

Modelamiento matemático de un convertidor de energía undimotriz equipado con un mecanismo de resorte negativo para ser instalado en la costas de Lebu, Chile.

Braulio Neira-Verdugo¹, Danilo Pastrana-Mendoza², Claudio Villegas-Ulloa³, Fabián Pierart-Vásquez⁴, Thomas Knobloch⁵

¹ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: braulio.neira2001@alumnos.ubiobio.cl

² Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: dpastrana@ubiobio.cl

³ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: cvillegas@ubiobio.cl

⁴ Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile. Email: fpierart@ubiobio.cl

⁵ Institute für Getriebetechnik, Maschinendynamik und Robotik, RWTH Aachen University, Aquisgrán, Alemania. Email: knobloch@igmr.rwth-aachen.de

Resumen

La energía undimotriz es una fuente de energía renovable con gran potencial, y Chile tiene condiciones favorables para su aprovechamiento. Por esto, la Universidad del Bío-Bío ha diseñado y construido un generador undimotriz, llamado Lafkenewen, que se instalará este año en las costas de Lebu. Sin embargo, los convertidores de energía undimotriz presentan baja eficiencia. Para mejorar esto, se ha propuesto el uso de un arreglo de resortes con zonas de rigidez negativa, lo que ha demostrado aumentar el rendimiento y ampliar el ancho de banda de frecuencia de captura. Con dichas consideraciones, este artículo presenta un modelo matemático del generador undimotriz Lafkenewen a escala, utilizando el software ANSYS. El análisis se realiza para oleaje regular. Los resultados muestran que incorporar el arreglo de resortes produce un aumento del 280 % en la potencia generada.

Palabras clave: Energía de las olas, mecanismo de rigidez no lineal; resortes negativos

Abstract

Wave energy is a renewable energy source with great potential, and Chile has favorable conditions for its utilization. For this reason, the Universidad del Bío-Bío has designed and built a wave energy generator called Lafkenewen, which will be installed this year on the coasts of Lebu. However, wave energy converters currently have low efficiency. To improve this, the use of a spring arrangement with zones of negative stiffness has been proposed, which has been shown to increase performance and widen the frequency capture bandwidth. With these considerations, this article presents a mathematical model of the scaled Lafkenewen wave energy generator using ANSYS software. The analysis is conducted for regular wave conditions. The results show that incorporating the spring arrangement produces a 280% increase in generated power.

Keywords: Wave energy; Nonlinear stiffness mechanism; Negative spring

1. Introducción

El consumo de la energía eléctrica está en aumento y seguirá al alza [1]. Sin embargo, una parte importante de esta electricidad aún se genera mediante combustibles fósiles contaminantes. Una solución conocida a estas problemáticas es el uso de energías renovables que estén

al alcance de todos. Además de ser una respuesta a los desafíos ambientales, las energías renovables también garantizan la seguridad energética nacional [2]. Durante las últimas décadas, la energía undimotriz ha llamado bastante la atención debido a sus cualidades. Por ejemplo, no presenta intermitencia, es decir, la energía está

disponible tanto de día como de noche. Además, como el fluido es agua, la densidad energética es alta [3]. En este sentido, se estima que la energía de las olas tiene un potencial de 2.11 ± 0.05 TW a nivel global [4]. Por su parte, Chile goza de una de las condiciones más favorables del mundo por su alta densidad energética en la zona centro y sur del país [3].

Los convertidores de energía undimotriz, WEC, por sus siglas en inglés, se pueden clasificar según su forma de operación. Por ejemplo, una WEC que parece una boya flotante, Figura 1, es clasificado como cuerpo oscilante o absorbedor puntual. Este es uno de los más comunes y también de los más prominentes [5]. Falnes [6] señaló que, para un WEC tipo absorbedor puntual con un solo grado de libertad, se puede obtener la máxima potencia en el estado de resonancia, donde la frecuencia de las olas regulares incidentes es igual a la frecuencia natural del convertidor. Sin embargo los WEC tipo absorbedor puntual, se caracterizan por tener una alta rigidez hidrostática, que se traduce en una alta frecuencia natural [7]. Es por ello que se ha propuesto diversas estrategias de control activa para acercar el sistema a su estado óptimo. Estas estrategias pueden ser como control de enganche, control de amortiguamiento o aprendizaje reforzado [8]. Otra solución propuesta por diversos autores es utilizar un mecanismo, con zonas de rigidez negativa, que pueda contrarrestar la alta rigidez hidrostática acercando el sistema a la resonancia. Esto es conocido como control pasivo [9].

