

Análisis Teórico-Energético de un Convertidor Undimotriz tipo Arquímedes, “A.W.S.” Theoretical-Energy Analysis of an Archimedes-type Wave Energy Converter, “A.W.S.”

Jesús Eduardo Rivera López ^{ID}^{a,*}, Josué Roberto Hernández Juárez ^{ID}^a, Milton Alfredo Perez Reyes ^{ID}^a, Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes ^{ID}^a, María del Rosario González Bañaes ^{ID}^a, Luis Fernando Morales Oscoy ^{ID}^a, David Tonatiuh Melgar granados ^{ID}^a.

SEPI-MIM, Laboratorio de Ingeniería Hidráulica Aplicada, Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica Unidad Azcapotzalco, 02250, Ciudad de México, Azcapotzalco, México

Resumen

En México, el 74.52 % de la energía eléctrica proviene del gas y petróleo, lo que motiva la búsqueda de fuentes renovables de energía. Este trabajo realizó un análisis teórico energético de un convertidor undimotriz “W.E.C.”, estimando el potencial de energía del oleaje en Baja California Sur-Norte “B.C.S.-N.” (36.21 kW/m) y Michoacán (27.59 kW/m). Se propuso la geometría de los componentes principales del “W.E.C.” y generador eléctrico lineal. El problema del diseño preliminar fue la baja eficiencia (65 %) en “B.C.S.-N.” con 22 pares de polos. En contraste, en Michoacán se alcanzó un 85 % de eficiencia. Para mejorar el diseño en “B.C.S.-N.”, se analizó la eficiencia en función de la temperatura y el número de pares de polos, encontrando que operar a 40 °C con 18 pares de polos eleva la eficiencia al 80 %. Finalmente, se compara este diseño con otros “W.E.C.”, concluyendo que la eficiencia obtenida es óptima y competitiva, lo que ratifica la viabilidad del diseño propuesto como alternativa energética.

Palabras Clave: Potencial energético, Convertidor undimotriz, Generador eléctrico lineal, Costas del Pacífico mexicano.

Abstract

In Mexico, 74.52 % of the electrical energy comes from gas and oil, which motivates the search for renewable energy sources. This work performed a theoretical energy analysis of a wave energy converter “W.E.C.”, estimating the wave energy potential in Baja California Sur-Norte “B.C.S.-N.” (36.21 kW/m) and Michoacán (27.59 kW/m). The geometry of the main components of the “W.E.C.” and the linear electric generator were proposed. The problem with the preliminary design was the low efficiency (65 %) achieved in “B.C.S.-N.” with 22 pole pairs. In contrast, 85 % efficiency was achieved in Michoacán. To improve the design in “B.C.S.-N.”, efficiency was analyzed as a function of temperature and number of pole pairs, finding that operating at 40 °C with 18 pole pairs raises efficiency to 80 %. Finally, this design is compared with other “W.E.C.s, concluding that the efficiency obtained is optimal and competitive, which ratifies the viability of the proposed design as an energetic alternative.

Keywords: Energy potential, wave energy converter, linear electric generator, Mexican Pacific coasts, energy efficiency.

1. Introducción

Las olas son perturbaciones que deforman continuamente la superficie libre de un fluido, oponiéndose simultáneamente a la acción de la gravedad y a la tensión superficial. Estas fuerzas, al interactuar, permiten que la superficie del fluido mantenga un equilibrio dinámico caracterizado por oscilaciones periódicas. En la naturaleza, el oleaje se origina

principalmente por la acción del viento, aunque también puede ser inducido por terremotos, tormentas, tsunamis o la atracción gravitacional del Sol y la Luna (Caballero Santos, 2011; Mei et al., 2005). Sin embargo, el viento representa la fuente dominante de energía en la formación del oleaje debido a su elevada capacidad de transferencia de energía cinética (Falcão, 2010).

*Autor para la correspondencia: jriveral@ipn.mx

Correo electrónico: jriveral@ipn.mx (Jesús Eduardo Rivera López), jhernandezj@ipn.mx (Josué Roberto Hernández Juárez), mperezre@ipn.mx (Milton Alfredo Perez Reyes), ggutierrezp@ipn.mx (Guadalupe Juliana Gutiérrez Paredes), rgonzalezb0800@ipn.mx (María del Rosario González Bañaes), lmorales01302@egresado.ipn.mx (Luis Fernando Morales Oscoy), dmelgarg@alumno.ipn.mx (David Tonatiuh Melgar Granados).

Según, (Shao et al., 2022) los países con mayor potencial energético del oleaje incluyen Australia (224.9 TWh), Indonesia (128.2 TWh), Estados Unidos (122.8 TWh), Chile (122.6 TWh), México (52.7 TWh), Canadá (47.9 TWh), Francia (48.0 TWh), Sudáfrica (49.8 TWh), Nueva Zelanda (73.0 TWh), Rusia (34.1 TWh), India (33.1 TWh), Marruecos (24.2 TWh), Namibia (22.2 TWh) y Madagascar (42.1 TWh).

La energía contenida en el oleaje puede aprovecharse mediante convertidores undimotrices o Wave Energy Converters “W.E.C.”, que capturan la energía mecánica del movimiento ondulatorio y la transforman en energía eléctrica (Drew et al., 2009; Falcão, 2010). Desde una perspectiva energética, las olas pueden considerarse una batería hidráulica natural: almacenan y transportan energía a grandes distancias, con pérdidas relativamente bajas, hasta que es transformada por los “W.E.C.” (Reikard et al., 2015).

