

Numerical simulation of a Point Absorber type wave energy converter in the coastal area of Chorrillos

Milene Francesca Sulca Díaz¹; Jhadira América Flores Chavez²; Franco Canziani Amico³

^{1,2,3}Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20211c247@upc.edu.pe¹, u20211c653@upc.edu.pe², pcigfcan@upc.edu.pe³

Abstract– *The Peruvian coast presents a high potential for wave energy that has not yet been specifically evaluated for small coastal users, such as artisanal fishing associations, particularly in the Chorrillos area. This work evaluates the technical feasibility of a Point Absorber wave energy converter using numerical simulation in MATLAB/WEC-Sim, with the RM3 reference model and representative wave scenarios defined from statistical percentiles. As a case study, real electricity consumption data from the José Silverio Olaya Balandra Association and wave records from 2024 were used. The results indicate that the system can achieve an approximate electricity production of 1165,36 kWh per month, which would cover approximately 43,99 % of the analyzed user's electricity demand. Additionally, a Levelized Cost of Energy (LCOE) of 1,02 USD/kWh was estimated, highlighting the current economic limitations of the technology in its development stage. The study provides a preliminary technical evaluation, based on site-specific numerical modeling, that demonstrates the potential of wave energy as a complementary renewable source for coastal communities in Peru.*

Keywords– *Wave energy, energy diversification, renewable energy.*

Simulación numérica de un convertidor de energía undimotriz de tipo Absorbedor Puntual en la zona costera de Chorrillos

Milene Francesca Sulca Díaz¹; Jhadira América Flores Chavez²; Franco Canziani Amico³
^{1,2,3}Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20211c247@upc.edu.pe¹, u20211c653@upc.edu.pe²,
pcigfcan@upc.edu.pe³

Resumen— El litoral peruano presenta un alto potencial de energía undimotriz que aún no ha sido evaluado de manera específica para pequeños usuarios costeros, como asociaciones de pescadores artesanales, particularmente en la zona de Chorrillos. Este trabajo evalúa la viabilidad técnica de un convertidor de energía undimotriz tipo Point Absorber mediante simulación numérica en MATLAB/WEC-Sim, utilizando el modelo de referencia RM3 y escenarios representativos de oleaje definidos a partir de percentiles estadísticos. Como caso de estudio, se emplearon datos reales de consumo eléctrico de la Asociación José Silverio Olaya Balandra y registros de oleaje correspondientes al año 2024. Los resultados indican que el sistema puede alcanzar una producción eléctrica aproximada de 1165,36 kWh mensuales, lo que permitiría cubrir cerca del 43,99 % de la demanda eléctrica del usuario analizado. Adicionalmente, se estimó un LCOE de 1,02 USD/kWh, evidenciando las limitaciones económicas actuales de la tecnología en su etapa de desarrollo. El estudio aporta una evaluación técnica preliminar, basada en modelamiento numérico sitio-específico, que evidencia el potencial de la energía undimotriz como fuente renovable complementaria para comunidades costeras del Perú.

Palabras clave—Energía undimotriz, diversificación energética, energías renovables.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente necesidad de diversificar la matriz energética y reducir las emisiones de carbono ha impulsado el desarrollo de fuentes renovables marinas, entre las cuales la energía undimotriz destaca por su alta densidad energética y previsibilidad [1], [2]. A diferencia de otras fuentes renovables comunes, como la energía solar o eólica, el oleaje ofrece una disponibilidad continua y un menor impacto ambiental mediante el aprovechamiento del movimiento de las olas.

Los convertidores de energía de las olas han sido objeto de múltiples estudios en los últimos años, como el caso del Point Absorber, el cual se ha consolidado como uno de los diseños más eficientes y versátiles de tecnología undimotriz, especialmente en mares de energía moderada pues, su principio de funcionamiento se basa en el movimiento vertical (*heave*) de una boya flotante acoplada a un sistema de toma de fuerza (PTO), es capaz de transformar la energía cinética del oleaje en potencia mecánica útil [3], [4], como se evidencia en la Fig. 1.

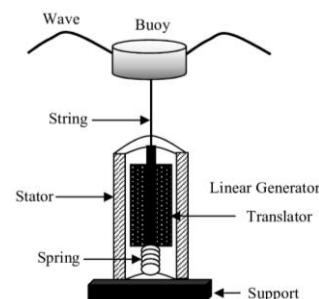


Fig. 1 Estructura de dispositivo undimotriz Point Absorber según [4].

En el contexto peruano, se destaca que el potencial energético del litoral costero registra valores superiores a 15 kW por metro de ola, evidenciando la disponibilidad del recurso undimotriz para su aprovechamiento energético en zonas costeras, como lo es Chorrillos [5].

Sin embargo, a pesar de este potencial, existe una limitada cantidad de estudios específicos que evalúen la viabilidad técnica de convertidores undimotrices orientados a pequeños usuarios costero y que integren las condiciones locales de oleaje, el comportamiento dinámico de dispositivos tipo *Point Absorber* y la demanda eléctrica real de infraestructuras pesqueras artesanales, lo que dificulta la toma de decisiones energéticas informadas [5].

Por otro lado, [6] y [7] destacan la relevancia de la integración de herramientas de modelamiento y simulación numérica en la etapa de diseño y dimensionamiento de sistemas undimotrices, como MATLAB/WEC-Sim, permitiendo predecir inicialmente el comportamiento hidrodinámico del sistema, optimizar parámetros operativos y reducir costos experimentales.

Por ello, el objetivo general del presente estudio es evaluar la viabilidad técnica de un convertidor de energía undimotriz tipo *Point Absorber* para el abastecimiento parcial de energía eléctrica en la zona costera de Chorrillos, mediante simulación numérica, utilizando el modelo de referencia RM3 y escenarios representativos de oleaje, fortaleciendo su relevancia como una alternativa existente para la diversificación de la matriz energética y proporcionando una evaluación técnica preliminar basada en un contexto real de consumo eléctrico mediante la planificación energética local y su aplicación en la zona costera del Perú [8], [9].

En este contexto, el presente estudio contribuye a la evaluación del potencial de la energía undimotriz en el escenario peruano, con especial énfasis en aplicaciones a

pequeña escala orientadas a comunidades costeras, donde la diversificación de la matriz energética aún es limitada. Asimismo, la investigación integra datos reales de consumo eléctrico con modelamiento numérico del recurso undimotriz, lo que permite estimar de manera más precisa la cobertura energética potencial en un área de estudio específica.