El mecanismo de rigidez negativa o no lineal, NSM, por sus siglas en inglés, es una estructura que puede proporcionar una fuerza de restauración no lineal a través de algunos componentes especialmente configurados [10]. Los mecanismos de rigidez no lineal, inicialmente, se utilizaban para en el ámbito de la aislación de vibraciones y en la recolección de energía de vibración [11]. Sin embargo, ha llamado la atención como una solución factible, eficiente y sencilla para la conversión de energía undimotriz [9]. Típicamente, se conoce a los NSMs como resortes mecánicos en compresión (Figura 1). En este ámbito, son diversos los tipos de mecanismos y componentes utilizados hoy en día, como electroimanes o pistones neumáticos [12–15]. En general, el sistema más estudiado es el biestable [9], como el que se observa en la Figura 1.

Anteriormente, Zhang et al. [5] ha propuesto utilizar resortes en compresión para ejercer el fenómeno de “snap-through” con el sistema biestable. La finalidad de ese mecanismo es agregar un resorte que actúe con rigidez negativa en la ecuación de movimiento, para contrarrestar la alta rigidez hidrostática en el WEC. Con esto, se reduce la frecuencia natural, acercándola a la frecuencia de excitación de oleaje, en búsqueda de la resonancia. Los cálculos y simulaciones numéricas de Zhang, mostraron un importante aumento del rendimiento del equipo, además de un aumento en su ancho de banda de captura. En general, existe una amplia gama

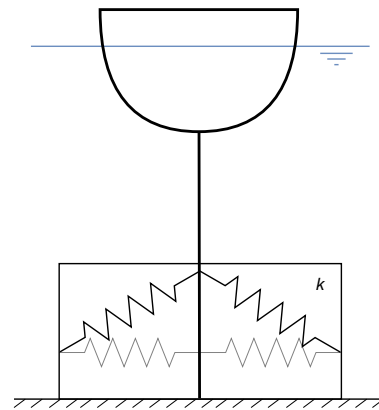


Figura 1: Mecanismo resorte negativo biestable. Fuente: elaboración propia.

de estos estudios, pero son principalmente para equipos con movimiento vertical [9]. Sin embargo, Tetû et al [7], ha propuesto utilizar un mecanismo similar presentado por Zhang, pero para un WEC pivotante. Además realizaron pruebas experimentales, concluyendo que los efectos físicos dominantes fueron bien modelados por su simulación numérica. Dicho mecanismo es bastante similar al de este estudio, pero los enfoques de esta investigación son diferentes. Tetû y su equipo resolvieron la ecuación de movimiento del sistema en un código propio de MATLAB. Por otra parte, aquí se presenta una metodología diferente, pues se realiza una simulación, de un dispositivo de diseño local, utilizando diversos módulos del software ANSYS.

El objetivo de este trabajo es el modelamiento numérico de un prototipo a escala del convertidor undimotriz Lafkenewen. Este modelo, de escala 1:13 se encuentra en el laboratorio del departamento de ingeniería mecánica de la Universidad del Bío-Bío. Cabe mencionar, que el estudio es realizado considerando solo oleaje regular. El orden de este artículo es el siguiente: se comienza describiendo dicho modelo a escala y el respectivo banco de olas. En la sección de metodología se expone la estrategia utilizada para la simulación numérica y se detalla sobre las ecuaciones desarrolladas en el software. Finalmente, en la sección de resultados, se presenta una validación experimental del modelo, las respuestas de las simulaciones con y sin el arreglo de resortes y la comparación de los efectos del uso del mecanismo de rigidez no lineal.

2. Metodología

En primer lugar, se realiza el modelado geométrico de WEC. En la sección de Dinámica de WEC, se integra dicha geometría al software ANSYS AQWA para calcular los coeficientes hidrodinámicos y la rigidez hidrostática.

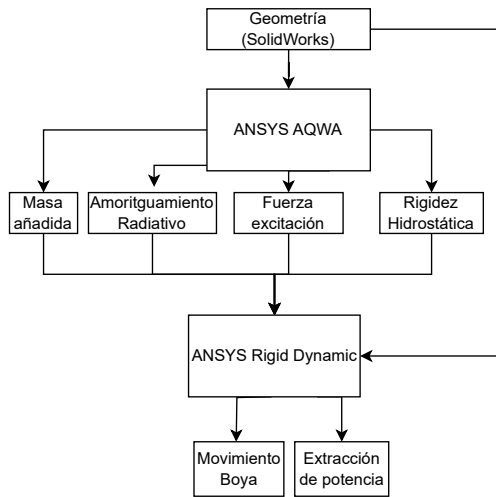


Figura 2: Metodología de modelamiento de la respuesta dinámica del WEC. Fuente: elaboración propia.



