

Aprovechamiento de la Energía Undimotriz para la Desalinización de Agua de Mar: Una Solución Sostenible para la Escasez Hídrica en Estados Unidos

Harnessing Wave Energy for Seawater Desalination: A Sustainable Solution to Water Shortages in the United States

Recibido: 25, marzo 2025

Aceptado: 17, mayo 2025

Publicado

online: 01, agosto 2025

Como Citar:

Játiva Soto, R. A., & Povea Cedeño, F. (2025). Aprovechamiento de la Energía Undimotriz para la Desalinización de Agua de Mar: Una Solución Sostenible para la Escasez Hídrica en Estados Unidos. *Revista Digital Científica Causalidad (caui3)*, 1(2), 1-14. <https://doi.org/10.70929/caui3.v1i2.0011>

ISSN-e: 3073-1518

Creative Commons CC BY 4.0



Fabian Povea¹, Ricardo Játiva¹

Resumen:

La escasez de agua es una preocupación creciente en diversas regiones costeras de Estados Unidos, particularmente en California y Texas. Este artículo explora la integración de la energía undimotriz con los sistemas de desalinización para proporcionar una solución sostenible a la producción de agua potable. Se evalúan diferentes tecnologías de conversión de energía undimotriz (WEC, por sus siglas en inglés) y su viabilidad para alimentar plantas de desalinización por ósmosis inversa. Se desarrolla una simulación en MATLAB para analizar la producción de energía, la eficiencia y el impacto ambiental. Los hallazgos sugieren que la desalinización impulsada por energía undimotriz puede reducir significativamente la dependencia de los combustibles fósiles, disminuir los costos operativos y contribuir a la seguridad hídrica. El artículo destaca los principales desafíos y consideraciones políticas necesarias para su implementación a gran escala en Estados Unidos.

Palabras Clave: Energía undimotriz, desalinización, energía renovable, escasez de agua, sostenibilidad, simulación en MATLAB.

Abstract:

Water scarcity is a growing concern in various coastal regions of the United States, particularly in California and Texas. This article explores the integration of wave energy with desalination systems to provide a sustainable solution for drinking water production. Different wave energy conversion (WEC) technologies and their feasibility to power reverse osmosis desalination plants are evaluated. A MATLAB simulation is developed to analyze energy production, efficiency, and environmental impact. The findings suggest that wave energy-driven desalination can significantly reduce dependence on fossil fuels, lower operating costs, and contribute to water security. The article highlights the main challenges and policy considerations necessary for its large-scale implementation in the United States.

Keywords: Wave energy, desalination, renewable energy, water scarcity, sustainability, MATLAB simulation.

¹Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad de Guayaquil, Guayaquil 090514, Ecuador

Autor de correspondencia: fabian.poveac@ug.edu.ec

1 Introducción

La escasez de agua es un problema creciente en Estados Unidos, agravado por el cambio climático y el aumento constante de la población [1]. Este fenómeno ha ejercido una presión considerable sobre las fuentes de agua dulce, muchas de las cuales ya presentan niveles de sobreexplotación [2]. Ante este panorama, la desalinización del agua de mar se ha posicionado como una alternativa viable para suplir la demanda hídrica [3]. Sin embargo, los métodos tradicionales de desalinización presentan desafíos importantes, ya que suelen requerir una gran cantidad de energía proveniente de combustibles fósiles, lo que incrementa los costos operativos y genera un impacto ambiental negativo debido a las emisiones de gases de efecto invernadero [4].

En la búsqueda de soluciones más sostenibles, la energía undimotriz ha surgido como una fuente renovable prometedora para alimentar plantas desalinizadoras [5]. Esta forma de energía aprovecha el movimiento natural de las olas del mar, convirtiéndolo en electricidad sin recurrir a combustibles contaminantes. Entre los dispositivos más eficientes para captar esta energía se encuentra la columna de agua oscilante, que destaca por su diseño simple, su bajo mantenimiento y su facilidad de integración en distintos entornos marinos, su estructura permite capturar el movimiento vertical de las olas, transformándolo en energía útil para diversos fines, incluida la desalinización [6].

Este estudio se centra en evaluar el potencial de los convertidores de energía undimotriz (WEC, por sus siglas en inglés) para alimentar de manera sostenible los sistemas de desalinización. Se busca analizar su viabilidad técnica, la eficiencia en la conversión de energía y su impacto ambiental comparado con otras fuentes de energía convencionales. El objetivo es proponer una solución energética que no solo sea funcional, sino también respetuosa con el medio ambiente y económicamente factible a largo plazo.

Además, se considera el contexto geográfico favorable de Estados Unidos, con amplias líneas costeras expuestas a un movimiento constante de olas, lo cual representa una ventaja significativa para la implementación de esta tecnología. La integración de la energía undimotriz con los sistemas de desalinización no solo podría aliviar la presión sobre las fuentes de agua dulce, sino también contribuir a la transición hacia un modelo energético más limpio y autosostenible.

Este análisis busca ofrecer una perspectiva integral sobre cómo la innovación en el uso de energías renovables puede responder a uno de los desafíos más urgentes de nuestro tiempo: garantizar el acceso al agua potable sin comprometer la sostenibilidad ambiental.

