Cartera de investigación y desarrollo sobre desalinización de energía marina del NREL

Preprint

S. Jenne,[1] S. Gore,[2] and K. Sitterley[1]

1 National Renewable Energy Laboratory
2 U.S. Department of Energy Water Power Technologies Office

Presented at the Pan-American Marine Energy Conference (PAMEC)
Baranquilla, Colombia
January 22–24, 2024

NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy
Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
Operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) at www.nrel.gov/publications.

Contract No. DE-AC36-08GO28308

Conference Paper
NREL/CP-5700-88483
February 2024

Cartera de investigación y desarrollo sobre desalinización de energía marina del NREL

Preprint

S. Jenne,[1] S. Gore,[2] and K. Sitterley[1]

1 National Renewable Energy Laboratory
2 U.S. Department of Energy Water Power Technologies Office

Suggested Citation
Jenne, S., S. Gore, and K. Sitterley. 2024. *Cartera de investigación y desarrollo sobre desalinización de energía marina del NREL: Preprint*. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/CP-5700-88483. https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/88483.pdf.

NREL is a national laboratory of the U.S. Department of Energy
Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
Operated by the Alliance for Sustainable Energy, LLC

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) at www.nrel.gov/publications.

Contract No. DE-AC36-08GO28308

Conference Paper
NREL/CP-5700-88483
February 2024

National Renewable Energy Laboratory
15013 Denver West Parkway
Golden, CO 80401
303-275-3000 • www.nrel.gov

NOTICE

This work was authored in part by the National Renewable Energy Laboratory, operated by Alliance for Sustainable Energy, LLC, for the U.S. Department of Energy (DOE) under Contract No. DE-AC36-08GO28308. Funding provided by U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy Water Power Technologies Office. The views expressed herein do not necessarily represent the views of the DOE or the U.S. Government. The U.S. Government retains and the publisher, by accepting the article for publication, acknowledges that the U.S. Government retains a nonexclusive, paid-up, irrevocable, worldwide license to publish or reproduce the published form of this work, or allow others to do so, for U.S. Government purposes.

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory (NREL) at www.nrel.gov/publications.

U.S. Department of Energy (DOE) reports produced after 1991 and a growing number of pre-1991 documents are available free via www.OSTI.gov.

Cover Photos by Dennis Schroeder: (clockwise, left to right) NREL 51934, NREL 45897, NREL 42160, NREL 45891, NREL 48097, NREL 46526.

NREL prints on paper that contains recycled content.

Cartera de investigación y desarrollo sobre desalinización de energía marina del NREL

S. Jenne,[1] S. Gore,[2] and K. Sitterley[1]

1. Laboratorio Nacional de Energías Renovables: Golden, CO
2. Oficina de Tecnologías de Energía Hidráulica del Departamento de Energía de Estados Unidos: Washington, D.C.

***Palabras clave: desalinización*, análisis, modelización, creación de prototipos, implantación**

I. Introducción

El Laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), en colaboración con la Oficina de Tecnologías de Energía Hidráulica (WPTO) del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos, ha desarrollado un enfoque único de I+D para avanzar en la desalinización mediante energía marina. La desalinización es una inversión fundamental dentro de la cartera Powering the Blue Economy™ de WPTO (Oficina de Tecnologías de la Energía con Agua) [1], y fue la primera inversión realizada en este portafolio. La desalinización de energía marina del NREL abarca estudios de viabilidad tecnoeconómica, modelización numérica y pruebas de laboratorio a nivel de componentes y subsistemas, así como el desarrollo del convertidor de energía de las olas por ósmosis inversa hidráulica y eléctrica (HERO WEC) . Este enfoque multicapa permite un innovador bucle de retroalimentación en el que los datos y las lecciones aprendidas de los experimentos de laboratorio y de campo se utilizan para perfeccionar las herramientas de modelización y las técnicas de análisis, priorizar las actividades de otros años y refinar las direcciones estratégicas dentro de NREL y en toda la cartera de WPTO. El objetivo principal de la investigación dirigida por el NREL es identificar las principales barreras asociadas a la comercialización de la desalinización por energía de las olas y desarrollar soluciones que puedan ser adoptadas por la industria de la energía marina. Cabe señalar que, si bien la cartera de energías marinas de WPTO incluye las olas, las mareas, las corrientes oceánicas, los gradientes térmicos y los gradientes de presión, la mayor parte del trabajo sobre desalinización de energías marinas se ha centrado en la desalinización con energía undimotriz. Paralelamente, estas actividades de I+D pueden contribuir a informar la asistencia técnica y el apoyo a las tecnologías de la industria y del mundo académico. Estas dos áreas contribuyen a construir un enfoque común de la comunidad de resolución de problemas, al mismo tiempo que identifican a los principales interesados, agencias gubernamentales y otras organizaciones fuera del sector marino que serán necesarias para desarrollar una industria sólida.