Figura 3: Fotografía del WEC en el canal de olas.

ca. Estos parámetros son de vital interés para captar el movimiento del cuerpo en un modelo matemático. En la misma sección, se detalla sobre la exportación esos resultados como parámetros al módulo de Rigid Dynamics, en que se se resuelve la dinámica del WEC. En este mismo módulo se integra el resorte de rigidez no lineal y se evalúa su comportamiento. Además es integrado un amortiguador como sistema de extracción de potencia. En la sección final de resultados, se compara el movimiento y potencia extraída del sistema con el mecanismo de rigidez no lineal. Esta metodología se resume en la Figura 2.

2.1. Modelo geométrico

El WEC en estudio, corresponde a un modelo a escala 1 : 13 del generador undimotriz Lafkenewen. Este equipo está ubicado en un banco de olas de la Universidad del Bío-Bío, como se observa en la Figura 3. La ubicación del WEC en el canal de olas y las dimensiones del mismo se muestran en Figura 4 y Tabla 1. Las medidas generales del convertidor son presentadas en la Tabla 2.

Ahora bien, si consideramos que el WEC tiene amplitudes pequeñas de movimiento, el sistema de la Figura 3 puede ser representado como el típico sistema masa resorte-amortiguador, como se muestra en la Figura 5. Aquí k representa la rigidez hidrostática y c representa el amortiguamiento radiativo del sistema equivalente, que representa la interacción de la boya flotante con el AGUA.

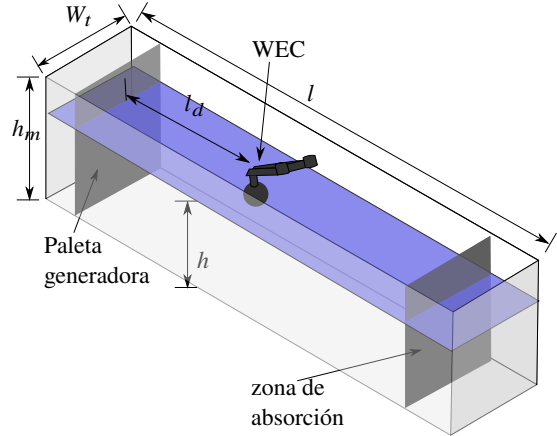


Figura 4: Esquema y dimensiones del canal de olas. Fuente: elaboración propia.

Tabla 1: Dimensiones del canal de ola representado en Figura 4.

Dimensión	Medida	Unidad
l	5.4	m
W_t	0.45	m
h_m	0.65	m
h	0.20	m
l_d	1.40	m

Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Mecanismo de rigidez no lineal

La configuración para agregar el resorte en compresión se muestra en la Figura 6 y las dimensiones mostradas se presentan en la Tabla 2. La idea principal es que cuando la boya esté en su posición de equilibrio, el resorte en compresión aplique una fuerza en la misma dirección del brazo. Esto asegura que, en la posición de equilibrio, el resorte no genere momento. Pero, cuando se aplica una fuerza de excitación que desplace a la boya de su posición de equilibrio, el resorte generará momento y el fenómeno de "snap-through". La rigidez del resorte negativo se ha obtenido mediante un enfoque heurístico, tomando como base la rigidez utilizada en [7] y evaluando qué valor es el que genera una mayor amplitud de movimiento.

Las dimensiones generales de la configuración de resortes representada en la Figura 6, se presentan en la Tabla 2.

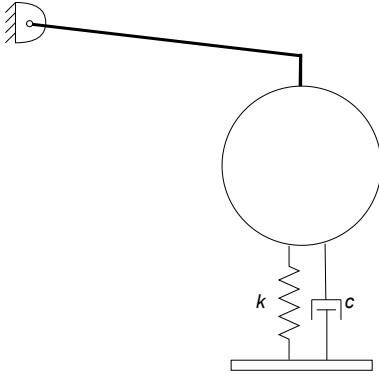


Figura 5: Sistema masa resorte-amortiguador, equivalente a la interacción de la boya flotante con el agua. Fuente: elaboración propia.

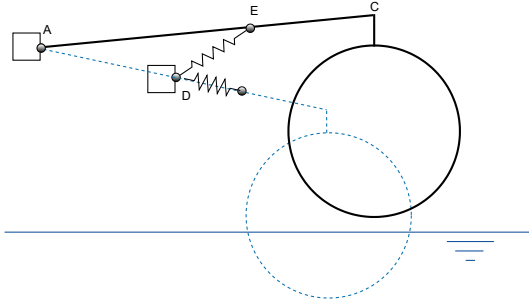


Figura 6: Posición resorte negativo. Fuente: elaboración propia.

Tabla 2: Dimensiones del convertidor de la Figura 6.

	Medida	Unidad
Masa Boya	2.476	kg
Diámetro boya	0.2	m
Masa brazo	0.804	kg
Largo brazo	0,4	m
AD	0.272	m
AE	0.340	m
EC	0.060	m

Fuente: elaboración propia.