II. METODOLOGÍA

A. Caracterización de la demanda eléctrica del área de estudio

Se recopilaron los registros mensuales de consumo eléctrico (kWh) correspondientes al periodo junio 2024 – marzo 2025 de la Asociación José Silverio Olaya Balandra de Pescadores Artesanales, ubicada en la Playa Pescadores, distrito de Chorrillos, Lima (Perú), según lo descrito en la metodología planteada (Fig. 2).

Los datos fueron obtenidos mediante recibos de luz proporcionados por la asociación y fueron organizados mediante un tratamiento estadístico descriptivo y numérico, identificando los valores máximos, mínimos, promedios y la tendencia mensual de consumo. Adicionalmente, la información tratada será representada gráficamente para distinguir, de manera visual, su tendencia y comportamiento estacional.

Esta información permitió establecer la línea base energética del centro pesquero, utilizada posteriormente para evaluar la correspondencia entre la demanda eléctrica y el potencial undimotriz disponible.

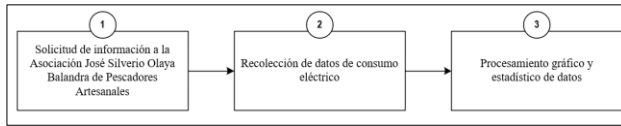


Fig. 2 Esquema de metodología planteada.

B. Caracterización del recurso undimotriz

Se recopilaron los datos de altura significativa (H_s) y período de oleaje (T_s) correspondiente al año 2024 en la Playa Pescadores (Chorrillos), los cuales son obtenidos del software Nautide y registros de la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú.

Los valores promedio mensuales se resumen en la Tabla I, que sirvió como base para el cálculo del potencial energético del oleaje.

TABLA I
ALTURA Y PERIODO SIGNIFICATIVO MENSUAL

Mes	Altura significativa (m)	Periodo significativo (s)
Enero	0,896	14,419
Febrero	0,998	14,772
Marzo	1,063	14,590
Abril	1,240	14,753
Mayo	1,391	14,487

Mes	Altura significativa (m)	Periodo significativo (s)
Junio	1,581	14,553
Julio	1,901	12,384
Agosto	1,657	12,368
Septiembre	1,505	12,090
Octubre	1,478	12,723
Noviembre	1,119	12,577
Diciembre	1,204	12,629

Se identificó que la mayor altura del oleaje se reflejó en los meses de julio y agosto, con 1,901 y 1,657 metros respectivamente.

C. Cálculo del potencial energético del oleaje

El potencial energético del oleaje (P) de la Playa Pescadores, Chorrillos a partir de la siguiente fórmula [10].

$$P = \frac{\rho g^2}{32\pi} \cdot H_s^2 T_s \quad (1)$$

Donde:

P : Potencial energético de las olas $\left(\frac{kW}{m}\right)$

p : Densidad del agua $\left(1027 \frac{kg}{m^3}\right)$

g : gravedad $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

T_s : Periodo significativo de las olas (s)

H_s : Altura significativa de las olas (m)

Este cálculo permitió estimar la variación mensual del potencial undimotriz disponible en la zona de estudio.

D. Selección de escenarios de oleaje

Para la simulación numérica se definieron tres escenarios representativos de oleaje, seleccionados a partir de percentiles estadísticos de la altura significativa:

- **P25 (oleaje bajo)**: escenario conservador, asociado a condiciones de menor energía.
- **P50 (oleaje medio)**: escenario representativo de las condiciones promedio del sitio.
- **P75 (oleaje alto)**: escenario favorable, asociado a condiciones energéticas elevadas.

La selección de estos percentiles permite evaluar el desempeño del convertidor undimotriz bajo diferentes condiciones operativas y analizar la robustez del sistema frente a la variabilidad natural del oleaje.

E. Modelamiento de dispositivo de conversión undimotriz

El dispositivo propuesto corresponde a un convertidor undimotriz tipo Point Absorber [11], seleccionado por su simplicidad estructural y buena eficiencia en mares de energía moderada, además de contar con estudios previos de simulación con la herramienta WEC-Sim. El sistema está constituido por:

- **Boya flotante cilíndrica**, encargada de absorber la energía de las olas mediante el movimiento vertical (*heave*).
- **Estructura de anclaje tipo catenaria**, que mantiene la estabilidad del dispositivo.
- **Sistema de toma de fuerza** (Power Take-Off, PTO), conformado por un amortiguador lineal y un resorte que transforman el movimiento en energía mecánica aprovechable.

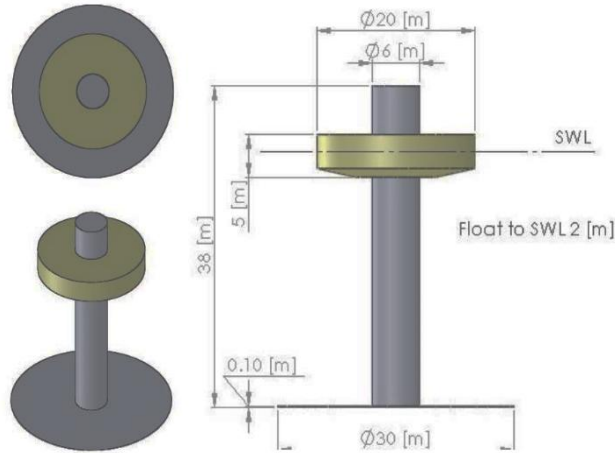


Fig. 3. Dimensiones del dispositivo Point Absorber [11].

El sistema se modeló como un Point Absorber de tipo boya flotante acoplado a un sistema de toma de fuerza lineal (PTO) y cuenta con los siguientes parámetros a escala real:

- Diámetro del flotador: 20 metros
- Diámetro del eje central: 6 metros
- Diámetro de la base de anclaje: 30 metros
- Altura del dispositivo: 38 metros
- Diámetro: 1,2 m
- Altura total: 0,8 m

El dispositivo propuesto corresponde a un convertidor undimotriz tipo Point Absorber [11], seleccionado por su simplicidad estructural y buena eficiencia en mares de energía moderada, además de contar con estudios previos de simulación mediante la herramienta WEC-Sim, tal como se muestra en la Fig. 3.