La clasificación de los sistemas undimotrices se basa en su grado de libertad (traslación o rotación en los ejes x, y, z) (González-Ramírez et al., 2017), su profundidad de instalación (aguas someras <10 m, intermedias 10–25 m, o profundas >40 m), y su principio de operación. En función de estos criterios, los dispositivos se agrupan en tres tipos principales: el Wave Activated Body “W.A.B.”, la Oscillating Water Column “O.W.C.” y el Overtopping Device “O.D.” (López et al., 2013; Mustapa et al., 2017a).

Las potencias generadas por los “W.E.C.” varían considerablemente según el tipo de dispositivo y las condiciones del sitio. Los sistemas tipo O.W.C. alcanzan potencias entre 150 kW (Trivandrum, India) y 2.5 MW (Civitavecchia, Italia). Los “W.A.B.” desarrollan entre 7.5 kW (New Jersey, EE.UU.) y 2.25 MW (Agucadoura, Portugal), mientras que los “O.D.” producen desde 8 kW (Isla de Kandooma) hasta 350 kW (Noruega) (Goggins & Finnegan, 2014). Estas diferencias dependen de la energía disponible en la ola, del principio de conversión utilizado y de la localización (Reikard et al., 2015).

Entre los convertidores sumergidos destaca el Convertidor de Arquímedes (Archimedes Wave Swing, “A.W.S.”), un absorbedor puntual basado en un diferencial de presión entre el agua y el aire contenido en su estructura (García Saiz, 2015). El dispositivo se compone de una parte fija —un cilindro anclado al lecho marino que almacena aire comprimido— y una parte móvil o flotador que actúa como émbolo. Cuando una cresta de ola incide sobre el flotador, la presión externa aumenta y el flotador desciende, comprimiendo el aire interno. En la fase de valle, la presión externa disminuye, y el aire comprimido impulsa el flotador hacia arriba, generando un ciclo oscilante aprovechable para producir energía (Valério et al., 2007).

(AWS Ocean Energy Ltd., n.d.) desarrollaron una planta piloto “A.W.S.” con un flotador de 9.5 m de diámetro y una biela de 7 m, alcanzando una potencia máxima de 2 MW. Más recientemente, (Yang et al., 2023) integraron un “A.W.S.” con un nano-generador triboeléctrico, logrando una densidad de potencia de $7.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ a una frecuencia de 4.5 Hz, lo que demuestra el potencial de los sistemas híbridos mecano-

eléctricos para mejorar la eficiencia de conversión en condiciones de baja frecuencia.

2. Metodología/Desarrollo

La metodología empleada para analizar el desempeño energético de un convertidor undimotriz “W.E.C.” como alternativa a la generación eléctrica en México se muestra a continuación:

La metodología de investigación se estructuró en cuatro etapas: (1) estimación del potencial energético del oleaje; (2) diseño conceptual del convertidor; (3) modelado analítico de las fuerzas hidrodinámicas; y (4) análisis de eficiencia del generador lineal. Los parámetros de oleaje (altura y periodo) se obtuvieron de (Young Hugh D. & Roger A. Freedmas, 2009) para Baja California Sur-Norte y Michoacán. El diseño del generador lineal se modeló con base en (Polinder et al., 2004a) y se validó con ecuaciones derivadas de (Folley, 2017a) y (Boccotti, 2014). Los supuestos incluyen flujo incompresible, régimen estacionario y la omisión de pérdidas por fricción. El modelado se realizó en MATLAB para el análisis paramétrico del número de pares de polos y el efecto de la temperatura.

2.1. Objetivos: general/ específicos

General. Realizar un análisis teórico-energético de un convertidor undimotriz tipo Arquímedes “W.E.C.”, con el fin de evaluar su desempeño en la conversión de la energía de las olas en electricidad, mediante la estimación del recurso undimotriz, el diseño del sistema y la determinación de su eficiencia bajo distintas condiciones operativas.

Específicos.

1. Estimar el recurso energético undimotriz disponible en zonas costeras seleccionadas, utilizando los datos de las referencias bibliográficas para determinar su viabilidad.
2. Diseñar el “W.E.C.”, considerando los parámetros geométricos principales y operativos adecuados para maximizar la captación de la energía de las olas.
3. Modelar el comportamiento energético del “W.E.C.” evaluando su desempeño bajo diferentes condiciones de operación utilizando instrumentos teóricos-analíticos.
4. Analizar la eficiencia del sistema de conversión, identificando los factores que afectan su rendimiento y proponiendo mejoras en el diseño energético.
5. Comparar el desempeño del “W.E.C.” con otros convertidores undimotrices, para fundamentar su viabilidad como una alternativa de fuente de energética renovable.

2.2. Diseño de concepto y principio de funcionamiento.

El diseño conceptual propuesto se presenta en la Figura 1, donde se identifican los elementos principales del convertidor tipo Arquímedes. Estos incluyen: la boya (E3), el casco superior o flotador (E1), el casco inferior o fijo (E2), y una membrana flexible (E4) que sella las uniones entre ambos cascos. En el interior del dispositivo se encuentran el eje central (E5), la armadura estructural (E6) y el generador eléctrico lineal, cuyo principio de operación se basa en la inducción electromagnética. Este generador está compuesto por dos partes: el estator, instalado en el casco inferior, que incluye un núcleo (G3), devanado (G4) y material aislante (G5); y el traslador, que constituye la parte móvil, formado por un núcleo (G2) e imanes permanentes (G1), acoplados a una columna conectada al casco superior.