2.2. Dinámica WEC

Para olas regulares de una frecuencia dada, la ecuación que gobierna la oscilación del WEC, es la presentada en la ecuación (1), como es descrito por [7]

$$(I + I_{\text{add}}(\omega))\ddot{\theta} + c(\omega)\dot{\theta} + k\theta = T_{\text{ext}}(\omega), \quad (1)$$

Donde

- θ : Posición angular del WEC.
- ω : Frecuencia de excitación de las olas.
- I : Momento de inercia del WEC.
- I_{add} : Momento de inercia añadido, el cual representa un incremento inercial debido al agua desplazada en las cercanías de la boya cuando se mueve [16].

- c : Amortiguamiento radiativo, el cual representa un efecto disipativo relacionado con la energía transmitida al agua por las oscilaciones del cuerpo [16].
- k : Rigidez hidrostática.
- T_{ext} : Momento de excitación debido a las olas incidentes, normalizado por la amplitud de ola.

Como se puede observar, existen tres coeficientes que dependen de la frecuencia de excitación o frecuencia del oleaje. Para poder encontrar dichos coeficientes hidrodinámicos, se utilizó el software ANSYS AQWA, como es descrito en la Figura 2. Cabe mencionar que en este artículo se trabaja con un valor pequeño de amplitud de oleaje, 25 mm. Se utiliza este valor para considerar que las amplitudes del movimiento son pequeñas y el sistema se comporta de manera lineal. Con esta consideración, los coeficientes hidrodinámicos se calculan tomando en cuenta solo el movimiento vertical del sistema, como se considera en la Figura 5.

2.2.1. Modelamiento Matemático

La interacción fluido-estructura se modela basándose en la teoría del flujo potencial, que considera el fluido de trabajo ideal, es decir, incompresible, no viscoso e irrotacional. Bajo estas condiciones, la velocidad del agua \vec{u} se puede expresar en términos de la función escalar llamada potencial de velocidad Φ , que debe satisfacer la ecuación de Laplace, (2) [16].

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (2)$$

En el contexto de la energía undimotriz, el flujo debe satisfacer la ecuación de Laplace (2) en el dominio del fluido, junto con las condiciones de contorno para una onda regular con una longitud de onda mucho mayor que su amplitud. Sobre la superficie mojada media del cuerpo, la condición de contorno se define por la ecuación (3). En la superficie del fondo del canal de olas, la condición es descrita por la ecuación (4). Finalmente, en la superficie libre, la condición de contorno se define por la ecuación (5).

$$\frac{\delta \Phi}{\delta n} = u_n \quad (3)$$

$$\frac{\delta \Phi}{\delta y} = 0 \quad (4)$$

$$-\omega^2 \Phi + g \frac{\delta \Phi}{\delta y} = 0. \quad (5)$$

Donde n es el vector de dirección normal, u_n es la velocidad del cuerpo mojado en la dirección normal a su superficie, y es la posición vertical en el dominio del fluido, ω es la frecuencia de la onda y g es la aceleración de la gravedad.

Excepto para geometrías simples, no es posible resolver analíticamente este problema de valor de contorno. Por lo tanto, los enfoques numéricos son el método más común. El método utilizado en este trabajo es el Método de Elementos de Contorno (BEM), también conocido como el método de paneles [16]. Todas estas

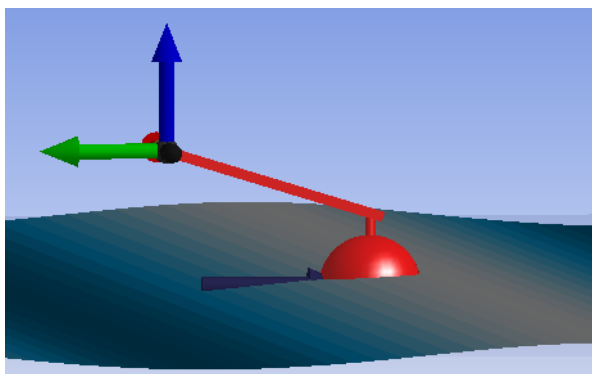


Figura 7: Simulación en AQWA. Fuente: Elaboración propia.

ecuaciones y consideraciones mencionadas están incorporadas en el módulo de AQWA. Cabe destacar, que aunque los códigos BEM tienen varias limitaciones, el primer paso en el modelado de WECs es casi universalmente un análisis en el dominio de frecuencia usando códigos BEM [16].