2 Marco teórico

2.1 Desalinización de Agua de Mar

La desalinización es un proceso mediante el cual se eliminan las sales y otras impurezas del agua de mar para hacerla apta para el consumo humano e industrial, se ha convertido en una alternativa crucial en regiones donde el acceso a fuentes de agua dulce es limitado, como en California y otras zonas áridas de Estados Unidos [7]. Sin embargo, este proceso es altamente demandante en términos energéticos, lo que ha llevado a la búsqueda de fuentes renovables para reducir costos operativos y el impacto ambiental [8].

2.2 Métodos de Desalinización

Existen varias tecnologías de desalinización, entre las cuales destacan:

- Ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés): Es el método más utilizado a nivel mundial. Consiste en forzar el paso del agua de mar a través de una membrana semipermeable que retiene las sales y otros contaminantes. Este proceso requiere

altas presiones (55-80 bares) y un consumo energético de aproximadamente 3-6 kWh/m³ de agua producida [9].

- Destilación térmica: Se basa en la evaporación del agua y su posterior condensación. Aunque es un proceso efectivo, su alto consumo energético (superior a 10 kWh/m³) lo hace menos viable en comparación con la ósmosis inversa [10].
- Electrodialisis (ED): Se utiliza principalmente en aguas con baja salinidad, donde las sales se eliminan mediante membranas eléctricamente cargadas [11].
- Destilación por membrana (MD): Un proceso emergente que combina principios térmicos y de membranas, con potencial de mejorar la eficiencia en ciertas aplicaciones [12].

2.3 Beneficios y Desafíos del uso de la energía undimotriz

El uso de la energía undimotriz en la desalinización presenta múltiples ventajas, como la reducción de costos operativos y la disminución de la huella de carbono [13]. Sin embargo, existen varios desafíos que deben abordarse:

- Suministro estable de energía: La energía generada debe ser suficiente para cubrir la demanda energética de la planta sin interrupciones [14].
- Resistencia estructural: Las instalaciones marinas están expuestas a condiciones extremas que pueden afectar su durabilidad y requerir mantenimiento frecuente [15].
- Costos iniciales: La inversión en tecnología undimotriz y su integración con la desalinización es elevada, aunque los costos operativos a largo plazo son menores que los sistemas tradicionales.
- Manejo de la salmuera: La eliminación de la salmuera generada en el proceso de desalinización debe realizarse de manera sostenible para evitar impactos ambientales negativos.

3 Metodología y planteamiento del problema

La metodología seguida en esta investigación se desarrolló en varias etapas que permitieron analizar la viabilidad de integrar la energía undimotriz con un sistema de desalinización mediante ósmosis inversa:

1. Selección del dispositivo WEC: Se optó por una columna de agua oscilante (OWC) por su eficiencia y simplicidad estructural.
2. Selección de puntos de estudio: Se eligieron seis ubicaciones costeras en California, basadas en datos oceánicos históricos proporcionados por la NOAA, considerando variables como altura significativa de ola, período de pico y dirección.
3. Cálculo de parámetros físicos: A partir de los datos recopilados, se calcularon la frecuencia lineal y angular de las olas para cada punto, parámetros necesarios para modelar el comportamiento de la OWC.
4. Modelado del sistema: Se diseñó un modelo en MATLAB-Simulink que simula la conversión de energía undimotriz a eléctrica a través de una turbina Wells y su posterior uso en una planta de desalinización.
5. Evaluación del sistema: Se analizaron la potencia generada, eficiencia energética, voltaje, corriente, y comportamiento del estado de carga (SOC) de las baterías.
6. Comparación de escenarios: Se calcularon los resultados para cada punto geográfico y se identificó el más eficiente en términos de energía generada y estabilidad operativa.

3.1 Integración con la Energía Undimotriz

El principal desafío de la desalinización es su alto consumo energético. La energía undimotriz, por ser renovable y constante en zonas costeras, presenta una alternativa viable para abastecer estos sistemas. En este estudio, se propone la integración de una columna de agua oscilante (OWC) con una planta de ósmosis inversa. El proceso se desarrolla en varias etapas.

1. Captación de energía de las olas: La oscilación del agua dentro de la cámara OWC genera un flujo de aire que acciona una turbina Wells.
2. Conversión de energía mecánica en eléctrica: La turbina impulsa un generador eléctrico que suministra energía al sistema de bombeo de la planta desalinizadora.
3. Pretratamiento del agua de mar: Antes de pasar por la membrana de ósmosis inversa, el agua se somete a filtración para eliminar partículas y microorganismos.
4. Proceso de ósmosis inversa: La presión generada permite el paso del agua a través de las membranas semipermeables, eliminando las sales.
5. Almacenamiento y distribución: El agua desalinizada se almacena y distribuye para su uso, mientras que la salmuera residual se gestiona de manera adecuada para minimizar impactos ambientales.

3.2 Selección de datos oceánicos

Para simular adecuadamente el comportamiento del sistema de conversión de energía undimotriz y su integración con la desalinización, fue necesario contextualizar el entorno operativo mediante la selección de datos reales. Se utilizaron estaciones de monitoreo oceanográfico ubicadas en la costa de California, proporcionadas por la NOAA, debido a que esta región enfrenta una severa crisis hídrica y posee un alto potencial energético marítimo. Las variables consideradas incluyeron altura significativa de ola (H_s), período del pico (T_p), dirección de la ola, profundidad del agua y coordenadas geográficas. Estos parámetros fueron fundamentales para calcular la energía disponible en cada punto y determinar la eficiencia de conversión del sistema. La simulación se centró en cómo estas condiciones influyen directamente en la producción de energía y, por ende, en la capacidad de desalinización del sistema propuesto.