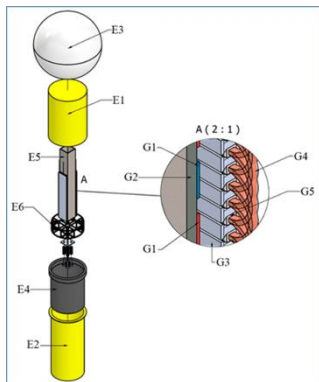


Figura 1. Partes constitutivas.

La Figura 2 ilustra el principio de funcionamiento del convertidor. Cuando el mar se encuentra en calma, la presión hidrostática y las fuerzas ascendentes del sistema están en equilibrio. Sin embargo, al paso de una cresta, la presión hidrostática aumenta, generando fuerzas descendentes que comprimen el convertidor.

Por el contrario, durante el valle de la ola, la presión hidrostática disminuye y las fuerzas ascendentes predominan, lo que provoca el ascenso del convertidor. Este movimiento oscilante genera un desplazamiento relativo entre los imanes permanentes del traslador y las bobinas del estator, induciendo una corriente eléctrica. De esta manera, la energía mecánica del oleaje se transforma en energía eléctrica mediante el principio de inducción electromagnética.

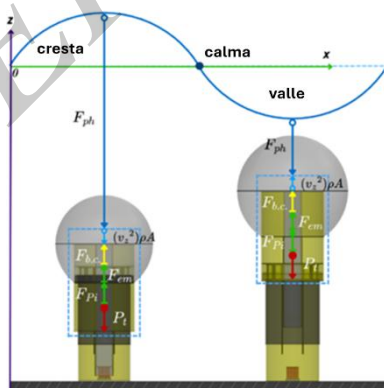


Figura 2. Sistema de fuerzas.

2.3. Descripción geométrica de las ondas mecánicas y Potencial energético del Océano Pacífico.

Las ondas mecánicas se propagan a través de un medio elástico, generando una perturbación temporal sin transportar materia (Universidad Iberoamericana., 2003). Estas ondas se caracterizan por parámetros como la altura (H), la amplitud (a), la profundidad del líquido (h) y la longitud de onda (L) (Dean & Dalrymple, 1991). Además, es importante considerar otras variables relevantes como el período (T), la frecuencia (f) y la celeridad (C), las cuales permiten describir con mayor precisión el comportamiento de las olas (Dean & Dalrymple, 1991; Santana Guzmán, 2021; Boccotti, 2014)(Dean & Dalrymple, 1991) (Santana Guzmán, 2021) (Boccotti, 2014).

La longitud de onda, L , se puede calcular por medio de la ecuación (1), (Caballero Santos, 2011; Fernández Chozas, 2008; Andrade, 2014):

$$L = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (1)$$

El número de onda, k , es el número de veces que vibra una onda con respecto a su longitud, L , y se determina mediante la ecuación (2), (Ayub et al., 2011):

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2)$$

La velocidad vertical de la partícula, v_z , se puede estimar la velocidad a la que va a operar el convertidor. La velocidad de una onda senoidal se obtiene de la ecuación (3), (Folley, 2017):

$$v_z = \omega \cdot a \cdot \cos(\omega t - kx) \quad (3)$$

La velocidad angular, ω , se obtiene a partir de la ecuación (4) (Ayub et al., 2011):

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

La celeridad, C , se calcula mediante la ecuación (5), (Folley, 2017):

$$C = \frac{g \cdot T}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi \cdot d}{L}\right) \quad (5)$$

Para calcular el potencial energético disponible, es necesario determinar la longitud de onda, L . En la Tabla 1 se presentan los valores de altura de ola H y su respectivo período T , obtenidos de (Young Hugh D. & Roger A. Freedmas, 2009). Este estudio considera dos zonas geográficas del Pacífico mexicano con diferentes alturas de ola, con el objetivo de ofrecer un panorama más amplio del recurso energético. La mayor altura de ola se registra en Baja California Norte y Sur “B.C.S.-N.”, mientras que Michoacán “M.i.c.h.” presenta un valor intermedio, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Altura de la ola y periodo en el Océano Pacífico (Young Hugh D. & Roger A. Freedmas, 2009).

Zona geográfica	H (m)	T (s)
-----------------	---------	---------

Baja California Norte y Sur	2	9.2
Michoacán	1.7	9.7

La potencia de la onda, P_w , se emplea la ecuación (6), (Erick Iván García Santiago., 2019):

$$P_w = E \cdot C_g \quad (6)$$

En donde, E , es la energía total contenida, se determina a través de la ecuación (7), (Boccotti, 2014):

$$E = \langle \int_0^{\eta_{se}} \rho g z \rangle + \langle \int_{-h}^{\eta_{se}} \frac{1}{2} \rho (v_y^2 + v_z^2) dz \rangle \quad (7)$$

Donde, η_{se} es la elevación de la superficie de la onda, z es la distancia del eje vertical de la coordenada con origen en el nivel de agua en reposo, v_y velocidad de la partícula en el eje “y”, v_z velocidad de la partícula en el eje “z”, ρ es la densidad del agua del océano y, g es la gravedad. La velocidad a la que la energía se propaga se le denomina velocidad de grupo, C_g , y se obtiene a través de la ecuación (8), (Folley, 2017):

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\frac{4\pi d}{L}}{\sinh(\frac{4\pi d}{L})} \right] \cdot C \quad (8)$$

Utilizando las ecuaciones antes descritas, se estimó el potencial energético de los estados de “B.C.S.-N.” y “M.i.c.h.”.