2.2.2. AQWA

Como se mencionó anteriormente, se utiliza este módulo de ANSYS para obtener los coeficientes hidrodinámicos e hidrostáticos. En primer lugar, se integra la geometría del WEC junto con sus valores de masa e inercia. El sistema se configura para pivotar mediante una conexión articulada (hinged connection). Posteriormente, se define un mallado con un tamaño de elemento de 8 mm. Luego, se caracteriza el “entorno constante”, que representa el canal de olas utilizado por el software. En este caso, las dimensiones de profundidad de agua, largo y ancho del canal, así como la ubicación del WEC, se definen de la misma manera que las presentadas anteriormente en la Tabla 1. En la Figura 7 se observa la simulación en este módulo.

2.2.3. Rigid Dynamics

Se utiliza este módulo de ANSYS pues tiene la capacidad de integrar los componentes que se requieren para el análisis. En este caso, el sistema masa-resorte presentado en la Figura 5 es integrado en este módulo. Primero se fija la geometría para que solo pueda pivotar, con una articulación rotativa fija, similar a lo hecho en AQWA. Luego, se ingresa un resorte y amortiguador sobre la boya en posición vertical. Este resorte-amortiguador tiene la apariencia de un cilindro, como se observa en la Figura 8, que es un equivalente a lo presentado en la Figura 5. La rigidez del resorte hidrostático es importada de AQWA, lo mismo ocurre con la constante de amortiguamiento. Luego, la masa añadida es agregada a la boya como masa puntual, Figura 8. Por otra parte, se integra una fuerza que actúa sobre la superficie de la boya. Dicha fuerza tiene un módulo igual al producto de

la fuerza de excitación de la ola y la amplitud de ola. Esta fuerza actúa de manera sinusoidal, con la frecuencia de excitación definida anteriormente.



Figura 8: Sistema masa resorte-amortiguador en módulo de ANSYS Rigid Dynamics. Fuente: elaboración propia.

Luego, se inserta un resorte paralelo al brazo, Figura 9. La posición de este resorte es detallada en la Figura 6 y Tabla 2. Posteriormente se integra el amortiguador que actúa como sistema de extracción de potencia, Figura 9. Para calcular el coeficiente de amortiguamiento, se ha considerado que este amortiguador debe proporcionar el mismo efecto de disipación de energía que el amortiguamiento del sistema masa-resorte. Esto se debe a que el amortiguamiento óptimo debe igualar al amortiguamiento de radiación. En otras palabras, y aunque parezca paradójico, absorber una ola implica crear una ola [16].

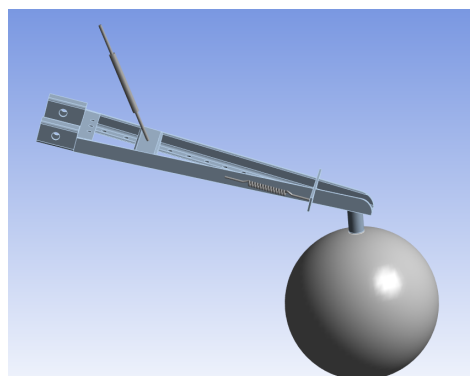


Figura 9: Sistema con Resorte y Amortiguador. Fuente: elaboración propia.

Cabe mencionar que realizó un ajuste en la posición del resorte-amortiguador mostrado en la Figura 5, el

cual simula el efecto del resorte hidrostático. Aunque inicialmente se esperaba que el componente estuviera en posición vertical, Figura 8, esta orientación resultó en una respuesta inadecuada. Esto ocurre porque, con el resorte-amortiguador en posición vertical, la fuerza de restauración no tiene la dirección deseada cuando la boya desciende. Si la boya desciende desde su posición de equilibrio y el resorte se comprime, el recorrido hará que el resorte se incline hacia la izquierda. Esta inclinación genera una fuerza de restauración en la dirección radial, lo que hace que la componente tangencial sea casi nula y no se genere el torque necesario para que la boya ascienda, resultando en una respuesta incorrecta.

Para solucionar este problema, se decidió inclinar el resorte-amortiguador hacia la derecha, alineándolo de manera similar a la tangente del recorrido del brazo con la boya. Sin embargo, para no distorsionar significativamente el valor de la rigidez en la componente vertical, el ángulo de inclinación debe ser pequeño. Para determinar el ángulo óptimo, se realizó un análisis usando diferentes ángulos menores a 15 grados y evaluando la amplitud del movimiento de la boya. Este análisis determinó que una inclinación de 6° genera resultados óptimos. Con este nivel de inclinación, la variación en la rigidez vertical es despreciable, logrando resultados coherentes con los simulados en AQWA, como se verá en la sección de resultados. No obstante, esta solución deja espacio para futuros análisis sobre cómo mejorar este aspecto.