F. Configuración de la simulación numérica

El modelo consideró dos cuerpos principales:

- **Cuerpo flotante (float)**: Representa la boya captadora de energía, cuya masa se determinó en equilibrio con el volumen de agua desplazado.
- **Cuerpo fijo o placa de referencia (spar/plate)**: Actúa como base reactiva del sistema.

Ambos cuerpos se definieron a partir de los datos hidrodinámicos contenidos en el archivo rm3.h5,

complementados con sus respectivas geometrías 3D (*float.stl* y *plate.stl*) y momentos de inercia específicos.

La validez del modelo se sustenta en su uso extendido en la literatura especializada y en la verificación del comportamiento dinámico del sistema, evaluando la estabilidad numérica y la respuesta en movimiento vertical (*heave*) bajo oleaje irregular.

El oleaje fue modelado mediante un espectro de energía, específicamente el espectro de Pierson–Moskowitz, el cual describe estados de mar completamente desarrollados generados por vientos persistentes [12].

La selección del espectro se justifica por aplicación en la literatura científica preliminar de energía undimotriz debido a su capacidad de representar condiciones promedio de oleaje en aguas profundas cuando se carece de datos espectrales detallados, así como su formulación simplificada y robusta [12], [13].

La simulación se ejecutó en el entorno MATLAB/WEC-Sim utilizando el modelo de referencia RM3, el cual permite representar el comportamiento hidrodinámico de dispositivos tipo Point Absorber mediante el uso de coeficientes de radiación, excitación y matrices de masa añadida, cuyos parámetros fueron definidos a partir de archivos hidrodinámicos (rm3.h5) y geometrías tridimensionales, garantizando una representación consistente del sistema [14].

Cada simulación se ejecutó durante un intervalo de 3600 s, duración suficiente para alcanzar condiciones de régimen estacionario en sistemas sometidos a oleaje irregular, permitiendo obtener estimaciones representativas de la respuesta dinámica y de la potencia absorbida por el dispositivo [15].

El análisis se centró en el movimiento vertical (*heave*), el cual es considerado el modo predominante de captura de energía en dispositivos Point Absorber, debido a que estos sistemas aprovechan la oscilación vertical del flotador inducida por el oleaje para accionar el sistema de toma de potencia, el principal mecanismo de conversión de energía del oleaje en potencia mecánica [16], [17].

G. Modelado del sistema de conversión y producción eléctrica

El sistema de conversión eléctrica del dispositivo undimotriz se representó de forma virtual en el entorno MATLAB/Simulink, considerando la cadena de conversión energética desde la captura mecánica hasta la entrega de energía eléctrica utilizable.

El sistema de toma de fuerza (PTO) se considera como elemento de conversión que transforma el movimiento oscilatorio en potencia mecánica aprovechable, permitiendo estimar el desempeño energético a través del modelo de referencia RM3 implementado en WEC-Sim, el cual incorpora un sistema de conversión simplificado basado en parámetros hidrodinámicos y de amortiguamiento [10].

Cada componente se modeló mediante bloques equivalentes de desempeño, parametrizados con sus eficiencias nominales industriales (Tabla II), con el fin de estimar las pérdidas en cada etapa del proceso para la evaluación preliminar de sistemas de conversión energética [18].

TABLA II
COMPONENTES DE CONVERSIÓN ELÉCTRICA

Componente	Función	Eficiencia
Gearbox	Incrementar las RPM	95 %
Generador lineal	Convertir potencia mecánica en eléctrica	92 %
Rectificador	Convertir la salida trifásica AC en corriente continua (DC)	98 %
Cables de transmisión	Simular pérdida por conducción eléctrica	99 %
Inversor	Convertir la salida DC en corriente alterna (AC)	95 %
Batería	Almacenamiento de energía.	95 %
Cables submarinos	Transmisión de energía	99 %

H. Cálculo de la producción eléctrica del sistema.

Para estimar la cantidad de energía eléctrica generada por el dispositivo undimotriz tipo Point Absorber, se empleó una expresión que considera la potencia mecánica absorbida por el sistema, la eficiencia global de conversión y el factor de planta o *capacity factor* del dispositivo [19].

La producción eléctrica de un sistema de generación undimotriz está determinada por la potencia nominal del dispositivo, la disponibilidad del recurso, la eficiencia global del sistema y el factor de planta, que refleja el aprovechamiento real del potencial energético a lo largo del tiempo [19].

Esta metodología es aplicable a dispositivos de tipo Point Absorber, cuyo factor de planta suele encontrarse entre 0,1 y 0,2, dependiendo de las condiciones del oleaje y del diseño del sistema, permitiendo evitar la sobreestimación de la producción energética en una etapa preliminar del análisis [20], [21], [22].

De esta manera, la energía mensual generada se obtiene multiplicando la potencia mecánica simulada, la eficiencia total, el factor de planta y el tiempo de operación del sistema, tal como se muestra en la siguiente expresión [19]:

$$E = P_{mec} \cdot \eta_{sistema} \cdot FP \cdot T_{op} \quad (2)$$

La eficiencia global del sistema ($\eta_{sistema}$) integra las pérdidas asociadas a los componentes de conversión eléctrica, tales como el generador, el sistema de transmisión, el rectificador y el inversor, conforme a los valores definidos en la Tabla II.

El factor de planta se utilizó para representar el aprovechamiento real del recurso undimotriz a lo largo del tiempo, considerando la variabilidad del oleaje y las condiciones operativas del sistema. Para el presente estudio se adoptó un valor conservador de 0,10, acorde con rangos

reportados para dispositivos tipo Point Absorber en etapas preliminares de evaluación [21], [22].

I. Cálculo de la cobertura eléctrica

La estimación de la cobertura eléctrica del sistema undimotriz permite determinar el grado de abastecimiento que podría brindar el dispositivo frente a una demanda eléctrica específica, como es consumo eléctrico de la Asociación de Pescadores de Chorrillos.

La metodología se fundamenta en la determinación de la energía eléctrica mensual generada y su comparación con la demanda eléctrica mensual de la asociación [19], [23].