II. Métodos

La participación inicial del equipo del NREL en la desalinización por energía marina comenzó con un estudio de viabilidad tecnoeconómica de la desalinización por energía de las olas a escala de producción municipal de agua [2]. Este estudio pretendía arrojar luz sobre si la desalinización sería un uso final adecuado para la energía marina dados los objetivos fijados por el DOE. Antes de este análisis, WPTO había financiado un pequeño número de tecnologías de desalinización impulsadas por las olas lideradas por la industria. Sin embargo, la mayor parte de la financiación que se ha distribuido a través de la Oficina de Eficiencia Energética y Energías Renovables del DOE se ha centrado en descarbonizar la red eléctrica. Por ejemplo, la Oficina de Tecnologías de Energía Solar del DOE tiene como objetivo suministrar "hasta un teravatio de capacidad solar para 2035" a la red eléctrica [3]. La Oficina de Tecnologías de la Energía Eólica ha dado prioridad a

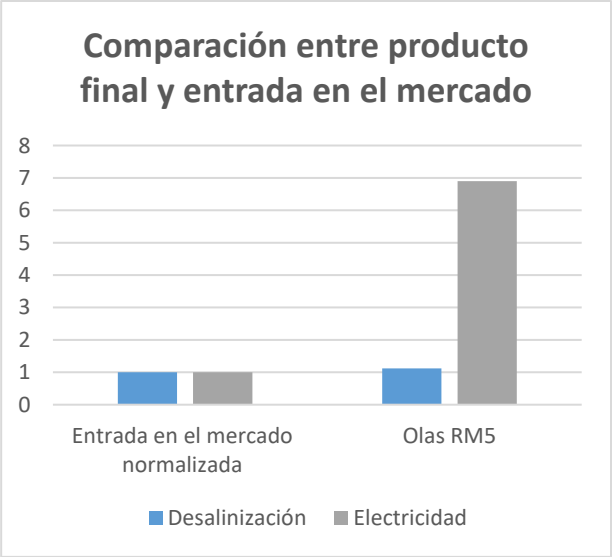

Fig. 1. Los primeros resultados tecnoeconómicos comparan un conjunto de energía de las olas que produce electricidad con un conjunto de WEC RM5 diseñados para la desalinización a gran escala, normalizados para cada entrada al mercado.

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory at www.nrel.gov/publications.

"proporcionar una gama completa de servicios de red, además de energía" [4]. Este énfasis en las tecnologías de red sentó un precedente para las tecnologías de energía marina, lo que limitó las oportunidades de inversión de los desarrolladores de tecnologías de energía marina. Esto era especialmente difícil porque las tecnologías marinas requerían un mayor desarrollo antes de que pudieran ser competitivas en costes con otras tecnologías renovables en el mercado de la red estadounidense. Por esta razón, la WPTO se propuso conocer otros mercados en los que la energía desempeña un papel importante en la economía del sistema; estos mercados podrían ofrecer oportunidades de desarrollo a corto plazo.

La desalinización era una oportunidad de gran valor estratégico para WPTO debido a las aplicaciones existentes en la industria de la energía marina, el gran consumo energético de las plantas desalinizadoras y la obvia ubicación conjunta del recurso energético con el de suministro de agua. El análisis de viabilidad inicial del NREL aprovechó el modelo de referencia 5 (RM5) del DOE convertidor de energía de las olas, un WEC de sobretensión oscilante [5]. RM5 se diseñó originalmente para aplicaciones de red, pero el análisis asumió que el sistema de generación de electricidad se eliminaría en favor de un sistema de desalinización por ósmosis inversa (OI). El análisis asumió un recurso de olas de California y un tamaño de matriz equivalente a la producción de la planta de desalinización de Carlsbad en San Diego, California [6]. De este análisis se desprende que el precio de venta de la electricidad producida por una tecnología similar a la RM5 que produjera electricidad para la red sería aproximadamente siete veces más caro que las tarifas eléctricas habituales [7], pero si la misma tecnología produjera agua desalada, el precio de venta sería menos de 1.5 veces el precio de venta actual [2]. La figura 1 compara los resultados normalizados del sistema de producción de electricidad conectado a la red y un sistema de producción de agua a escala municipal. Estos resultados eran prometedores, pero había varios supuestos que aún no se habían validado. Las suposiciones sobre el rendimiento de la membrana, los requisitos de prefiltración, la integración general del sistema, el mantenimiento y varias otras consideraciones críticas de diseño aún deben ser gestionadas para reducir los riesgos. No obstante, el análisis inicial demostró el valor de perseguir la desalinización como oportunidad de mercado y la presurización directa como vía tecnológica.