3. Resultados

3.1. Resultados BEM

Del software ANSYS AQWA se han extraído los coeficientes hidrostáticos e hidrodinámicos. Dichos valores se pueden observar en la Tabla 3, tomando en cuenta que se han calculado en base a frecuencia de excitación de 1 Hz, que es la frecuencia utilizada para nuestro análisis posterior. Por otra parte, en la Figura 10 se observa el movimiento de la boya en relación a la altura de la ola. Se puede ver que la boya no está en resonancia, debido a que la amplitud del desplazamiento de la boya es casi igual a la amplitud de la ola.

Tabla 3: Coeficientes Hidrodinámicos

	Medida	Unidad
Masa añadida	1.39	kg
Amortiguamiento radiativo	4.59	Ns/m
Fuerza excitación	188	N/m
Rigidez hidrostática	314.69	N/m

Fuente: elaboración propia.

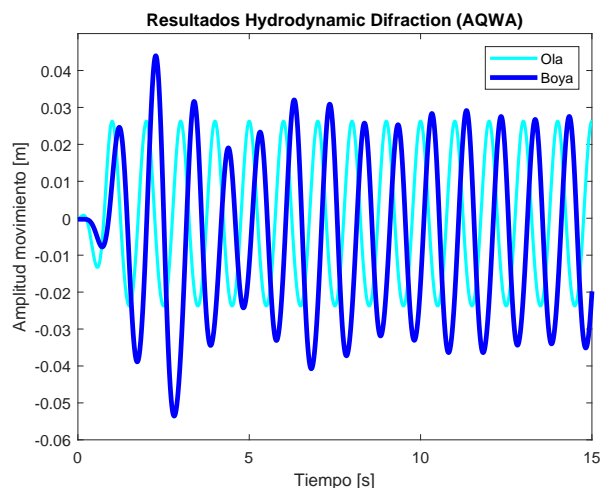


Figura 10: Amplitud de oleaje y respuesta de la boya del modelo BEM. Fuente: elaboración propia.

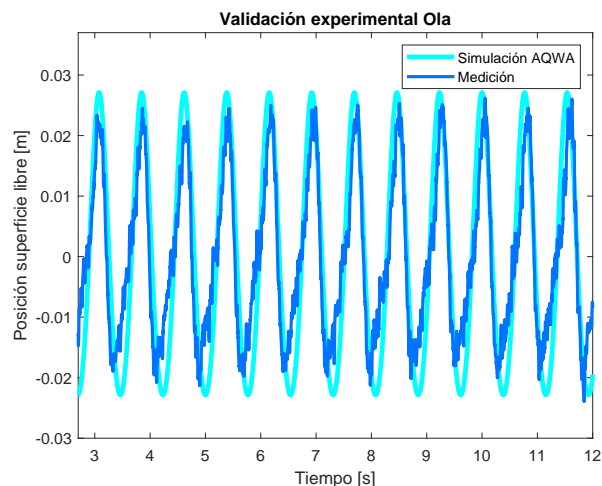


Figura 11: Resultados del modelo BEM y datos experimentales. Comparación de la medición de la ola. Fuente: elaboración propia.

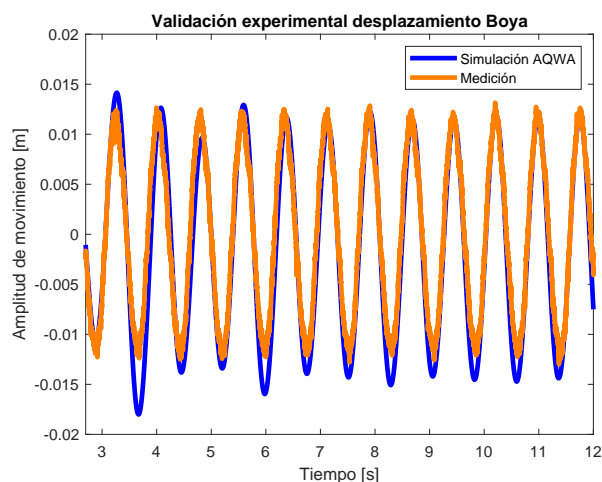


Figura 12: Comparación del desplazamiento de la boya. Fuente: elaboración propia.

3.1.1. Validación Experimental

El modelo desarrollado en el software ANSYS AQWA se valida en el banco de olas. Para ello, se compara la amplitud del oleaje generado experimentalmente con el modelado en AQWA, que es de 25 mm. A su vez, se compara el movimiento del WEC medido experimentalmente con el modelado computacional. Para medir la amplitud de oleaje se utilizó un sensor de oleaje capacitivo. Para medir el movimiento del WEC se utilizó un sensor láser.