2.4. Sistema de fuerzas sobre el convertidor.

La boya del convertidor cumple una función fundamental en el proceso de conversión de energía. Durante el paso del valle de la ola, la presión hidrostática sobre el sistema es mínima, lo que permite que la boya alcance su máxima fuerza de empuje. En esta condición, el convertidor asciende debido al principio de Arquímedes. A medida que la ola transita hacia la cresta, la presión hidrostática aumenta progresivamente. Como resultado, la boya se comprime, reduce su volumen y pierde capacidad de empuje, lo que provoca el descenso del trasladador, como se muestra en la Figura 2. La fuerza generada en este proceso puede estimarse aplicando la ecuación del momento lineal para un volumen de control fijo, estacionario, con flujo incompresible y uniforme. Esta formulación se utiliza para analizar el sistema de fuerzas cuando el valle de la ola actúa sobre el convertidor, como se expresa en la ecuación (9).

$$F_{b.v.} + F_{pi} + F_{em} + [\rho(v_z^2)A] > F_{ph} + P_t \quad (9)$$

En donde, $F_{b.v.}$, es la fuerza de empuje de la boya cuando el valle ocurre, F_{pi} , es la fuerza debida a la presión interna del convertidor, F_{em} , es la fuerza de empuje del trasladador, F_{ph} , es la fuerza hidrostática y, W_t , es el peso del trasladador. Las fuerzas agrupadas a la izquierda representan las fuerzas ascendentes y del lado derecho son las fuerzas descendentes. El sistema de fuerzas del trasladador cuando la cresta ocurre, se expresa en la ecuación (10):

$$F_{b.c.} + F_{pi} + F_{em} < [\rho(v_z^2)A] + F_{ph} + W_t \quad (10)$$

En donde se espera que las fuerzas ascendentes sean menores, para que el trasladador pueda descender.

2.5. Generador eléctrico lineal.

El generador eléctrico lineal es la máquina responsable de la transformación de la energía mecánica del trasladador en energía eléctrica, a continuación, se muestran los parámetros para el cálculo de la potencia desarrollada, en donde se debe considerar el número de pares de polos, “n.p.p.”, o imanes, para ello se tomó en consideración 22 pares de polos, dato considerado de (Polinder et al., 2004b), un factor determinante en la potencia entregada por el convertidor es el número de polos de los imanes permanentes y la temperatura de operación, por lo cual, en esta primera etapa se diseñó con una temperatura de 40 °C. La velocidad de la fuerza magnetomotriz inducida, ω_E , se determina a través de la ecuación (11) (Andrade, 2014) en donde, v , es la velocidad lineal y, τ_p , es el paso polar, el flujo magnético máximo, Φ_f , se obtiene mediante la ecuación (12) (Stephen J. Chapman, 2000), en donde, B , es la densidad del flujo magnético y, A , es el área superficial, la potencia del generador lineal, P_{PTO} , se obtiene a través de la ecuación (13) (Andrade, 2014):

$$\omega_E = \frac{2 \cdot \pi \cdot v}{2 \cdot \tau_p} \quad (11)$$

$$\Phi_f = B \cdot A \quad (12)$$

$$P_{PTO} = \frac{3}{2} \cdot \omega_E \cdot \Phi_f \cdot I \quad (13)$$

En donde, I , es la corriente. Es importante mencionar que el convertidor contiene dos generadores eléctricos lineales idénticos, por lo que la potencia total se multiplica por dos. La eficiencia del convertidor, η , se determina mediante la ecuación (14) (Folley, 2017):

$$\eta = \frac{P_T}{P_w} \quad (14)$$

3. Resultados y discusión

Utilizando las ecuaciones (1) a (8) y los datos de la Tabla 1, se estimaron las potencias de las olas en las regiones de Baja California Norte y Sur y Michoacán, cuyos resultados se presentan en la Tabla 2. Los valores obtenidos indican que “B.C.S.-N.” es la zona más favorable para el diseño e instalación del “W.E.C.” Con base en la potencia de ola estimada para “B.C.S.-N.”, se calcularon las fuerzas que actúan sobre el convertidor en tres condiciones: cresta, calma y valle de la ola, utilizando las ecuaciones (3), (9) y (10). Estos resultados se muestran en la Tabla 3. A partir de dichas fuerzas, se propusieron las dimensiones de los componentes principales del “W.E.C.”, las cuales se detallan en la Tabla 4.

Tabla 2. Potencia de la ola, P_w .

Estado	(kW/m)
Baja California Norte y Sur	36.21
Michoacán	27.59

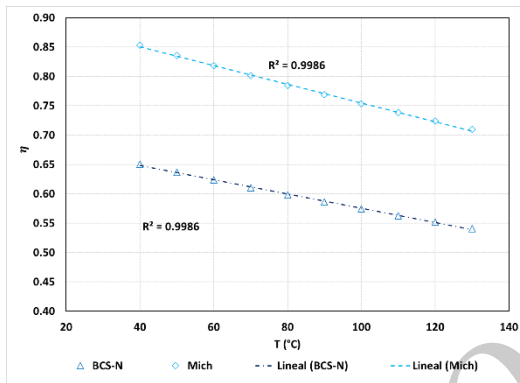
Tabla 3. Fuerzas actuando sobre el trasladador en “B.C.S.-N.”.