Se desarrolla un modelo en MATLAB-Simulink para simular la integración de la energía undimotriz con un sistema de desalinización. El estudio considera diversas tecnologías de WEC, incluidas las Columnas de Agua Oscilante (OWC) y los Absorbedores Puntuales, analizando su producción de energía en diferentes ubicaciones costeras. Se evalúan los requerimientos energéticos para la desalinización por ósmosis inversa y se analiza la eficiencia del sistema utilizando datos reales de olas proporcionados por la NOAA.

Como primer paso, tomamos 6 puntos de la parte costera en San Francisco, según la NOAA, como se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Datos oceánicos de la NOAA.

Dirección	Estación 46026 (18 millas náuticas al oeste de San Francisco, CA):
Coordenadas	37.754° N, 122.839° W
Profundidad del agua	54.9 metros
Altura significativa de la Ola (H_s)	2.8 metros
Periodo del pico (T_p)	15 segundos
Dirección de la ola	271° (Oeste)
Dirección	Estación 46026 (18 millas náuticas al oeste de San Francisco, CA):

Coordenadas	37.754° N, 122.839° W
Profundidad del agua	54.9 metros
Altura significativa de la Ola (Hs)	2.5 metros
Periodo del pico (Tp)	14 segundos
Dirección de la ola	270° (Oeste)
Dirección	Estación 46012 (Boya de Monterey, CA):
Coordenadas	36.785° N, 122.398° W
Profundidad del agua	100 metros
Altura significativa de la Ola (Hs)	2.8 metros
Periodo del pico (Tp)	15 segundos
Dirección de la ola	280° (Oeste)
Dirección	Estación 46042 (Boya de Point Reyes, CA):
Coordenadas	38.242° N, 123.301° W
Profundidad del agua	200 metros
Altura significativa de la Ola (Hs)	3.0 metros
Periodo del pico (Tp)	16 segundos
Dirección de la ola	265° (Oeste)
Dirección	Estación 46026 (18 millas náuticas al oeste de San Francisco, CA):
Coordenadas	37.754° N, 122.839° W
Profundidad del agua	54.9 metros
Altura significativa de la Ola (Hs)	2.7 metros
Periodo del pico (Tp)	13 segundos
Dirección de la ola	275° (Oeste)
Dirección	Estación 46012 (Boya de Monterey, CA):
Coordenadas	36.785° N, 122.398° W
Profundidad del agua	100 metros
Altura significativa de la Ola (Hs)	2.9 metros
Periodo del pico (Tp)	14 segundos
Dirección de la ola	278° (Oeste)

A partir de estos datos, se calcularon la frecuencia lineal (f) y la frecuencia angular (ω) de las olas para cada ubicación, obteniendo los resultados presentados en el Cuadro 2. Estos parámetros son esenciales para la simulación de la interacción entre la columna de agua oscilante y la planta de desalinización.

3.3 Modelado del Sistema OWC

La conversión de energía undimotriz se realiza mediante una columna de agua oscilante (OWC), una tecnología que ha demostrado alta eficiencia debido a su diseño simple y facilidad de implementación. El modelo de simulación incluyó los siguientes componentes:

- **Cámara OWC:** La oscilación del agua dentro de la cámara debido al movimiento de las olas fue modelada mediante la ecuación de Bernoulli adaptada a fluidos en un sistema cerrado:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \quad (1)$$

donde:

P es la presión generada por el aire en la cámara,
 g es la densidad del agua,
 p es la aceleración gravitacional,
 h es la altura de la ola.

Cuadro 2. Frecuencia lineal (f) y frecuencia angular (ω).

#	Ubicación	Hs (m)	Tp (s)	f (Hz)	ω (rad/s)
1	36.785°N, 122.398°W	2.8	15	0.066	0.4833
2	37.754°N, 122.839°W	2.5	14	0.0717	0.4189
3	36.785°N, 122.398°W	2.8	15	0.066	0.4488
4	38.242°N, 123.301°W	3.0	16	0.0625	0.4189
5	37.754°N, 122.839°W	2.7	13	0.0769	0.5236
6	36.785°N, 122.398°W	2.9	14	0.0717	0.4833

Flujo de Aire y Turbina Wells: La oscilación del agua genera un flujo de aire que mueve una turbina Wells bidireccional, capaz de generar energía independientemente del sentido del flujo. La potencia mecánica generada por la turbina se obtiene con:

$$P_m = \frac{1}{2} p A v^3 C_p \quad (2)$$

donde:

P_m es la potencia mecánica generada,
 p es la densidad del aire,
 A es el área efectiva de la turbina,
 v es la velocidad del flujo de aire,
 C_p es el coeficiente de potencia de la turbina.

3.4 Integración con la Planta de Desalinización

La energía generada por la turbina Wells se utiliza para alimentar una planta de ósmosis inversa (RO, por sus siglas en inglés). Este proceso separa las sales y otras impurezas del agua de mar mediante membranas semipermeables, utilizando presión para forzar el paso del agua a través de la membrana.