Fig 2. Instalación experimental de evaluación de membranas de ósmosis inversa del NREL (imagen: Joe DelNero, NREL)

La falta de hipótesis validadas representa un riesgo importante para los desarrolladores de tecnologías de energía marina que persiguen la desalinización. Para solucionar este problema, el NREL y el WPTO han adoptado una filosofía de I+D destinada a descubrir los obstáculos en lugar de abogar por un tipo de tecnología específico. Esta filosofía de I+D se basa en los principios de la ingeniería de sistemas, según los cuales todo sistema multidisciplinar debe concebirse, diseñarse y desarrollarse como una solución global [8]. Sin embargo, dado que muchas de las aportaciones del sistema a la energía marina se encuentran aún en una fase temprana de desarrollo, se utiliza un enfoque gradual para centrarse en las áreas de alto riesgo. Este enfoque incremental pretende comprender los retos técnicos específicos antes de proceder a una costosa integración del sistema. Por lo tanto, esta filosofía puede resumirse en (1) utilizar los principios de la ingeniería de sistemas para priorizar los retos y luego (2) evaluar los riesgos para determinar si hay que abandonar una oportunidad o abordar el siguiente riesgo. Un ejemplo de cómo se utiliza es el proyecto del NREL para cuantificar el rendimiento de las membranas en condiciones de funcionamiento transitorio.

El rendimiento de las membranas en funcionamiento transitorio es algo que la comunidad de desalinizadores ha ignorado en su mayor parte. Esto se debe en gran medida a que la mayoría de las plantas de ósmosis inversa funcionan a presión y caudal constantes por razones económicas. Si bien esto es adecuado para las plantas de ósmosis inversa conectadas a la red, mantener el funcionamiento en estado estacionario es poco práctico para muchos sistemas de ósmosis inversa alimentados por energías renovables, en particular los alimentados por energía de las olas. Por esta razón, la suposición que hizo el equipo de NREL fue que si las membranas no pudieran tolerar grandes variaciones en el flujo y la presión con frecuencias relativamente altas, la desalinización impulsada por las olas podría no ser viable debido al alto costo del almacenamiento. Si esta suposición fuera cierta, el dinero destinado a I+D probablemente se invertiría mejor en otra cosa. Por este motivo, el NREL fabricó un sistema de evaluación de membranas que se muestra en la figura 2 para caracterizar las membranas en estas condiciones. Los primeros experimentos fueron prometedores y la conclusión inicial fue que las membranas pueden soportar variaciones de caudal y presión mucho mayores que las recomendadas por los fabricantes de membranas [9]. Estos resultados sugieren no solo que las membranas comerciales de ósmosis inversa son adecuadas para aplicaciones de energía de las olas, sino también que los modelos lineales y de estado estable son apropiados para evaluar los diseños de ósmosis

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory at www.nrel.gov/publications.

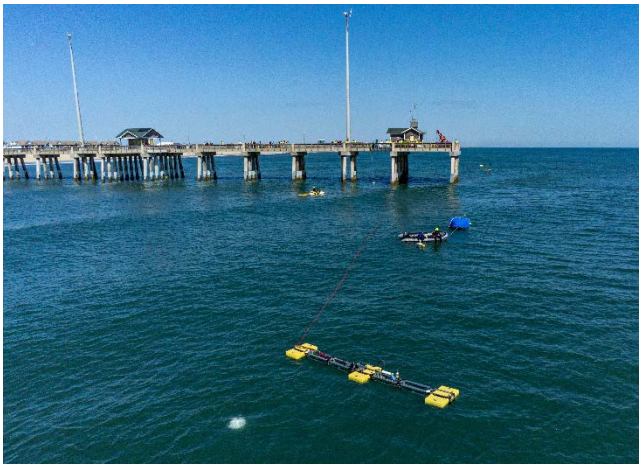

Fig. 3. Dos de los diseños de los competidores de W2W instalados en el muelle de Jennette, en Carolina del Norte (EE. UU.) (Crédito de la imagen: Josh Bauer, NREL)

inversa alimentados por convertidores de energía de las olas (WEC).