De este modo, la cobertura se expresa como el porcentaje de la demanda que puede ser satisfecho por el dispositivo undimotriz, conforme a la siguiente relación general:

$$Cobertura\ eléctrica\ (\%) = \frac{E_{generada}}{E_{demanda}} \cdot 100 \quad (3)$$

Este indicador permite evaluar la factibilidad del sistema undimotriz como fuente complementaria de energía renovable para comunidades costeras.

J. Análisis de sensibilidad paramétrica

Con la finalidad de evaluar la influencia de los parámetros clave en la producción energética del sistema, se realiza el análisis de sensibilidad paramétrica considerando variaciones en el factor de planta (FP) del recurso.

Se definieron rangos representativos para cada parámetro, en función de valores reportados en investigaciones previas para dispositivos tipo Point Absorber, evaluando su impacto e influencia sobre la energía eléctrica mensual.

Este análisis permite identificar el grado de dependencia del modelo respecto al factor de planta y estimar la incertidumbre asociada a la producción energética obtenida.

K. Análisis técnico – económico preliminar

De manera complementaria, se desarrolló una estimación económica preliminar basada en el cálculo del Costo Nivelado de Energía (LCOE), ampliamente utilizado para evaluar la viabilidad de tecnologías de generación eléctrica [24].

El costo de inversión inicial (CAPEX) se estimó utilizando valores referenciales reportados en la literatura para dispositivos undimotrices tipo Point Absorber, los cuales se expresan en función de la potencia instalada (USD/kW), reflejando el estado actual de desarrollo de la tecnología [6], [8].

Adicionalmente, se incorporó una estimación simplificada de los costos de operación y mantenimiento (OPEX), los cuales fueron expresados como un porcentaje del CAPEX, considerando valores típicos para tecnologías marinas en fase de desarrollo [25]. En este sentido, diversos estudios sobre tecnologías de energía marina indican que

dichos costos suelen oscilar entre el 2 % y 5 % del CAPEX anual [25], [26].

Por lo tanto, se adoptó un valor del 3 % del CAPEX anual, al considerarse representativo y consistente con un enfoque preliminar para tecnologías en etapa de desarrollo.

Para el cálculo del LCOE se empleó una formulación extendida que considera tanto los costos de inversión como los costos de operación acumulados a lo largo de la vida útil del sistema, de acuerdo con metodologías ampliamente utilizadas en la evaluación de energías renovables [27].

$$LCOE = \frac{(I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{M_t + F_t}{(1+r)^t})}{(\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t})} \quad (4)$$

Donde I_0 corresponde a la inversión inicial, M_t a los costos de operación y mantenimiento en el año t , E_t a la energía generada, r a la tasa de descuento y n a la vida útil del sistema.

El análisis se desarrolló bajo un enfoque simplificado, asumiendo la constancia del OPEX y de la producción energética en el tiempo, así como la exclusión de la inflación, enfoque que permite obtener una primera aproximación del desempeño económico del dispositivo y establecer un marco comparativo con otras tecnologías de generación renovable.

III. RESULTADOS

A. Análisis del perfil de consumo eléctrico

Se obtuvo el *perfil del consumo eléctrico* correspondiente al periodo junio 2024 – marzo 2025 de la Asociación José Silverio Olaya Balandra, identificándose variaciones mensuales y una tendencia estable del consumo energético durante el periodo evaluado, teniendo en cuenta a los mercados y oficinas administrativas del área de estudio.

B. Resultados del análisis del consumo eléctrico

El análisis del consumo eléctrico de la Asociación José Silverio Olaya Balandra de Pescadores Artesanales permitió identificar una demanda promedio de 2649 kWh/mes durante el periodo junio 2024 – marzo 2025.

La Fig. 4 muestra la tendencia mensual del consumo eléctrico, donde se observa un incremento sostenido durante los meses de verano, asociado al aumento de las actividades pesqueras y al uso intensivo de equipos de refrigeración y bombeo.

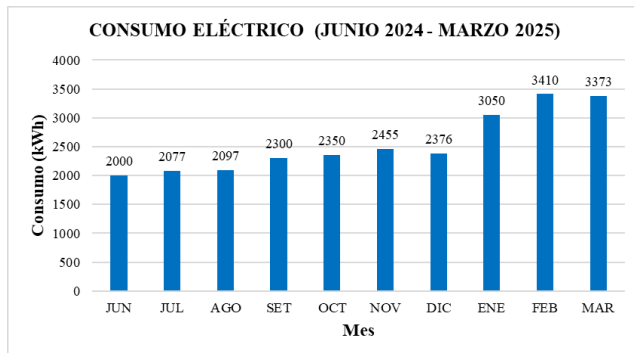


Fig. 4 Consumo eléctrico mensual de electricidad.

Estos resultados permiten establecer una línea base de demanda energética para la simulación del sistema undimotriz, identificando los periodos de mayor necesidad eléctrica y su posible cobertura mediante energía del oleaje.

C. Análisis de la altura del oleaje

El análisis de la altura significativa del oleaje mostró que los valores más elevados se registraron durante los meses de julio y agosto, con alturas de 1,901 y 1,657 m respectivamente, evidenciando una variación estacional del régimen de oleaje, tal como se aprecia en la Fig. 5.

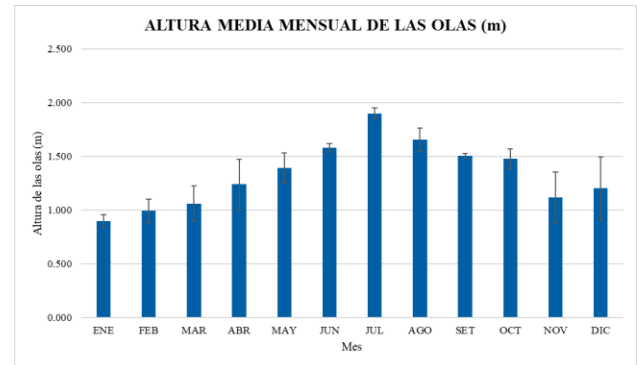


Fig. 5 Alturas medias mensuales del oleaje de Chorrillos en 2024.

D. Potencial energético del oleaje

A partir de los valores mensuales de altura y periodo del oleaje obtenidos en la metodología, se calculó el potencial energético promedio.