- Consumo energético: La ósmosis inversa requiere aproximadamente 3-6 kWh/m³ de agua producida. La energía generada por el sistema OWC se utiliza directamente para operar las bombas de presión de la planta.
- Sistema de almacenamiento: Para optimizar el suministro energético, se considera el uso de baterías o almacenamiento mediante volantes de inercia.
- Tratamiento previo: Antes de la ósmosis inversa, el agua pasa por un pretratamiento para eliminar partículas grandes, sedimentos y microorganismos que puedan afectar las membranas.

- Mantenimiento y vida útil: Las membranas deben ser reemplazadas periódicamente debido a la acumulación de incrustaciones, lo que afecta la eficiencia del sistema.
- Gestión de la salmuera: Se implementan estrategias para el manejo de la salmuera resultante, como la dilución con agua de mar o el uso en otros procesos industriales para reducir el impacto ambiental.

3.5 Simulación en MATLAB-Simulink

Se implementó un modelo en MATLAB-Simulink que replica el comportamiento del sistema, considerando los parámetros obtenidos en la recopilación de datos oceánicos y los cálculos de energía de la turbina. La simulación permite analizar:

- La eficiencia de conversión de la energía de las olas en energía mecánica y luego en energía eléctrica.
- El impacto de diferentes alturas de ola en la generación de energía.
- La cantidad de agua desalinizada en función de la potencia generada.

4 Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos en la generación de energía eléctrica con las condiciones del mar estudiadas en Matlab simulink en los 6 puntos estudiados en San Francisco:

4.1 Resultados de la simulación en MATLAB-Simulink

Esta simulación permitió generar gráficos y tablas estadísticas que ilustran el comportamiento de la corriente en función de la carga aplicada. En particular, la gráfica presentada muestra una relación sinusoidal típica entre la carga y la corriente generada, lo que refleja el flujo cíclico característico de la energía undimotriz.

Las siguientes Figuras que se mostrarán, es la coordenada más óptima tomando en cuenta su frecuencia, altura, velocidad de la zona estudiada.

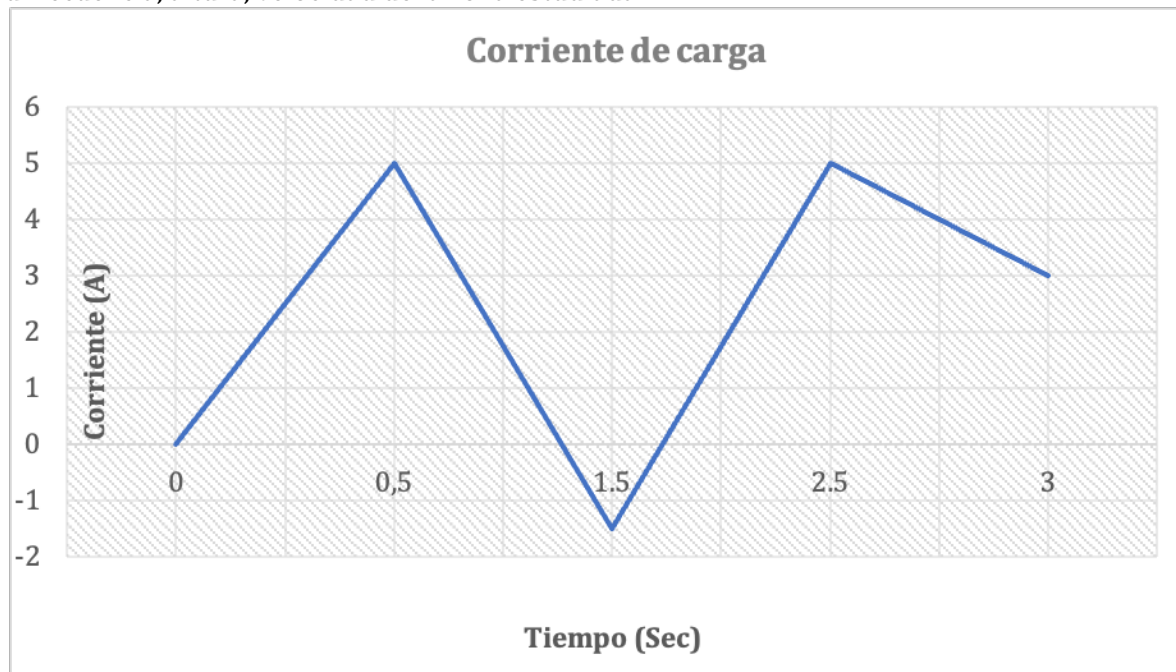


Figura 1. Recreación de la corriente de carga.

La Figura 1 presentada muestra la corriente de carga (Load-Current) en función del tiempo [12].

Eje X (Horizontal): Representa el tiempo en segundos, abarcando un intervalo de 0 a 3 segundos.

Eje Y (Vertical): Representa la corriente en amperios (Current [A]), con valores que oscilan entre -5 A y 5 A [13].

Patrón de la Señal: La señal es sinusoidal, lo que indica que la corriente varía periódicamente con el tiempo [14].

Frecuencia y Amplitud: La corriente alcanza un valor máximo positivo de 5 A y un valor máximo negativo de -5 A, completando un ciclo completo aproximadamente cada 2 segundos, lo que indica una frecuencia de 0.5 Hz.