Paralelamente a la investigación y desarrollo de membranas, NREL y WPTO lanzaron el Premio Olas para Agua (Waves to Water Prize, W2W) en 2019[10]. W2W fue un premio de tres años de duración que incentivó el desarrollo de pequeños sistemas modulares de desalinización alimentados por el oleaje. Para reducir el riesgo del evento final que se muestra en la Figura 3, NREL también desarrolló el HERO WEC. Entre las tecnologías que desarrollaron los competidores del premio y el HERO WEC de NREL, se destacaron numerosas barreras técnicas como posibles áreas de I+D, entre ellas la prefiltration, la recuperación de energía, la electrónica de potencia, las instalaciones cercanas a la costa, el mantenimiento y la fiabilidad de los dispositivos. Un beneficio imprevisto del desarrollo del CME HERO fue el fortalecimiento de la colaboración entre los laboratorios nacionales de la OTMP y los concursantes del premio; se compartieron las lecciones aprendidas a medida que cada entidad trabajaba para resolver retos comunes. Ahora que el W2W ha terminado, el CME HERO se está aprovechando como un activo de I+D que permite al NREL y al WPTO centrarse sistemáticamente en estos retos. En agosto de 2022, se volvió a desplegar el CME HERO para establecer una base de referencia de algunos de los retos técnicos y logísticos conocidos. Para garantizar que no se pierdan los conocimientos adquiridos con estos esfuerzos, el diseño del CME HERO, los detalles de costos, los datos de laboratorio y despliegue y cualquier aprendizaje adicional se pondrán a disposición del público en un sitio web específico que podrá actualizarse a medida que se disponga de nueva información (https://openei.org/wiki/HERO-WEC).

Otro componente clave de la cartera de investigación y desarrollo de desalinización de NREL es la implementación de modelos numéricos para decisiones de diseño, análisis tecnoeconómico y planes experimentales. El desarrollo de modelos numéricos a medida ha sido fundamental para identificar hipótesis y cuantificar los riesgos asociados a la integración de la energía marina con las tecnologías de desalinización. Los modelos detallados permiten al equipo comprender qué parámetros requieren suposiciones y cuantificar el impacto de esas suposiciones en el rendimiento del sistema o en el potencial económico. El Simulador de Convertidores de Energía de las Olas (WEC-Sim) ha sido utilizado en la mayoría de los estudios de diseño y optimización realizados por NREL debido a su capacidad para modelar una amplia gama de tecnologías de convertidores de energía de las olas y trenes de potencia [11]. WEC-Sim es un software de código abierto desarrollado conjuntamente por NREL y Sandia National Laboratories que permite la simulación en el dominio del tiempo de convertidores de energía de las olas, sistemas de amarre, componentes del tren de potencia, controles y diseño de sistemas de ósmosis inversa. Debido a la naturaleza oscilatoria y transitoria de los CME, el acoplamiento de la hidrodinámica y la dinámica del tren motriz es fundamental para cuantificar los cambios de diseño antes de realizar costosos experimentos de laboratorio y despliegues en el océano.

III. RESULTADOS

Al vincular todas las áreas de investigación: análisis tecnoeconómico, desarrollo de prototipos y modelado numérico, el equipo puede refinar continuamente las suposiciones y proporcionar experiencia valiosa para los desarrolladores de tecnología existentes y futuros. Esta experiencia sirvió de base para el más reciente anuncio de oportunidades de financiación de WPTO centrado en la desalinización [12], cuyo objetivo es financiar demostraciones precomerciales de sistemas marinos de desalinización alimentados con energía. Se animó a los solicitantes a pedir ayuda al equipo HERO WEC del NREL para avanzar en las pruebas de componentes y sistemas con el objetivo de aprovechar los conocimientos existentes mediante la asistencia técnica. El objetivo de esta convocatoria es acercar los sistemas marinos de desalinización a la comercialización mediante la demostración de tecnologías en entornos reales. Además, NREL y WPTO esperan descubrir oportunidades de I+D de integración y avances técnicos a medida que se desplieguen las nuevas tecnologías y se difundan los datos.