En la Fig. 6 se muestra su variación durante el año 2024, evidenciándose un aumento progresivo entre los meses de mayo y julio, correspondiente al periodo de mayor intensidad del oleaje invernal, identificándose dichos meses como los más favorables para el aprovechamiento energético.

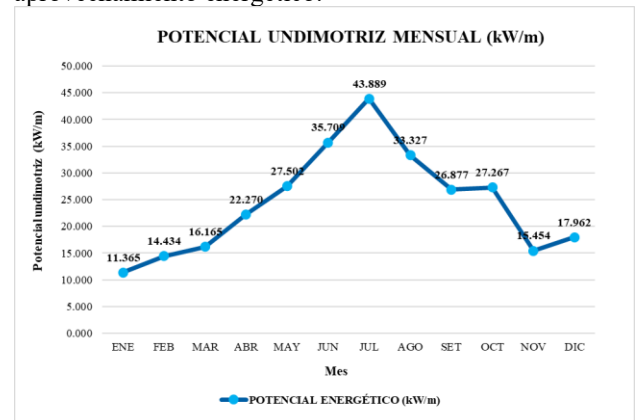


Fig. 6 Potencial undimotriz mensual

Posteriormente, se calculó el potencial undimotriz promedio del oleaje de Chorrillos, teniendo como resultado 24,352 kW/m.

Los resultados demuestran que la Playa Pescadores presenta condiciones óptimas para el aprovechamiento de la energía de las olas, respaldando su potencial técnico para

alimentar de forma parcial la demanda eléctrica identificada anteriormente.

E. Selección y modelado del convertidor undimotriz

El sistema propuesto corresponde a un convertidor undimotriz tipo Point Absorber, seleccionado por su simplicidad estructural y eficiencia en mares de energía moderada, cuyo modelo fue desarrollado mediante la herramienta WEC-Sim, permitiendo evaluar su comportamiento frente a diferentes condiciones marinas, tal como se muestra en la Fig. 8.

F. Simulación numérica y estructura del sistema

Se realizó la simulación del comportamiento del dispositivo en los tres niveles y periodos del oleaje, así como el cálculo de la potencia mecánica promedio, obteniendo los resultados según la Fig. 7.

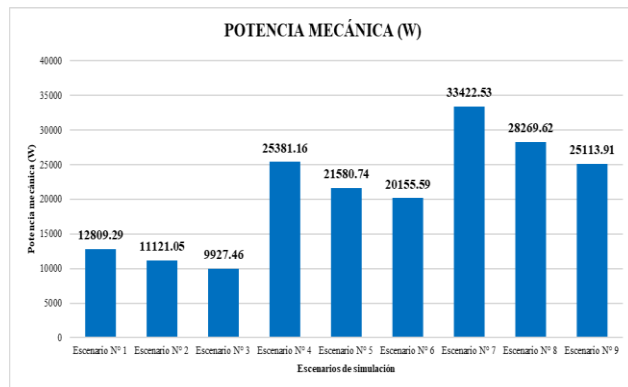


Fig. 7 Potencia mecánica del Point Absorber en oleaje medio.

Para la representación del escenario de simulación utilizado en el diseño del sistema undimotriz se seleccionó la mediana de las potencias simuladas, debido a la distribución no normal de los datos y la alta variabilidad entre los valores mínimos y máximos de potencia.

Esta elección permite representar un escenario técnicamente realista y estadísticamente robusto, evitando tanto la subestimación asociada a condiciones de oleaje desfavorables como la sobreestimación derivada del uso exclusivo de escenarios extremos.

En este sentido, el escenario N° 5 corresponde a la mediana de las potencias simuladas, con un total de 21580,74 W, que se utilizará como base para el diseño del sistema undimotriz. Este escenario se caracteriza por parámetros hidrodinámicos definidos a partir de los datos analizados correspondientes a un estado de mar intermedio, donde se registra una altura significativa $H_s = 1,388$ m y un periodo energético $T = 13,6$ s, los cuales fueron las variables de entrada para el modelo numérico en WEC-Sim.

En la Fig. 8 se muestran los resultados asociados al escenario seleccionado, en relación con el comportamiento del dispositivo al movimiento del oleaje.

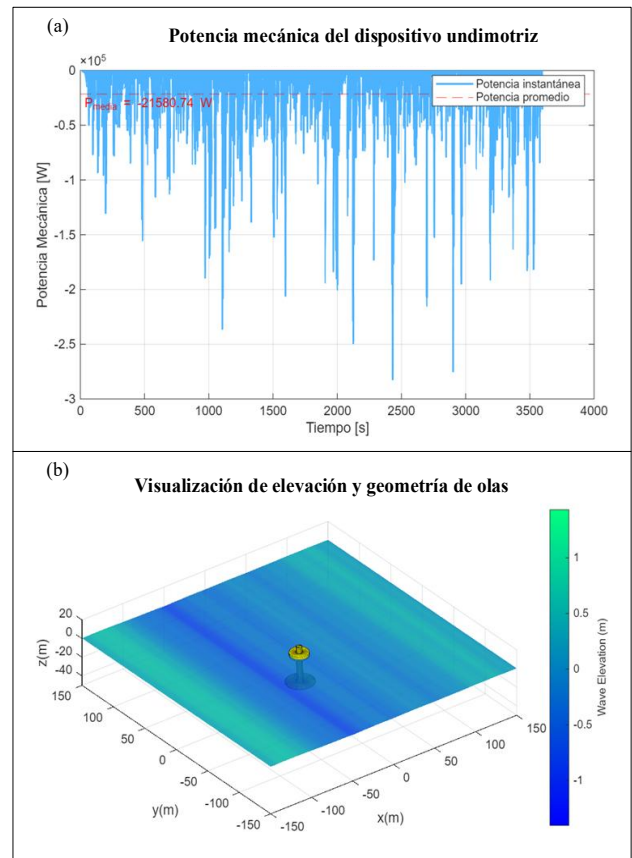


Fig. 8 Resultados de simulación en alturas de ola en el escenario N° 5.

Posteriormente, se procedió a diseñar y seleccionar los componentes del sistema de generación undimotriz, para proceder con el cálculo de producción eléctrica recibida a partir de un dispositivo WEC Point Absorber.