Si bien la frecuencia de excitación utilizada en el análisis de este estudio es de 1 Hz, por limitaciones técnicas del banco de olas, la validación se realiza con 1.3 Hz. Los resultados de la amplitud del oleaje y respuesta de la boya se presenta en la Figura 11 y 12.

Se puede ver que el modelo es capaz de predecir correctamente el comportamiento del WEC para las condiciones estudiadas. En este sentido, el error cuadrático medio (RMSE) del gráfico que valida experimentalmente la amplitud del oleaje, Figura 11, es de 0.0076 m. Este valor es debido a que el banco de olas tiene consigo reflexión. Por otra parte, el error cuadrático medio del gráfico que valida experimentalmente la respuesta de la boya, Figura 12, es de 0.0022 m. Por lo tanto, ahora que el modelo BEM ha sido validado experimentalmente, se procede con el análisis de interés, que es la comparación de la amplitud del movimiento al aplicar el mecanismo de rigidez no lineal.

3.2. Resultados Rigid Dynamics

Con el fin de validar el uso de la herramienta de Rigid Dynamics para estudiar los mecanismos de resortes, se compara inicialmente el movimiento de la boya que genera AQWA con el generado por Rigid Dynamics. En la Figura 13 se puede observar la comparación del movimiento de la boya a frecuencia de 1 Hz, como se menciona inicialmente. Aquí las curvas casi se traslapan, excepto al inicio, pues AQWA supone que el agua está quieta antes de la excitación del oleaje.

El error cuadrático medio de esta comparación es de 0.010051 m. Esto quiere decir, que las componentes físicas han sido bien incorporadas en Rigid Dynamics.

Una vez que se ha simulado el modelo físico en Rigid Dynamics, se procede a integrar el mecanismo de rigidez no lineal o resorte en compresión. Con el método descrito en la metodología, se ha definido a la rigidez del sistema en 1600N/m y la fuerza inicial que debe tener el resorte de 50 N. Con esos valores, el mecanismo reduce la frecuencia natural del WEC. En la Figura 14, se puede observar los resultados de la aplicación del resorte en el sistema. Como está expuesto, claramente el sistema aumenta la amplitud del movimiento. Esto es debido a que este resorte en compresión reduce la alta rigidez hidrostática, haciendo al sistema más flexible y lo acerca a la resonancia.

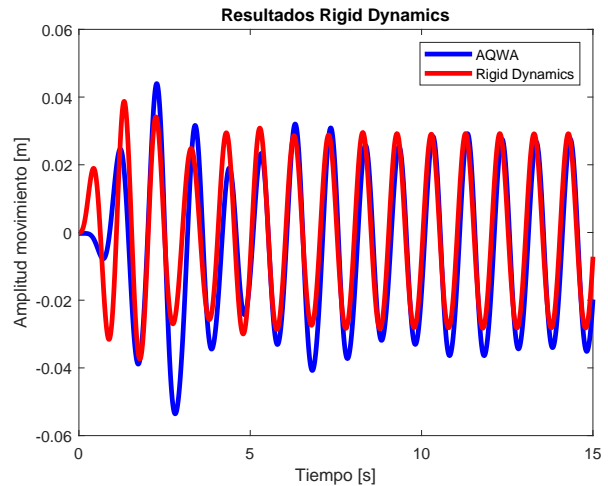


Figura 13: Comparación AQWA-Rigid Dynamics. Fuente: elaboración propia.

Con los datos de la amplitud de movimiento, se calcula la potencia generada por el amortiguador que representa el sistema de extracción de potencia. Cuando el sistema no está con el mecanismo de rigidez no lineal, resorte negativo, la potencia media entregada es de 41 mW. Por otra parte, cuando se integra el resorte negativo, la potencia media entregada es 158 mW. Entonces, para este cálculo en condiciones ideales, la potencia aumenta en un 280 %.

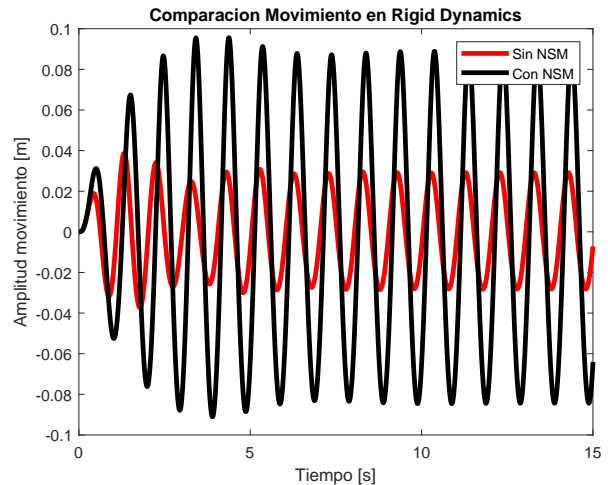


Figura 14: Desplazamiento de boya al integrar mecanismo de rigidez no lineal. Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

En este artículo, se ha presentado una metodología sencilla para la modelación de un mecanismo de rigidez no lineal a la versión escalada del generador undimotriz Lafkenewen. Utilizando un resorte con una configuración geométrica no lineal, se ha generado una rigidez negativa que acerca al sistema a la resonancia. Esto ha

resultado en un aumento significativo de las amplitudes de movimiento y en un incremento del 280 % en la potencia media generada.