Posición	Fuerza (kN)
Valle	29.88
En Calma	34.93
Cresta	39.97

Tabla 4. Partes principales “W.E.C.”

Parte	Ancho (m)	Largo (m)
Boya	1.23	1.23
Casco Superior	0.7	1.0
Casco Inferior	0.6	1.32

Teniendo las dimensiones del “W.E.C.” y utilizando las ecuaciones (11) a (14), se procede a realizar el análisis energético, la estimación del desempeño del convertidor en los estados de “B.C.S.-N.” y “M.i.c.h.”, en función de la temperatura de trabajo del generador lineal y con una configuración de 22 pares de polos, los resultados se muestran en la Figura 3:


Figura 3. Eficiencia con 22 pares de polos.

Como se muestra en la Figura 3, la eficiencia, η , dependerá directamente de la variación de la temperatura. La eficiencia del convertidor se modela por medio de las ecuaciones (15) y (16) para “M.i.c.h.” y “B.C.S.-N.”, respectivamente, como se observa, el factor de calidad es $R^2 \approx 1$.

$$\eta_{Mich} = 1.0078 - 0.0023T \quad (15)$$

$$\eta_{BCS-N} = 0.7679 - 0.0018T \quad (16)$$

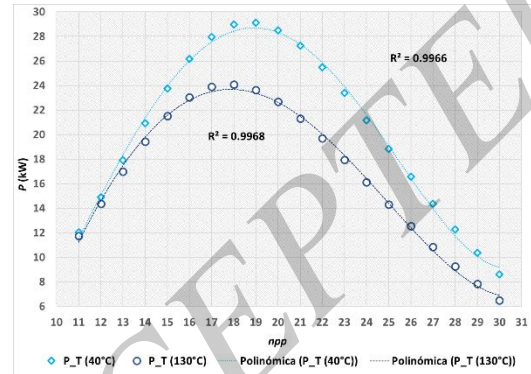
En “M.i.c.h.”, el “W.E.C.” alcanza una eficiencia máxima del 85% a 40 °C y una mínima del 71% a 130 °C. En contraste, “B.C.S.-N.”, la eficiencia varía entre 65% y 54% en el mismo rango de temperatura. Estos resultados muestran que, con una configuración de 22 pares de polos en el generador lineal, el desempeño en “M.i.c.h.” es superior al de “B.C.S.-N.” Debido a esta diferencia, se analizó cómo influye el número de pares de polos “n.p.p.” en la potencia entregada por el generador, con el objetivo de identificar la configuración óptima para mejorar la eficiencia en “B.C.S.-N.”. La Figura 4 muestra la variación de la potencia generada en función del “n.p.p.”, evaluada a temperaturas de 40 °C y 130 °C.

Los modelos obtenidos ajustan el comportamiento de la potencia del generador en función del “n.p.p.”, desde 11 hasta

30 “n.p.p.”, operando a una temperatura de 40 y 130 °C, ecuaciones (18) y (19), el factor de calidad es $R^2 \approx 1$.

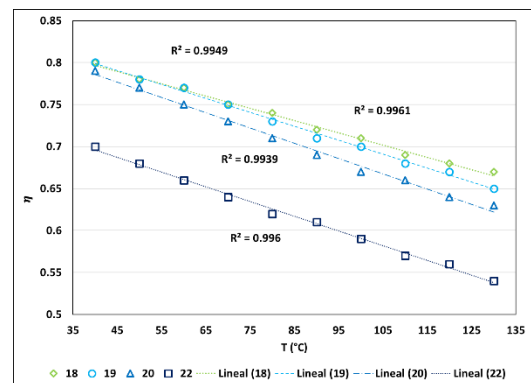
$$P_{40} = 0.001pp^4 - 0.0737pp^3 + 1.6963pp^2 - 12.437pp + 26.439 \quad (18)$$

$$P_{130} = 0.0004pp^4 - 0.0239pp^3 + 0.2423pp^2 - 4.7511pp + 44.637 \quad (19)$$


Figura 4. Potencia total variando el número de pares de polos.

De acuerdo con las curvas mostradas en la gráfica, la mayor potencia entregada por el convertidor se obtiene con configuraciones de 18, 19 y 20 “n.p.p.”. En particular, con 18 “n.p.p.” se alcanzaron potencias de 28.95 kW a 40 °C y 24.09 kW a 130 °C; con 19 “n.p.p.”, de 29.12 kW a 23.63 kW; y con 20 “n.p.p.”, de 28.5 kW a 22.66 kW.

A partir de estos resultados, se comparó la eficiencia del generador para las configuraciones de 18, 19, 20 y la original de 22 “n.p.p.”, como se muestra en la Figura 5. Las ecuaciones (20) a (23) modelan el comportamiento de la eficiencia para cada caso.