De cara al futuro, el NREL seguirá colaborando estrechamente con la WPTO para priorizar la I+D que reduzca las barreras técnicas a la comercialización mediante análisis detallados, simulaciones, experimentos de laboratorio y despliegues en el océano cuando proceda. En concreto, el equipo se ha fijado las siguientes prioridades a corto plazo:

- Continuar con el desarrollo del CME HERO haciendo hincapié en el funcionamiento a largo plazo y la supervivencia del dispositivo. Esto incluirá pruebas de laboratorio más

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory at www.nrel.gov/publications.

sólidas en la plataforma de movimiento del NREL, que tiene seis grados de libertad.

- Realizar experimentos adicionales con membranas para cuantificar el impacto del flujo oscilatorio en la vida útil de las membranas y las actividades de mantenimiento.

- Aprovechar las lecciones aprendidas de los ensayos oceánicos para desarrollar las mejores prácticas para el funcionamiento marino de pequeños sistemas de desalinización por energía de las olas.

- Seguir perfeccionando los modelos tecnoeconómicos que se utilizarán para afinar la estrategia general de I+D y orientar la I+D y el desarrollo de la propiedad intelectual hacia la industria.

Además de llevar a cabo las tareas específicas mencionadas, el equipo del NREL seguirá comprendiendo el ecosistema tecnológico y desarrollando asociaciones estratégicas con la industria, el mundo académico y las partes interesadas de la comunidad que puedan beneficiarse de la integración de la desalinización marina.

REFERENCIAS

[1] U.S. Department of Energy , "Powering the Blue Economy: Exploring Opportunities for Marine Renewable Energy in Maritime Markets," U.S Department of Energy, Washington D.C., 2019.

[2] Y.-H. Yu and D. S. Jenne, "Analysis of a Wave-Powered, Reverse-Osmosis System and it's Economic Availability in the United States," in *36th Annual Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering* , Trondheim, Norway, 2017.

[3] U.S. Department of Energy Solar Energy Technology Office , "Solar Energy Technologies Office Multi-Year Program Plan," U.S. Department of Energy, 2021.

[4] U.S. Department of Energy Wind Energy Technology Office, "Wind Energy Technologies Office Multi-Year Program Plan," U.S. Department of Energy, 2020.

[5] Y.-H. Yu, D. S. Jenne, R. Thresher, A. Copping, S. Geerlofs and A. Hanna, "Reference Model 5 (RM5): Oscillating Surge Wave Energy Converter," National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2015.

[6] N. Voutchkov, "Chapter 4: Capital Costs," in *Desalination Project Cost Estimating and Management*, CRC Press, 2018, p. 248.

[7] U.S. Energy Information Administration , "Electric Power Annual 2021," U.S. Energy Information Administration, Washington, DC, 2022.

[8] D. Hitchins, "Systems Engineering Philosophy," in *Systems Engineering*, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2007, pp. 99-101.

[9] K. A. Sitterley, T. J. Cath, D. S. Jenne, Y.-H. Yu and T. Y. Cath, "Performance of reverse osmosis membrane with large feed pressure fluctuations from a wave-driven desalination system," *Desalination,* vol. 527, no. 115546, 2022.

[10] U.S Department of Energy, "Waves to Water Drink Stage Official Rules," September 2021. [Online]. Available: https://americanmadechallenges.org/challenges/wavestowater/Waves-to-Water_Prize_Official_Rules.pdf. [Accessed 1 June 2023].

[11] National Renewable Energy Laboraty and Sandia National Laboratories, "WEC-Sim (Wave Energy Converter SIMulator)," 2022. [Online]. Available: https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/dev/index.html. [Accessed 1 June 2023].

[12] U.S. Department of Energy, "Marine Energy Systems Innovation at Sea Funding Opportunity Announcement - Mod 0003," 21 Feb 2023. [Online]. Available: https://eere-exchange.energy.gov/FileContent.aspx?FileID=71876eb2-f50b-4321-bcd7-a52f6a13caa1. [Accessed June 2023].

This report is available at no cost from the National Renewable Energy Laboratory at www.nrel.gov/publications.