En la Fig. 9 se muestra el esquema estructural del sistema propuesto, junto a los componentes considerados para la producción de energía útil.

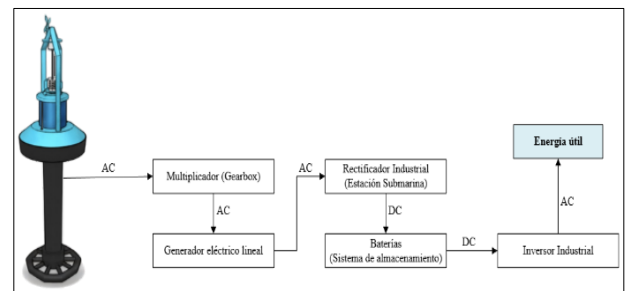


Fig. 9 Esquema del sistema de generación eléctrica undimotriz.

G. Estimación de la potencia mecánica del sistema

A partir de la simulación del comportamiento dinámico del dispositivo undimotriz, se obtuvo una potencia mecánica de 21580,74 W, correspondiente al escenario seleccionado a partir de la mediana de las potencias simuladas bajo diferentes condiciones de oleaje.

Este valor se empleó para el dimensionamiento preliminar del sistema de generación eléctrica, al reflejar

de manera realista el desempeño del convertidor bajo condiciones operativas típicas, evitando la sobreestimación asociada a escenarios extremos.

De este modo, la estimación de la producción eléctrica se fundamenta en un enfoque conservador y técnicamente consistente, adecuado para una evaluación preliminar de la viabilidad del sistema undimotriz como fuente renovable complementaria.

Asimismo, cabe precisar que este valor representa una condición promedio del sistema, por lo que su desempeño real puede experimentar variaciones en función de la dinámica estacional del oleaje.

En este sentido, la potencia mecánica disponible está sujeta a las fluctuaciones mensuales o estacionales del recurso undimotriz, lo cual influye directamente en la producción energética del sistema, especialmente en contextos donde la intensidad del oleaje presenta cambios significativos a lo largo del año.

H. Estimación de la producción eléctrica del sistema

Tomando en consideración la ecuación (2), y a partir de una potencia mecánica de 21580,74 W, un factor de planta de 0,10, un tiempo operativo de 720 h/mes y una eficiencia global del sistema ($\eta_{sistema}$) de 0,75, determinada a partir de las eficiencias individuales de sus componentes, se estimó una producción eléctrica de 1165,36 kWh/mes.

Este resultado representa la cantidad de energía que el sistema undimotriz podría suministrar a la red o a un sistema de almacenamiento durante un periodo mensual de operación continua, bajo condiciones representativas del oleaje.

I. Cálculo de la cobertura eléctrica

La energía mensual producida se contrastó con el consumo promedio mensual de la población, estimado en 2649 kWh/mes, aplicando la formula (3).

Se obtuvo como resultado que el sistema undimotriz propuesto podría abastecer aproximadamente el 43,99 % de la demanda eléctrica mensual del área de estudio.

Este valor evidencia que el dispositivo, en condiciones simuladas, presenta un potencial significativo para complementar el suministro energético convencional, especialmente en zonas costeras con recursos de oleaje constantes.

J. Análisis de sensibilidad de la producción energética

Con el fin de evaluar la robustez del modelo propuesto, se analizó la sensibilidad de la producción eléctrica frente a variaciones en el factor de planta (FP), considerando tres escenarios: un escenario desfavorable (FP = 0,08), asociado a condiciones de bajo aprovechamiento del recurso; un escenario conservador (FP = 0,10), utilizado como base en el presente estudio; y un escenario favorable (FP = 0,15), manteniendo constantes los demás parámetros del sistema.

A partir de la potencia mecánica simulada y la eficiencia global del sistema, se estimó la producción eléctrica mensual para cada escenario, cuyos resultados se presentan en la Tabla III.

TABLA III
ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD AL FACTOR DE PLANTA (FP)

Escenarios	Factor de planta (FP)	Producción eléctrica (kWh/mes)
Escenario N° 1	0,08	932,29
Escenario N° 2	0,10	1165,36
Escenario N° 3	0,15	1748,04

Los resultados evidencian que la producción energética del sistema presenta una alta sensibilidad frente al factor de planta, observándose variaciones significativas incluso ante cambios moderados de este parámetro.

En particular, al pasar de un escenario desfavorable (FP = 0,08) a un escenario favorable (FP = 0,15), la producción energética mensual se incrementa en aproximadamente un 87 %, lo que demuestra la fuerte dependencia del modelo respecto a las condiciones operativas y de disponibilidad del recurso.

Este comportamiento confirma que el factor de planta constituye un parámetro crítico en la estimación del desempeño energético de dispositivos undimotrices, ya que integra tanto la variabilidad del oleaje como la eficiencia operativa del sistema.

K. Cálculo técnico – económico preliminar

Considerando el costo de inversión del sistema y los costos de operación y mantenimiento, se estimó el LCOE del dispositivo.

El costo de inversión inicial fue estimado en 108 000 USD, mientras que los costos de operación y mantenimiento se asumieron equivalentes al 3 % del CAPEX anual, equivalente a 3240 USD/año, en concordancia con valores reportados para tecnologías de energía marina.

A partir de la producción energética mensual de 1165,36 kWh, se estimó una generación anual de 13984 kWh/año, considerando una vida útil del sistema de 20 años.

En base a estos valores, el LCOE del sistema se calculó con la formula (4), adoptando una tasa de descuento del 8% con el fin de evitar la subestimación del indicador y reflejar el valor del dinero en el tiempo, obteniendo como resultado un costo nivelado de energía de aproximadamente 1,02 USD/kWh.

Este resultado refleja el costo promedio de generación del sistema y las condiciones actuales de la tecnología undimotriz, aún con costos elevados frente a otras fuentes renovables.

IV. DISCUSIÓN

El consumo eléctrico de la Asociación José Silverio Olaya Balandra evidenció una tendencia ascendente entre junio de 2024 y marzo de 2025, con picos en verano asociados al incremento de la actividad comercial y al uso

intensivo de equipos de refrigeración e iluminación, comportamiento coherente con lo reportado en comunidades pesqueras [28], [29].