Figura 5. Eficiencia del convertidor en “B.C.S.-N.” con 18, 19, 20 y 22 “n.p.p.”.

$$\eta_{18} = 0.8552 - 0.0015T \quad (20)$$

$$\eta_{19} = 0.8652 - 0.0017T \quad (21)$$

$$\eta_{20} = 0.8585 - 0.0018T \quad (22)$$

$$\eta_{22} = 0.7659 - 0.0018T \quad (23)$$

La mayor eficiencia se obtiene con la configuración de 18 “n.p.p.”, alcanzando valores entre 80% y 67% en el rango de temperatura de 40 °C a 130 °C. Con 19 “n.p.p.”, la eficiencia varía entre 80% y 65%, mientras que con 20 “n.p.p.” se sitúa entre 79% y 63%. En comparación, la configuración original

de 22 “n.p.p.” presenta una eficiencia máxima de 65 % y mínima de 54 %.

Estos resultados confirman que la configuración de 18 “n.p.p.” es la más adecuada para el convertidor en la región de “B.C.S.-N.” Además, el ajuste de los modelos presenta un alto grado de confiabilidad, con un coeficiente de calidad de $R^2 \approx 1$.

Para cerrar este trabajo se procede a comparar la eficiencia de algunos convertidores undimotrices con respecto a la eficiencia del “W.E.C.” de este trabajo. En la Tabla 5 se indican los valores de la capacidad de generación de los convertidores, P_T , y el potencial energético, P_w , de las zonas en donde fueron instalados (Mustapa et al., 2017b):

Tabla 5. Potencia generada y potencial energético disponible (Krogstad, n.d.).

W.E.C.	P_T (kW)	P_w (kW/m)
L10	10	40
OPT Power	500	50
AquaBuoy	250	50
Uppsala	4	3.4
WaveBob	131	80
Archimedes Wave Swing	221	40
WaveStar	600	5.2

Utilizando los datos de la Tabla 4 se efectuó el cálculo de la eficiencia, los resultados se muestran en la gráfica de la Figura 6, donde se observa que el “W.E.C.” propuesto en este trabajo tiene una eficiencia competitiva respecto a la mostrada por los otros diseños.

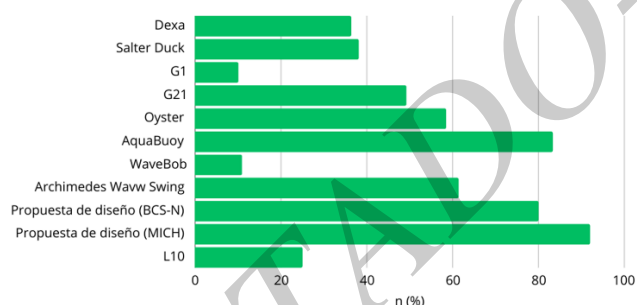


Figura 6. Comparación de la eficiencia con otros diseños.

De los resultados obtenidos se puede observar que, a pesar de su eficiencia competitiva, el diseño del “W.E.C.” presenta limitaciones térmicas significativas, ya que su rendimiento decrece con el aumento de temperatura, afectando la estabilidad operativa en climas cálidos (Hur et al., 2018). Además, no se consideran efectos críticos como corrosión, fatiga y bioincrustación, los cuales reducen la vida útil estructural en ambientes marinos (Price & Figueira, 2017). La ausencia de validación experimental en canal hidrodinámico limita la extrapolación de resultados numéricos (Mercadé Ruiz et al., 2017). Asimismo, el escalamiento del prototipo enfrenta restricciones físicas y económicas que dificultan su transición a escala industrial (García-Teruel & Forehand, 2020). No obstante, el diseño constituye una base sólida para futuras optimizaciones estructurales y térmicas orientadas a su implementación real.

4. Conclusiones

De los resultados obtenidos se llegaron a las siguientes conclusiones:

a) En cumplimiento con el objetivo general, se logró identificar y evaluar el potencial energético de las olas en dos regiones del Pacífico Mexicano: Baja California Sur-Norte y Michoacán. Los cálculos mostraron que “B.C.S.-N.” presenta un 23.8 % más energía disponible (36.21 kW/m) que “M.i.c.h.” (27.59 kW/m), lo que lo posiciona como el sitio más favorable para la instalación del “W.E.C.”, y cumpliendo así con el primer objetivo específico.

b) Alineado con el segundo objetivo específico, el diseño del convertidor tipo Arquímedes demostró ser adecuado para condiciones marinas variables, gracias a su capacidad de captar energía de las olas desde cualquier dirección por lo cual, la eficiencia mecánica del sistema bajo estas condiciones es de 96.17 %, y esto valida el tercer objetivo, al mostrar que la transmisión directa de energía al generador eléctrico lineal minimiza pérdidas en tan solo 3.83 %.

c) Sin embargo, se determinó una menor eficiencia eléctrica en “B.C.S.-N.” respecto a “M.i.c.h.”, a pesar de su mayor recurso energético undimotriz. Esto motivó el cumplimiento del cuarto objetivo específico de optimizar el desempeño del generador eléctrico por medio de la variación de las condiciones de operación, el cual, encontró que operar a 40 °C con 18 pares de polos mejora la eficiencia hasta un 80 %, lo que demuestra la importancia de adaptar el diseño a las condiciones locales.

d) Al comparar estos resultados con otros diseños de convertidores undimotrices (quinto objetivo específico), se concluye que el sistema propuesto es competitivo y viable como alternativa energética renovable.

e) Finalmente se puede concluir, este estudio propone un modelo teórico-energético innovador de un convertidor undimotriz tipo Arquímedes, “W.E.C.”, específicamente adaptado a las condiciones térmicas e hidrodinámicas del Pacífico mexicano, diferenciándose de los diseños europeos tradicionales centrados en aguas frías y profundas (Trueworthy & DuPont, 2020). A través de un análisis térmico-magnético acoplado, se evalúa el desempeño del generador lineal entre 40 °C y 130 °C, una variable crítica poco abordada en la literatura (Tan et al., 2022). La identificación de 18 pares de polos como configuración óptima permite alcanzar eficiencias teóricas del 80 %, superando los valores típicos reportados para climas templados (Farrok et al., 2020). Además, se genera una base de datos energética nacional replicable, y se plantea un diseño modular y compacto con potencial de implementación en comunidades costeras aisladas. Este enfoque representa una contribución significativa hacia la autonomía tecnológica en energías marinas renovables en regiones tropicales (Tay, 2025).