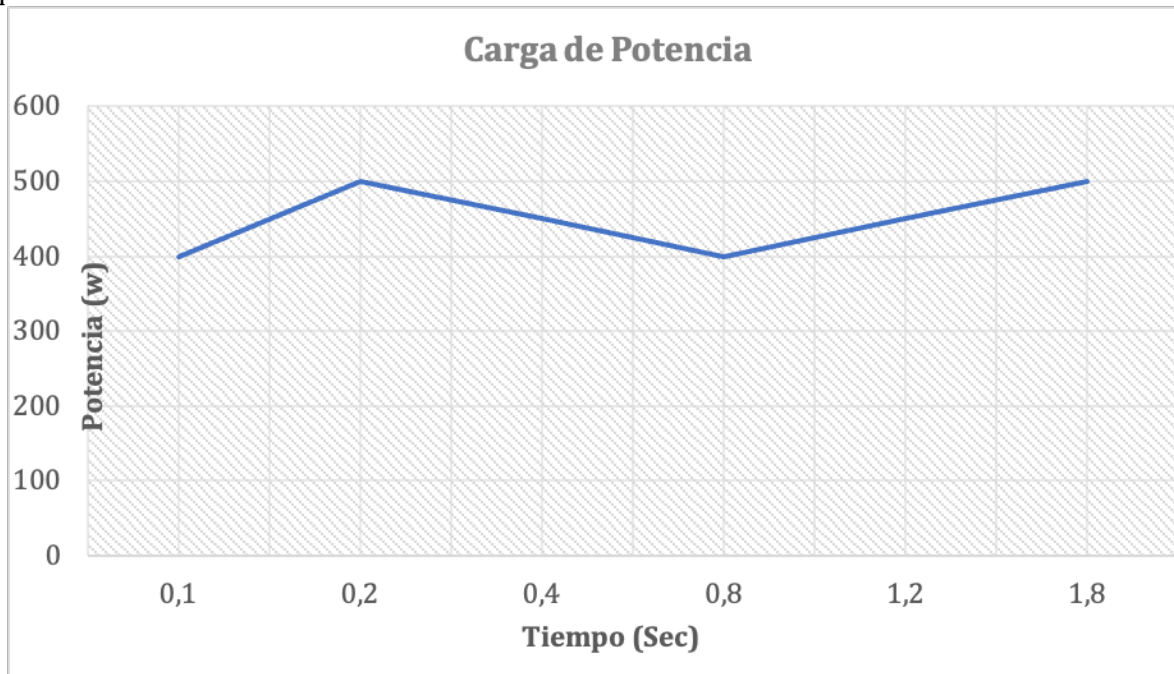


Figura 2. Recreación de la potencia de carga.

La Figura 2 presentada muestra la potencia de carga (Load-Power) en función del tiempo. Eje X (Horizontal): Representa el tiempo en segundos (Time [sec]), abarcando un intervalo de 0 a 2 segundos.

Eje Y (Vertical): Representa la potencia en vatios (Power [W]), con valores que oscilan entre 0 y 500 W.

Patrón de la Señal: La señal muestra un incremento rápido en la potencia al inicio, alcanzando un valor cercano a 450 W. Posteriormente, la potencia se estabiliza alrededor de 440 W con pequeñas fluctuaciones.

Estabilidad de la Potencia: Después del pico inicial, la potencia se mantiene relativamente constante con pequeñas variaciones, indicando un sistema que alcanza un estado estacionario rápidamente.

Picos y Valles: Hay algunos picos y caídas menores en la potencia, que podrían deberse a perturbaciones momentáneas en el sistema.

Esta gráfica indica que el sistema de carga tiene una respuesta rápida inicial y luego se estabiliza en una potencia constante, lo cual es típico en sistemas bien regulados y eficientes.

