mean-square-deviation) en las 10 primeras horas (Tabla 19). Sin embargo, transcurridas estas 10 horas, los puntos simulados se encuentran cada vez más alejados de los experimentales, por lo que el RMSE aumenta, luego el modelo no es capaz de explicar totalmente la variación del voltaje simulado. Esto puede deberse a la existencia de variables que influyen en el proceso, las cuales no ha sido posible abordar con el modelo actual y por tanto será necesario estudiar en investigaciones posteriores.

Sin embargo, en las pruebas realizadas con la fuente el RMSE toma un valor de 0,32, por lo que los valores pronosticados se encuentran más próximos a los observados, es decir el modelo explica mejor el comportamiento que sigue el voltaje simulado.

Tabla 19. Medida del RMSE obtenido por tramos horarios

	De 0 a 10 h	De 10 a 20 h	De 20 a 30 h
RMSE	0,69	1,97	5,71

4. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE INVESTIGACION

Partiendo de los antecedentes desarrollado por el grupo de investigación Ingeniería de Procesos Sostenibles del Departamento de Ingeniería Química y Biomolecular de la Universidad de Cantabria, en el presente TFG se abordan aspectos tales como la contribución a la mejora energética de los procesos de producción de ácidos y bases a partir de concentrados de desalación mediante tecnología EDBM. En este trabajo, se ha demostrado la capacidad de una celda de EDBM conectada directamente a un simulador de paneles fotovoltaicos para la generación de ácidos y bases.

Inicialmente, se abordó la caracterización del simulador fotovoltaico con el fin de determinar los valores de eficiencia, demostrando la suficiencia del simulador para recrear distintos escenarios en cuanto a la localidad y las condiciones climatológicas deseadas. Además, se determinó la relación entre los parámetros voltaje e intensidad del sistema a través de la resistencia global observada, pudiendo caracterizar y determinar el valor de la misma.

En relación a los objetivos específicos planteados y las tareas realizadas, los resultados expuestos anteriormente permiten alcanzar las siguientes conclusiones:

- ✚ Los paneles fotovoltaicos reales utilizados en investigaciones anteriores fueron sustituidos por un simulador solar fotovoltaico, el cual fue incorporado correctamente al sistema de EDBM. Las pruebas utilizando diferentes perfiles de irradiación y configuraciones de resistencias fueron realizadas con éxito obteniendo valores de eficiencia en el rango de 3,0-14,8%, siendo el máximo para los paneles reales seleccionados del 14,2%.
- ✚ Se ha demostrado la capacidad técnica del sistema integrado EDBM-PV alimentado por el simulador para generar ácidos y bases con una concentración de 1 M HCl y 1,6 M NaOH operando en continuo durante un periodo de 30 horas.
- ✚ En cuanto a las consideraciones energéticas, se obtuvieron valores de eficiencia de transformación de la energía incidente simulada de 6,4%. Además, se comprobó que el consumo energético específico aumenta al incrementar la densidad de corriente. En las pruebas de referencia realizadas con la fuente de potencia con corriente constante, el consumo se sitúa en el rango de 7,5-8,5

kWh/kg de HCl producto, similar al reportado en bibliografía [23]. Sin embargo, en el experimento realizado con el simulador, los consumos aumentan su valor notablemente ya que la densidad de corriente aplicada es superior a la necesaria para los caudales que se han fijado.

- ✚ En relación a la capacidad técnica del sistema, se estableció en ambos experimentos una relación lineal entre los parámetros voltaje e intensidad. Además, se realizó una estimación del valor de las distintas resistencias que integran el sistema, obteniendo un valor de R global de 3Ω en el experimento con el simulador y de $1,76 \Omega$ en las pruebas realizadas con la fuente de potencia. Esta diferencia se debe fundamentalmente a la pérdida de conductividad en el compartimento de electrolito.