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaria de Investigación y Posgrado por el financiamiento otorgado para la realización de este trabajo por medio del proyecto SIP 20251336; y también los autores agradecen al Laboratorio de Ingeniería Hidráulica Aplicada de la ESIME Unidad Azcapotzalco por las facilidades prestadas para la realización del proyecto.

Referencias

- Andrade, D. E. A. M. , & de la V. J. A. (2014). *Modelado y control de centrales undimotrices con accionamiento directo mediante generador lineal ante oleaje irregular* [Tesis, Universidad de Sevilla]. https://catedraendesa.us.es/documentos/tesis_dan_el_andres_montoya.pdf
- AWS Ocean Energy Ltd. (n.d.). *Archimedes Waveswing MK IV: WES Novel Wave Energy Converter Stage 1 Project: Public Report*. Retrieved October 18, 2025, from https://www.waveenergyscotland.co.uk/media/2ctpvjvo/nw11_aws_wes-public-report.pdf
- Ayub, S., Danish, S. N., & Qureshi, S. R. (2011). A novel, cost-effective design to harness ocean energy in the developing countries. *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, 76, 781–786. https://www.researchgate.net/profile/Shafiq-Qureshi/publication/295757808_A_novel_cost-effective_design_to_harness_ocean_energy_in_the_developing_countries/links/5906dcf6a6fdccd580d384c5/A-novel-cost-effective-design-to-harness-ocean-energy-in-the-developing-countries.pdf
- Boccotti, P. (2014). *Wave mechanics and wave loads on marine structures*. Butterworth-Heinemann. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=oUGAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Boccotti,+P.+ \(2014\).+Wave+mechanics+and+wave+loads+on+marine+structures.+Butterworth-Heinemann.&ots=FPkYcWw6TW&sig=coA2938tkSOxgRKAQXL9m_EJe-g&redir_esc=y#v=onepage&q=Boccotti%2C%20P.%20\(2014\).%20Wave%20mechanics%20and%20wave%20loads%20on%20marine%20structures.%20Butterworth-Heinemann.&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=oUGAAwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Boccotti,+P.+ (2014).+Wave+mechanics+and+wave+loads+on+marine+structures.+Butterworth-Heinemann.&ots=FPkYcWw6TW&sig=coA2938tkSOxgRKAQXL9m_EJe-g&redir_esc=y#v=onepage&q=Boccotti%2C%20P.%20(2014).%20Wave%20mechanics%20and%20wave%20loads%20on%20marine%20structures.%20Butterworth-Heinemann.&f=false)
- Caballero Santos, C. (2011). *Estudio de plantas de producción de energías renovables con aprovechamiento de la energía del mar*.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). *Water wave mechanics for engineers and scientists* (Vol. 2). world scientific publishing company. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=1SM8DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Dean,+R.+G.+,%26+Dalrymple,+R.+A.+\(1991\).+Water+wave+mechanics+for+engineers+and+scientists+\(Vol.+2\).+world+scientific+publishing+company.&ots=H8KY6y58TG&sig=-hs4nae_T0w5WaZe8My6QK0A5RI&redir_esc=y#v=onepage&q=Dean%2C%20R.%20G.%20\(1991\).%20Water%20wave%20mechanics%20for%20engineers%20and%20scientists%20\(Vol.%202\).%20world%20scientific%20publishing%20company.&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=1SM8DQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Dean,+R.+G.+,%26+Dalrymple,+R.+A.+(1991).+Water+wave+mechanics+for+engineers+and+scientists+(Vol.+2).+world+scientific+publishing+company.&ots=H8KY6y58TG&sig=-hs4nae_T0w5WaZe8My6QK0A5RI&redir_esc=y#v=onepage&q=Dean%2C%20R.%20G.%20(1991).%20Water%20wave%20mechanics%20for%20engineers%20and%20scientists%20(Vol.%202).%20world%20scientific%20publishing%20company.&f=false)
- Drew, B., Plummer, A. R., & Sahinkaya, M. N. (2009). A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 223(8), 887–902. <https://doi.org/10.1243/09576509JPE782>
- Erick Iván García Santiago. (2019). *Potencial de la energía undimotriz en costas mexicanas y usos potenciales*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Falcão, A. F. de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 899–918. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Farrok, O., Islam, Md. R., Muttaqi, K. M., Sutanto, D., & Zhu, J. (2020). Design and Optimization of a Novel Dual-Port Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(5), 3409–3418. <https://doi.org/10.1109/TIE.2019.2921293>
- Fernández Chozas, J. (2008). *Una aproximación a la energía de las olas para la generación de electricidad* [Tesis, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://oa.upm.es/1203/>
- Folley, M. (2017a). *Handbook of Ocean Wave Energy* (A. Pecher & J. P. Kofoed, Eds.; Springer Open, Vol. 7). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1>
- Folley, M. (2017b). The wave energy resource. *Handbook of Ocean Wave Energy*, 7, 43–80.
- García Saiz, C. (2015). *Diseño, dimensionado y simulación de un generador lineal para el desarrollo de una boya de generación de energía undimotriz*.
- García-Teruel, A., & Forehand, D. I. M. (2020). Joint optimisation of geometry and mass distribution of wave energy converters. In *Developments in Renewable Energies Offshore* (pp. 81–87). CRC Press.
- Goggins, J., & Finnegan, W. (2014). Shape optimisation of floating wave energy converters for a specified wave energy spectrum. *Renewable Energy*, 71, 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.022>
- González-Ramírez, X., Hernández-Robles, I. A., & Barrios-Piña, H. (2017). Potencial energético undimotriz en nodos costeros de México Parte 1: estimación energética. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 08(6), 05–22. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-06-01>