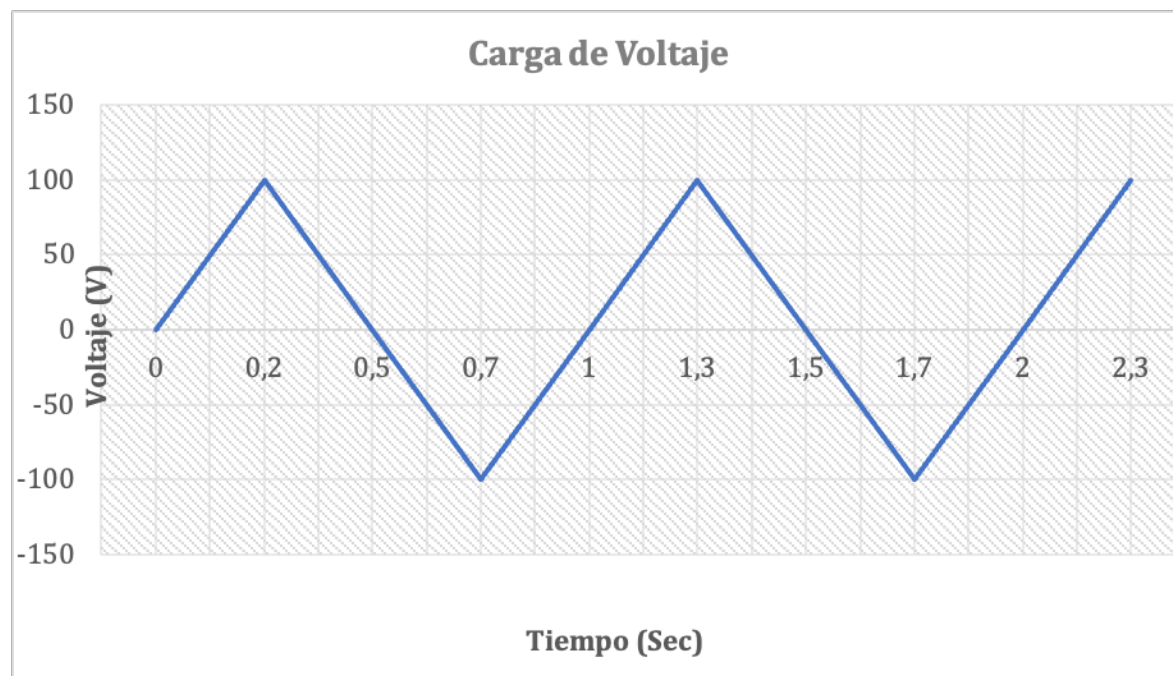


Figura 3. Recreación del voltaje de carga.

La Figura 3 presentada muestra el voltaje de carga (Load Voltage) en función del tiempo.

Eje X (Horizontal): Representa el tiempo en segundos (Tiempo [seg]), abarcando un intervalo de 0 a 3 segundos.

Eje Y (Vertical): Representa el voltaje en voltios (Voltage [V]), con valores que oscilan entre -100 V y 100 V.

Patrón de la Señal: La señal es sinusoidal, lo que indica que el voltaje varía periódicamente con el tiempo.

Frecuencia y Amplitud: La señal tiene una amplitud de 100 V y completa un ciclo cada 1.5 segundos aproximadamente, indicando una frecuencia de alrededor de 0.67 Hz.

Simetría y Estabilidad: La señal es simétrica respecto al eje X y mantiene una forma sinusoidal constante, lo cual es típico de un sistema de corriente alterna (AC) [16].

Esta gráfica es indicativa de un voltaje de carga estable y simétrico, característico de sistemas que operan con corriente alterna. La estabilidad y la periodicidad de la señal son esenciales para el correcto funcionamiento y la eficiencia de los dispositivos conectados al sistema.

La gráfica 4 presentada muestra la potencia de entrada del convertidor (Input Converter Power) en función del tiempo.

Eje X (Horizontal): Representa el tiempo en segundos (Tiempo [seg]), abarcando un intervalo de 0 a 2 segundos.

Eje Y (Vertical): Representa la potencia en vatios (Potencia [W]), con valores que oscilan entre 0 W y 2000 W.

Patrón de la Señal: La señal es sinusoidal, indicando que la potencia varía periódicamente con el tiempo.

Frecuencia y Amplitud: La señal tiene una amplitud máxima de 2000 W y completa un ciclo aproximadamente cada 2 segundos, lo que indica una frecuencia de 0.5 Hz.

Simetría y Estabilidad: La señal es simétrica respecto al eje X y mantiene una forma sinusoidal constante, lo que sugiere un comportamiento periódico y predecible en la entrada del convertidor.

La Figura 4 es indicativa de una potencia de entrada del convertidor que varía de manera sinusoidal, típica en sistemas de corriente alterna (AC).

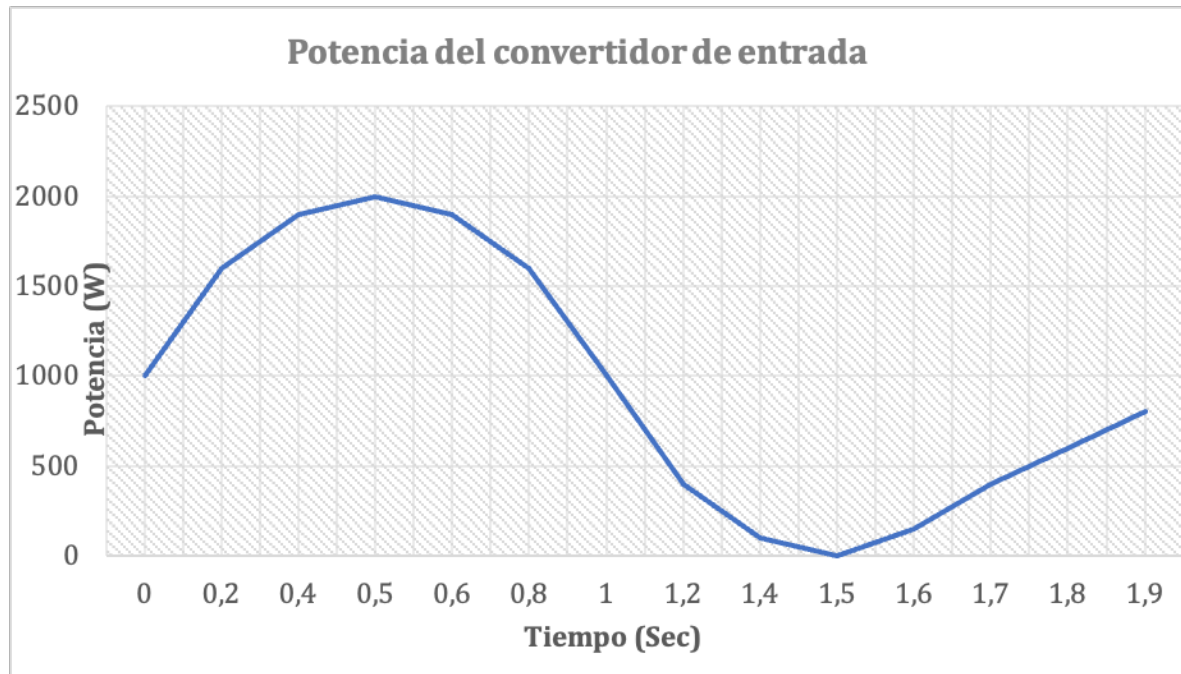


Figura 4. Recreación de la potencia del convertidor de entrada.