En base a las conclusiones de este TFG, se plantean las siguientes futuras líneas de investigación:

- ✚ En relación a la operación de una planta de EDBM asistida con energía solar fotovoltaica:
 - Mejora en la capacidad técnica del simulador con el fin de aumentar el valor de eficiencia obtenido.
- ✚ En relación al desarrollo de la tecnología EDBM-PV alimentado por el simulador para la generación de ácidos y bases en continuo:
 - Incorporación del simulador fotovoltaico al sistema EDBM con el fin de utilizar concentrados reales de desalación como alimentación.
 - Ajustar la densidad de corriente aplicada a los caudales con el fin de reducir el consumo energético específico.

5. ANEXO

Con el fin de estimar el valor de la resistencia global (R_{global}) del sistema se han realizado los cálculos recogidos en este anexo. Siendo R_{global} :

$$R_{global} = R_{membranas} + R_{disolución} \quad (\text{Ecuación 11})$$

$$R_{disolución} = 2 \cdot R_{NaCl} + R_{HCl} + R_{NaOH} + 2 \cdot R_{electrodo} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Donde, $R_{membranas}$: resistencia generada por las membranas que conforma el stack;

$R_{disolución}$: resistencia aportada por las disoluciones presentes en el experimento.

En primer lugar, se procede a conocer el valor de $R_{disolución}$ mediante la ecuación 13:

$$R_i = a_{i,n} \cdot \frac{1}{C} + b_n \quad i = \text{especie}; n = n^{\circ} \text{ de espaciadores} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Donde, $1/C$: inverso de la concentración de la disolución a lo largo del experimento; $a_{i,n}$: constante del ajuste lineal que depende tanto de la especie como del número de compartimentos; b_n : constante del ajuste lineal que depende únicamente del número de compartimentos.

Las concentraciones de las disoluciones se calcularon como un promedio entre la concentración de los elementos que forman cada compuesto.

Posteriormente, se procedió a realizar los cálculos necesarios para la estimación de las constantes a y b mediante las ecuaciones 14 y 15.

$$a_{i,n} = (L \cdot m_1 + b_1) \cdot \left(\frac{a_i}{a_{NaCl}} \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

$$b_n = L \cdot m_2 + b_2 \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde, L: número de espaciadores; $m_1, b_1, m_2, b_2, a_i, a_{NaCl}$: constantes de los ajustes realizados.

El cálculo de m_1, b_1, m_2, b_2, a_i y a_{NaCl} se llevó a cabo a partir de los datos obtenidos en el experimento realizado en ausencia de membranas descrito en el apartado 3.3. Los

parámetros a_i y a_{NaCl} corresponden a la pendiente de la recta conductividad-concentración.

$$\lambda = a_i \cdot C \quad (\text{Ecuación 16})$$

Siendo, C: concentración de las disoluciones de NaCl utilizadas en el experimento.

Por último, las constantes m_1 , m_2 , b_1 y b_2 corresponde a la pendiente y la ordenada en el origen, respectivamente, de la recta resistencia-inverso de concentración para las configuraciones de 4 y 8 espaciadores.

$$R_{4\ esp} = m_{4\ esp} \cdot \frac{1}{C} + b_{4\ esp} \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$R_{8\ esp} = m_{8\ esp} \cdot \frac{1}{C} + b_{8\ esp} \quad (\text{Ecuación 18})$$

$$m_{4,8\ esp} = m_1 \cdot N + b_1 \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$b_{4,8\ esp} = m_2 \cdot N + b_2 \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde, C: concentración de las disoluciones de NaCl; N: número de espaciadores.

Conocidos todos los parámetros que conforman la ecuación 12, es posible calcular el valor de la resistencia generada por las disoluciones.

Por otra parte, la resistencia generada por las membranas viene dada por la ecuación 21:

$$R_m = R_s \cdot \left(\frac{\varepsilon_{max}}{S} \right) \quad (\text{Ecuación 21})$$

Donde, R_s resistencia específica; ε_{max} : espesor máximo en seco; S: superficie de la membrana.