En cuanto al recurso, el análisis del oleaje evidenció una disponibilidad constante y adecuada para la conversión undimotriz, en concordancia con estudios que destacan el alto potencial del litoral central peruano [26], [30]. El uso de condiciones promedio permitió una representación más realista del recurso y el desempeño del sistema; sin embargo, introduce incertidumbre en la estimación energética al no considerar variabilidad intradiaria ni eventos extremos [13].

Asimismo, los resultados evidencian una alta sensibilidad de la producción energética al factor de planta, donde incrementos de 0,08 a 0,15 generan variaciones cercanas al 87 %, confirmando su importancia como parámetro integrador de la disponibilidad del recurso marino [31].

La simulación en WEC-Sim estimó una generación de 1165,36 kWh/mes, capaz de cubrir aproximadamente el 44% del consumo eléctrico del área de estudio. Si bien no garantiza autosuficiencia, representa un aporte relevante como fuente renovable complementaria, en línea con estudios similares de dispositivos tipo Point Absorber [32], [33]. Sin embargo, la variabilidad del recurso implica que esta cobertura no es constante durante el año, lo que refuerza la necesidad de integración con la red eléctrica o sistemas de almacenamiento [25], [27].

En términos económicos, el LCOE estimado de 1,02 USD/kWh evidencia que la tecnología undimotriz aún no es competitiva frente a otras fuentes renovables; no obstante, este resultado es consistente con su etapa inicial de desarrollo [10], [34].

Finalmente, los resultados deben interpretarse como una aproximación técnica preliminar, siendo necesario, en estudios futuros, incorporar modelos más detallados del PTO, análisis de control óptimo y validación experimental en laboratorio, lo cual permitiría reducir la incertidumbre del modelo y mejorar la confiabilidad de las estimaciones [31].

V. CONCLUSIONES

El estudio evaluó la viabilidad técnica preliminar de un sistema undimotriz tipo Point Absorber en la Asociación José Silverio Olaya Balandra, considerando una demanda eléctrica con variaciones estacionales representativas. A partir del análisis del consumo eléctrico, se identificó una demanda mensual representativa con variaciones estacionales marcadas, lo que permitió establecer una base realista y consistente para evaluar la contribución del sistema propuesto.

La caracterización del recurso undimotriz evidenció condiciones favorables para su aprovechamiento energético mediante el uso de valores representativos, adecuados para una evaluación más aterrizada del desempeño del sistema.

La simulación con WEC-Sim estimó que el convertidor undimotriz, bajo un espectro Pierson-Moskowitz y un factor de planta de 0,10, puede alcanzar una producción eléctrica aproximada de 1165,36 kWh/mes, lo que permitiría cubrir cerca del 43,99 % de la demanda eléctrica mensual de la zona de estudio, confirmando su potencial como fuente renovable complementaria, contribuyendo a la reducción del consumo de la red eléctrica convencional.

Adicionalmente, el análisis de sensibilidad evidenció que la producción eléctrica presenta una evidente dependencia del factor de planta, observándose variaciones significativas en la generación ante cambios moderados de este parámetro, resaltando su relevancia en la evaluación del sistema.

En términos económicos, el sistema undimotriz presenta un LCOE de 1,02 USD/kWh, valor que es coherente con su nivel de desarrollo y permite establecer una línea base para futuras mejoras tecnológicas y evaluaciones a mayor escala.

Si bien los resultados confirman la coherencia técnica del modelo, el estudio presenta limitaciones asociadas a la simplificación del sistema, el uso de parámetros constantes y la ausencia de pruebas experimentales, factores que introducen incertidumbre en la estimación de la producción eléctrica, por lo que los resultados deben interpretarse como una aproximación preliminar.

En este sentido, futuras investigaciones deberían enfocarse en la validación experimental a escala de laboratorio, mediante ensayos que permitan contrastar los resultados numéricos con datos reales, así como en la implementación de sistemas de medición para evaluar el desempeño del dispositivo en condiciones controladas. Además, se recomienda incorporar estrategias de control del PTO y análisis dinámicos más avanzados que permitan optimizar la captación de energía.

En síntesis, este estudio constituye una evaluación técnica preliminar del desempeño energético de sistemas undimotrices a escala local, integrando datos reales de consumo eléctrico y condiciones representativas de oleaje en la costa peruana, cuyo principal valor radica en su enfoque aplicado y contextualizado para contribuir a la planificación local y a la diversificación de la matriz energética en comunidades costeras.

REFERENCIAS

- [1] T. Hooper, C. Hattam, A. Edwards-Jones, and N. Beaumont, "Public perceptions of tidal energy: Can you predict social acceptability across coastal communities in England?," *Mar. Policy*, vol. 119, p. 104057, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.MARPOL.2020.104057.
- [2] L. D. Jenkins *et al.*, "Human dimensions of tidal energy: A review of theories and frameworks," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 323–337, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.08.036.
- [3] Z. Chang, Z. Hou, and Z. Zheng, "Dynamic performance of a point absorber WEC considering nonlinear hardening spring under irregular waves," *International Marine Energy Journal*,