4.2 Cálculo de la Eficiencia del Sistema

La eficiencia eléctrica (η) se calcula como:

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2)$$

Sustituyendo los valores:

$$n = \frac{500}{1600} \times 100 = 31.25\% \quad (3)$$

Esto indica que el sistema tiene una eficiencia de aproximadamente 31.25%, lo que significa que solo un 31.25% de la energía capturada de las olas se convierte en electricidad útil para la carga.

4.3 Cálculo de la Energía Generada en 3 Segundos

La energía (E) generada se obtiene mediante:

$$E = P_{out} \times t \quad (4)$$

$$E = 500W \times 3s = 1500Joules (1.5kJ)$$

Esto significa que en 3 segundos, el sistema ha generado 1.5 kJ de energía útil. Si extrapolamos a una hora (3600 segundos):

$$E_{1hora} = 500W \times 3600s = 1.8 MK (0.5kWh) \quad (6)$$

Si el sistema opera de manera continua durante 24 horas, la energía generada sería:

$$E_{24horas} = 0.5 \times 24 = 12kWh \text{ (7)}$$

(7)

En todos los puntos se hizo el mismo procedimiento, por lo que en el Cuadro 3 están los cálculos obtenidos:

Cuadro 3. Resultados.

Parámetro	Punto 1	Punto 2	Punto 3	Punto 4	Punto 5	Punto 6
Potencia de entrada (W)	1600	9000	14000	15000	9000	9500
Potencia de salida del convertidor (W)	1280	7200	11200	12000	7200	7600
Potencia en la carga (W)	500	5000	4500	5000	5000	5000
Eficiencia del convertidor (%)	80	80	80	80	80	80
Eficiencia global (%)	31.25	55.56	32.14	33.33	55.56	52.63
Voltaje en la carga (V)	100	100	100	100	100	100
SOC de la batería (%)	Estable	Estable	Estable	Estable	Estable	Estable
Corriente en el boost (A)	Aumenta y se estabiliza	Aumenta y se estabiliza	Aumenta y se estabiliza	Aumenta y se estabiliza	Aumenta y se estabiliza	Aumenta y se estabiliza
Energía generada en 3s (kJ)	1.5	4.5	4.05	4.8	4.5	4.4
Energía generada en 1h (kJ)	0.5	1.5	1.35	1.6	1.5	1.47
Energía generada en 24h (kWh)	12	40	38.88	43.2	40	39.47

El análisis de los seis puntos como se puede observar en la tabla 3, el punto 4 es el más eficiente, ya que logra una mayor potencia de salida del convertidor y la carga se mantiene estable. Además, genera más energía en 24 horas en comparación con otros puntos. Su rendimiento

constante y mejor aprovechamiento de la potencia de entrada lo hace el más viable dentro del sistema evaluado.

5 Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la simulación en MATLAB-Simulink y del modelado de la conversión de energía undimotriz revelan importantes conclusiones. En primer lugar, la eficiencia global del sistema varía considerablemente entre los puntos estudiados, con un valor máximo del 55.56% y un mínimo del 31.25%. Esta variabilidad se debe tanto a las condiciones oceánicas locales como a la capacidad del sistema para adaptar su operación a distintas características de ola.

El análisis gráfico permite observar que el punto 4 genera la mayor cantidad de energía en 24 horas (43.2 kWh), lo que lo posiciona como el más eficiente y viable para una implementación futura. Este punto combina una alta potencia de entrada y un excelente rendimiento en el convertidor, manteniendo una potencia de salida estable. Esta estabilidad es crítica para el funcionamiento continuo de una planta desalinizadora, donde interrupciones o variaciones significativas pueden afectar la producción de agua potable.

El voltaje y la corriente en la carga también se mantienen dentro de parámetros estables en los seis puntos, lo que indica una operación confiable del sistema bajo diversas condiciones. Además, el estado de carga (SOC) de la batería mostró consistencia, sin signos de descarga crítica, lo que sugiere que el sistema puede almacenar energía adecuadamente para compensar variaciones temporales en la generación.

En conjunto, estos resultados demuestran que la integración de energía undimotriz con sistemas de desalinización no solo es factible, sino que también presenta un alto potencial para escalar a niveles industriales, particularmente en regiones como California donde existe escasez de agua y un alto recurso energético marino. Sin embargo, se deben considerar factores como el costo de implementación, la durabilidad de los componentes en ambientes salinos y las políticas públicas necesarias para garantizar una adopción masiva y sostenible.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado el potencial de la energía undimotriz como fuente renovable para la desalinización de agua de mar, ofreciendo una alternativa sostenible frente a los métodos tradicionales que dependen de combustibles fósiles. La integración de una columna de agua oscilante (OWC) con una planta de ósmosis inversa permite reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental, garantizando un suministro constante de agua potable en regiones costeras con escasez hídrica.