- Hur, D. S., Jeong, Y. M., Lee, J. L., Kim, I. H., & Lee, W. D. (2018). Energy generation efficiency due to wave overtopping on floating-overflow-type wave energy converter. *Journal of Coastal Research*, 85, 1341–1345.
- Krogstad, H. E., & Å. B. (n.d.). Line wave theory part A. . 2000.
- López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez de Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 413–434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.07.009>
- Mei, C. C., Stiassnie, M. A., & Yue, D. K.-P. (2005). *Theory and applications of ocean surface waves: Part 1: linear aspects*. World Scientific.
- Mercadé Ruiz, P., Ferri, F., & Kofoed, J. (2017). Experimental Validation of a Wave Energy Converter Array Hydrodynamics Tool. *Sustainability*, 9(1), 115. <https://doi.org/10.3390/su9010115>
- Mustapa, M. A., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., Rheem, C.-K., Koh, K. K., & Adnan, F. A. (2017a). Wave energy device and breakwater integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 43–58.
- Mustapa, M. A., Yaakob, O. B., Ahmed, Y. M., Rheem, C.-K., Koh, K. K., & Adnan, F. A. (2017b). Wave energy device and breakwater integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 43–58. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.110>
- Polinder, H., Damen, M. E. C., & Gardner, F. (2004a). Linear PM generator system for wave energy conversion in the AWS. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3), 583–589.
- Polinder, H., Damen, M. E. C., & Gardner, F. (2004b). Linear PM Generator System for Wave Energy Conversion in the AWS. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(3), 583–589. <https://doi.org/10.1109/TEC.2004.827717>
- Price, S., & Figueira, R. (2017). Corrosion Protection Systems and Fatigue Corrosion in Offshore Wind Structures: Current Status and Future Perspectives. *Coatings*, 7(2), 25. <https://doi.org/10.3390/coatings7020025>
- Reikard, G., Robertson, B., & Bidlot, J.-R. (2015). Combining wave energy with wind and solar: Short-term forecasting. *Renewable Energy*, 81, 442–456. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.032>
- Santana Guzmán, M. (2021). *Caracterización de la energía del oleaje en Yucatán*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Mérida.
- Shao, Z., Gao, H., Liang, B., & Lee, D. (2022). Potential, trend and economic assessments of global wave power. *Renewable Energy*, 195, 1087–1102. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.100>
- Stephen J. Chapman. (2000). *Máquinas Eléctricas* (Ana Laura Delgado Rodríguez, Ed.; 5th ed., Vol. 1). Mc Graw Hill Educación. https://frrq.cvg.utn.edu.ar/pluginfile.php/20762/mod_resource/content/1/Maquinas-electricas-Chapman-5ta-edicion-pdf.pdf
- Tan, E. C. D., Harris, K., Tiffit, S. M., Steward, D., Kinchin, C., & Thompson, T. N. (2022). Adoption of biofuels for marine shipping decarbonization: A <sc>price and scalability assessment. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 16(4), 942–961. <https://doi.org/10.1002/bbb.2350>
- Tay, Z. Y. (2025). *Wave Energy Convertors in Tropical Seas*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003387855>
- Trueworthy, A., & DuPont, B. (2020). The Wave Energy Converter Design Process: Methods Applied in Industry and Shortcomings of Current Practices. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 932. <https://doi.org/10.3390/jmse8110932>
- Universidad Iberoamericana. (2003). *Notas de física 1*. https://scholar.google.com/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Universidad+Iberoamericana.+%28s.f.%29.+Notas+para+el+curso+de+F%C3%ADsica+Universitaria+1+%5BMaterial+educativo%5D.+https%3A%2F%2Fibero.mx%2Fcampus%2Fpublicaciones%2Ffisica%2F&btnG=
- Valério, D., Beirão, P., & Sá da Costa, J. (2007). Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing. *Ocean Engineering*, 34(17–18), 2330–2344. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.05.009>
- Yang, S., Tang, P., Huang, Y., Du, Z., Fan, J., & Xiao, G. (2023). Triboelectric Nanogenerators Based on the Archimedes Wave Swing for Water Wave Energy Harvesting: Physics Experiments and Simulations. *Energy Technology*, 11(4). <https://doi.org/10.1002/ente.202201003>
- Young Hugh D., & Roger A. Freedmas. (2009). *Física universitaria* (12th ed., Vol. 1, pp. 502–504). Pearson Educación.