- vol. 6, no. 1, pp. 19–25, Mar. 2023, doi: 10.36688/IMEJ.6.19-25.
- [4] A. A. M. Rahman, M. Moniruzzaman, and M. Al Mamun, “Estimation of energy potential of point absorber buoy type wave energy converter,” *3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology, EICT 2017*, vol. 2018-January, pp. 1–5, Jul. 2017, doi: 10.1109/EICT.2017.8275223.
- [5] R. D. Ponce Oliva, M. Estay, M. Barrientos, R. A. Estevez, S. Gelcich, and F. Vásquez-Lavín, “Emerging energy sources’ social acceptability: Evidence from marine-based energy projects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 198, p. 114429, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.RSER.2024.114429.
- [6] G. Stelmach, S. Hazboun, D. Brandt, and H. Boudet, “Public perceptions of wave energy development on the west coast of North America: Risks, benefits, and coastal attachment,” *Ocean Coast. Manag.*, vol. 241, p. 106666, Jul. 2023, doi: 10.1016/J.OCECOAMAN.2023.106666.
- [7] M. , M. I. & P. S. Urraya, “Wave energy communication and social opposition,” <https://pamec2024.pamec.energy/proceedings/article/view/436>.
- [8] M. Penalba, J. Davidson, C. Windt, and J. V. Ringwood, “A high-fidelity wave-to-wire simulation platform for wave energy converters: Coupled numerical wave tank and power take-off models,” *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 655–669, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.06.008.
- [9] A. Senatore, A. De Simone, A. Senatore, and A. De Simone, “Modeling and Simulation of a Wave Energy Converter: Multibody System Coupled to Fluid-Film Lubrication Model and Thermal Analysis,” *Energies 2022, Vol. 15*, vol. 15, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/EN15249358.
- [10] J. Falnes, “A review of wave-energy extraction,” *Marine Structures*, vol. 20, no. 4, pp. 185–201, Oct. 2007, doi: 10.1016/J.MARSTRUC.2007.09.001.
- [11] “Tutorials — WEC-Sim documentation.” Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: <https://wec-sim.github.io/WEC-Sim/dev/user/tutorials.html>
- [12] W. J. Pierson and L. Moskowitz, “A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii,” *J. Geophys. Res.*, vol. 69, no. 24, pp. 5181–5190, Dec. 1964, doi: 10.1029/JZ069I024P05181.
- [13] L. H. Holthuijsen, “Waves in Oceanic and Coastal Waters,” *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, vol. 9780521860284, pp. 1–387, Jan. 2007, doi: 10.1017/CBO9780521860284.
- [14] J. Grasberger *et al.*, “Review of recent WEC-Sim (v6.1) advanced features,” *International Marine Energy Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 259–263, Sep. 2025, doi: 10.36688/IMEJ.8.259-263.
- [15] M. Penalba, J. Davidson, C. Windt, and J. V. Ringwood, “A high-fidelity wave-to-wire simulation platform for wave energy converters: Coupled numerical wave tank and power take-off models,” *Appl. Energy*, vol. 226, pp. 655–669, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.APENERGY.2018.06.008.
- [16] M. A. H. Ramli *et al.*, “Heave Response Amplitude Operator of Point Absorber Wave Energy Converter in Low Wave Energy,” *Journal of Advanced Research Design*, vol. 123, no. 1, pp. 261–271, Dec. 2024, doi: 10.37934/ARD.123.1.261271.
- [17] J. Pastor and Y. Liu, “Frequency and time domain modeling and power output for a heaving point absorber wave energy converter,” *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 5, no. 2-3 (July 2014), pp. 1–13, Apr. 2014, doi: 10.1007/S40095-014-0101-9.
- [18] A. F. de O. Falcão, “Wave energy utilization: A review of the technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 3, pp. 899–918, Apr. 2010, doi: 10.1016/J.RSER.2009.11.003.
- [19] G. Ibarra-Berastegi, J. Sáenz, A. Ulazia, P. Serras, G. Esnaola, and C. Garcia-Soto, “Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the Mutriku wave farm (2014–2016),” *Ocean Engineering*, vol. 147, pp. 20–29, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2017.10.018.
- [20] B. Guo *et al.*, “A Review of Point Absorber Wave Energy Converters,” *Journal of Marine Science and Engineering 2022, Vol. 10*, vol. 10, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/JMSE10101534.
- [21] R. Satymov, D. Bogdanov, M. Dadashi, G. Lavidas, and C. Breyer, “Techno-economic assessment of global and regional wave energy resource potentials and profiles in hourly resolution,” *Appl. Energy*, vol. 364, p. 123119, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.APENERGY.2024.123119.
- [22] S. Foteinis, “Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 162, p. 112448, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112448.
- [23] S. Bhattacharya *et al.*, “Timing value of marine renewable energy resources for potential grid applications,” *Appl. Energy*, vol. 299, p. 117281, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.117281.
- [24] M. deCastro *et al.*, “Evaluating the economic viability of near-future wave energy development along the Galician coast using LCoE analysis for multiple wave energy devices,” *J. Clean. Prod.*, vol. 463, p. 142740, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.142740.
- [25] T. Hooper, C. Hattam, A. Edwards-Jones, and N. Beaumont, “Public perceptions of tidal energy: Can you predict social acceptability across coastal communities in England?,” *Mar. Policy*, vol. 119, p. 104057, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.MARPOL.2020.104057.
- [26] A. Jesús, O. Malca, J. Eulogio, and L. Kuong, “Wave energy resource for open sea conditions of the Peru basin,” *Universidad Nacional de Ingeniería*, 2022, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.uni.edu.pe/handle/20.500.14076/26770>
- [27] L. D. Jenkins *et al.*, “Human dimensions of tidal energy: A review of theories and frameworks,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 97, pp. 323–337, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.RSER.2018.08.036.
- [28] R. E. Scroggins *et al.*, “Renewable energy in fisheries and aquaculture: Case studies from the United States,” *J. Clean. Prod.*, vol. 376, p. 134153, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.134153.
- [29] L. ; Thomson, D. Jenkins, L. Thomson, and D. Jenkins, “The Use of Real Energy Consumption Data in Characterising Residential Energy Demand with an Inventory of UK Datasets,” *Energies 2023, Vol. 16, Page 6069*, vol. 16, no. 16, p. 6069, Aug. 2023, doi: 10.3390/EN16166069.
- [30] M. López, M. Veigas, and G. Iglesias, “On the wave energy resource of Peru,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 90, pp. 34–40, Jan. 2015, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2014.11.012.
- [31] T. Mücke, M. Wächter, P. Milan, and J. Peinke, “Numerical Modeling of a WECs Power Performance under the Influence of Atmospheric and Synthetic Wind Fields,” *Springer Proceedings in Physics*, vol. 141, pp. 167–170, 2012, doi: 10.1007/978-3-642-28968-2_35.
- [32] H. Li *et al.*, “A self-powered smart wave energy converter for sustainable sea,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 220, p. 111641, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.YMSP.2024.111641.
- [33] A. Alzahrani, I. Petri, Y. Rezgui, and A. Ghoroghi, “Developing Smart Energy Communities around Fishery Ports: Toward Zero-Carbon Fishery Ports,” *Energies 2020, Vol. 13, Page 2779*, vol. 13, no. 11, p. 2779, Jun. 2020, doi: 10.3390/EN13112779.
- [34] J. Falnes, “Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction,” *Ocean Waves and Oscillating Systems*, Mar. 2002, doi: 10.1017/CBO9780511754630.