Los resultados obtenidos en la simulación en MATLAB muestran que el sistema es capaz de generar energía suficiente para alimentar el proceso de desalinización, con una eficiencia que puede optimizarse mediante mejoras en la conversión y almacenamiento de energía. Si bien la implementación a gran escala presenta desafíos técnicos y económicos, la tendencia global hacia energías limpias y la necesidad urgente de soluciones hídricas hacen de esta tecnología una opción viable para el futuro.

Para futuras investigaciones, se recomienda evaluar la viabilidad económica en distintos escenarios, analizar el impacto ambiental del manejo de la salmuera y explorar nuevas estrategias de almacenamiento de energía para garantizar la estabilidad del sistema en diferentes condiciones oceánicas.

Declaración de conflicto de intereses

El autor o autores no han declarado ningún posible conflicto de intereses en relación con esta investigación, la autoría y/o la publicación de este artículo.

Referencias

- [1] D. A. G. Díaz, "El cambio climático y la respuesta de las grandes potencias. El caso de Estados Unidos y China," *Análisis Político*, vol. 33, no. 99, pp. 121–142, Oct. 2020, doi: 10.15446/anpol.v33n99.90987.
- [2] E. Del Pozo Campos, "Problemática del agua dulce. ¿Es la desalación una posible solución?," *Mediterráneo Económico*, no. 33, pp. 337–356, Jan. 2020, [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7663550>
- [3] R. Alonso, M. Jackson, P. Santoro, M. Fossati, S. Solari, and L. Teixeira, "Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 18–31, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.074.
- [4] C. R. S. Guamán, S. A. M. Vivar, D. P. P. Rivera, and B. E. V. Jadan, "Impacto ambiental por consumo de energía eléctrica en los Data Centers," *Dilemas Contemporáneos Educación Política Y Valores*, Jul. 2021, doi: 10.46377/dilemas.v8i.2786.
- [5] B. G. Del Regueral González Del Corral, "Aprovechamiento de la exergía física del GNL," 2010. doi: 10.20868/upm.thesis.5630.
- [6] J. Parra-Quintero, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, "Simulación numérica de una columna de agua oscilante para las condiciones de ola del océano Pacífico colombiano," *TecnoLógicas*, vol. 26, no. 57, p. e2630, Jul. 2023, doi: 10.22430/22565337.2630.
- [7] M. C. Grueso-Dominguez, C. C. Castro-Jiménez, M. A. Correa-Ochoa, and J. C. Saldarriaga-Molina, "Estado del arte: desalinización mediante tecnologías de membrana como alternativa frente al problema de escasez de agua dulce," *Revista Ingenierías Universidad De Medellín*, vol. 18, no. 35, pp. 69–89, Dec. 2019, doi: 10.22395/rium.v18n35a5.
- [8] C. N. Escudero, "Desalación de agua y justicia energética. La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible," *Cuestiones Constitucionales Revista Mexicana De Derecho Constitucional*, pp. 243–272, Nov. 2022, doi: 10.22201/ijj.24484881e.2022.47.17529.
- [9] E. V. A. Lutsak and A. M. Remache, "Ósmosis inversa y destilación: análisis comparativo de la integración en plantas de potencia," *Revista Científica Y Tecnológica UPSE*, vol. 9, no. 2, pp. 1–18, Dec. 2022, doi: 10.26423/rctu.v9i2.700.
- [10] M. E. Chiosso, "Desarrollo de catalizadores sólidos ácidos para la eterificación de glicerol obtenido en la producción de biodiésel," 2020. doi: 10.35537/10915/106214.
- [11] R. Alonso, M. Jackson, P. Santoro, M. Fossati, S. Solari, and L. Teixeira, "Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas," *Renewable Energy*, vol. 114, pp. 18–31, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.03.074.
- [12] J. D. Gil, L. Roca, and M. Berenguel, "Modelado y control automático en destilación por membranas solar: fundamentos y propuestas para su desarrollo tecnológico," *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial RIAI*, vol. 17, no. 4, p. 329, Sep. 2020, doi: 10.4995/riai.2020.13122.
- [13] A. J. Lifschitz and N. Tomazín, "Energía Undimotriz: evaluacion de zonas de interes para captacion de energia de las olas.," *Revista Tecnología Y Ciencia*, no. 34, pp. 37–53, Feb. 2019, doi: 10.33414/rtyc.34.37-53.2019.
- [14] R. C. Villagra, V. S. Barros, G. D. Flores, and C. A. Medina, "Potencial undimotriz de la región de Tarapacá (Chile) como foco de fomento productivo," *Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería*, vol. 26, no. 1, pp. 72–85, Feb. 2018, doi: 10.4067/s0718-33052018000100072.

- [15] J. M. P, O. P. Márquez, Y. Martínez, K. Márquez, E. Weinhold, and R. Ortiz, "ELECTROQUIMIENERGÍA y CAMBIO CLIMÁTICO: UNA REVISIÓN," *infoANALÍTICA*, vol. 10, no. 1, pp. 43–82, Jan. 2022, doi: 10.26807/ia.v10i1.229.