La configuración de la celda consiste en la utilización de 3 membranas catiónicas, una membrana aniónica y otra bipolar, por tanto:

$$R_{membranas} = 3 \cdot R_{catiónica} + R_{aniónica} + R_{bipolar} \quad (\text{Ecuación 22})$$

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] OMS/UNICEF (Organización mundial de la salud/Fondo de naciones unidas para la infancia). 2015. *Progresos en materia de saneamiento y agua potable: informe de actualización 2015 y evaluación del ODM*. Suiza. ISBN 978 92 4 350914 3.
- [2] Charcosset, C. 2009. A review of membrane processes and renewable energies for desalination. *Desalination*, **245**, pp.214-231.
- [3] World Water Council:
(<http://www.worldwatercouncil.org/es/noticias/noticias/article/2050-water-supplies-to-dwindle-in-parts-of-the-world-threatening-food-security-and-livelihoods/>)
- [4] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). 2016. *Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo 2016: Agua y Empleo*. París, UNESCO.
- [5] International Desalination Association. 2017. [Consulta: 10 abril 2017]. Disponible en: <http://idadesal.org/>
- [6] *BP Energy Outlook 2016 edition*. Disponible en:
<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>
- [7] *World Energy Resources*. 2013. World Energy Council. ISBN: 978-0-946121-29-8.
- [8] Fernandez-Gonzalez, C; Dominguez-Ramos, A; Ibañez. R; Irabien. A. 2015. Sustainability assessment of electro dialysis powered by photovoltaic solar energy for freshwater production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **47**, pp.604-615.
- [9] García-Rodríguez, L. 2003. Renewable energy applications in desalination: state of the art. *Solar energy*, **75**, pp.381-393.
- [10] Ortega Delgado, B. 2013. *Modelado de un sistema de desalación de agua de mar basado en la tecnología de destilación multiefecto con alimentación en serie*. García Rodríguez. L, directora. Trabajo de fin de master, Universidad de Sevilla.

- [11] Marder, L; Moura Bernardes, A; Zoppas Ferreira, J. 2004. *Cadmium electroplating wastewater treatment using a laboratory-scale electro dialysis system*. Separation and Purification Technology, **37**, pp. 247–255.
- [12] Gutiérrez López, B. 2012. *Recuperación de energía de la salmuera*. A, Hernández Muñoz (dir.) Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.
- [13] Pérez, A; Urtiaga, A.M.; Ibáñez, R; Ortiz, I. 2012. State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates. *Water Research*; **46**, pp. 267-283.
- [14] Tongwen, X. 2002. Electro dialysis processes with bipolar membranes (EDBM) in environmental protection-a review. *Resources, Conservation and Recycling*, **37**, pp. 1-22.
- [15] Muñoz Rodríguez, B. 2016. *Estudio del comportamiento de membranas aniónicas modificadas para la valorización de salmueras de desalación mediante un proceso de electrodiálisis con membranas bipolares*. Ibáñez Mendizábal, R; Domínguez Ramos, A. Trabajo fin de grado, Universidad de Cantabria.
- [16] Bayod Rujula, A.A. 2009. *Sistemas Fotovoltaicos*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-92521-94-4.
- [17] EUROPEAN COMMISSION. 2012. *Joint Research Center: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Disponible en: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- [18] Mazón Reigadas, A. 2015. *Mejoras técnicas y energéticas en una planta de electrodiálisis asistida por membranas bipolares (EDBM) para la producción en continuo de ácidos y bases*. Ibáñez Mendizábal, R; Domínguez Ramos, A. Trabajo fin de grado, Universidad de Cantabria.
- [19] Liu, T; Sheu, H; Tseng, C. 2013. Environmental Impact Assessment of Seawater Desalination Plant Under the Framework of Integrated Coastal Management. *Desalination*, pp. 326: 10-18.

- [20] Domínguez, A; Irabien, A; Aldaco, R. 2010. *Electro-oxidación solar fotovoltaica (ESOF) de aguas residuales con carga orgánica*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria.
- [21] Dominguez, A; Aldaco, R; Irabien, A. 2010. Photovoltaic solar electrochemical oxidation (PSEO) for treatment of lignosulfonate wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, **85**(6), pp. 821-830.
- [22] Yang, Y; Gao, X; Fan, A; Fu, L; Gao, C. 2014. An Innovative Beneficial Reuse of Seawater Concentrate using Bipolar Membrane Electrodialysis. *Journal of Membrane Science*, **449**, pp. 119-126.