El desarrollo matemático se ha realizado mediante el software ANSYS, empleando los módulos de AQWA y Rigid Dynamics. A diferencia de otros estudios que suelen utilizar la dinámica de fluidos computacionales (CFD), en este trabajo se ha optado por el Método de Elementos de Contorno (BEM) debido a sus menores costos computacionales y su rapidez. Tal es la rapidez de BEM, que entrega resultados en cuestión de segundos. Además, BEM es universalmente utilizado para modelar los convertidores de energía en el dominio de la frecuencia [16]. Igualmente, la validación experimental mostró que BEM pudo representar de buena forma el comportamiento del convertidor a escala para el caso de oscilaciones pequeñas con oleaje regular. Sin embargo, futuros trabajos deberán incorporar CFD para obtener resultados más precisos al trabajar con oscilaciones grandes y con oleaje irregular.

Es importante destacar que en estas modelaciones y simulaciones no se han considerado los efectos de fricción entre los componentes mecánicos. Además, como han descrito diversos autores, en la práctica existen complejidades al utilizar resortes mecánicos en compresión para esta aplicación [9]. Por otra parte, los análisis solo se han realizado considerando un oleaje regular. Es claro que en el futuro se debe evaluar en condiciones de oleaje irregular.

A pesar de estas acotaciones, este estudio representa un punto de partida valioso para investigar diferentes mecanismos de rigidez no lineal y explorar sus ventajas y aplicaciones en los convertidores de energía undimotriz. Estas investigaciones contribuirán a hacer estos dispositivos más robustos y competitivos para aprovechar el tremendo potencial energético que se goza en el país.

Referencias

- [1] M. Ram, A. Aghahosseini, and C. Breyer, "Job creation during the global energy transition towards 100
- [2] C. N. Wang, N. L. Nhieu, and H. V. Tran, "Wave energy site location optimizing in chile: a fuzzy serial linear programming decision-making approach," *Environment, Development and Sustainability*, 2024.
- [3] A. Pecher and J. P. Kofoed, "Handbook of ocean wave energy," *Springer*, 2016.
- [4] K. Gunn and C. Stock-Williams, "Quantifying the global wave power resource," *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 296–304, 8 2012.
- [5] L. Xiao, X. Zhang, and J. Yang, "Numerical study of an oscillating wave energy converter with nonlinear snap-through power-take-off systems in regular waves," 2014.
- [6] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [7] A. Têtu, F. Ferri, M. B. Kramer, and J. H. Todalshaug, "Physical and mathematical modeling of a wave energy converter equipped with a negative spring mechanism for phase control," *Energies*, vol. 11, 2018.
- [8] E. Anderlini, *Control of wave energy converters using machine learning strategies*. PhD thesis, 2017.
- [9] X. Zhang, H. Zhang, X. Zhou, and Z. Sun, "Recent advances in wave energy converters based on nonlinear stiffness mechanisms," *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, vol. 43, pp. 1081–1108, 7 2022.
- [10] Z. Wu, C. Levi, and S. F. Estefen, "Practical considerations on nonlinear stiffness system for wave energy converter," *Applied Ocean Research*, vol. 92, 11 2019.
- [11] S. P. Pellegrini, N. Tolou, M. Schenk, and J. L. Herder, "Bistable vibration energy harvesters: A review," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 24, pp. 1303–1312, 2013.
- [12] J. Todalshaug, G. Steinnásgeirsson, E. Hjalmarsson, J. Maillet, P. Möller, P. Pires, M. Guerinell, and M. Lopes, "Tank testing of an inherently phase controlled wave energy converter," in *Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC)*, September 2015.
- [13] R. Xi, H. Zhang, DaolinXu, H. Zhao, and R. Mondal, "High-performance and robust bistable point absorber wave energy converter," *Ocean Engineering*, vol. 229, 6 2021.
- [14] J. Qin, Z. Zhang, X. Song, S. Huang, Y. Liu, and G. Xue, "Design and performance evaluation of an enclosed inertial wave energy converter with a nonlinear stiffness mechanism," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, 1 2024.
- [15] M. A. Khasawneh, *Exploiting Non-linearity to Improve the Performance of Point Wave Energy Absorbers*. PhD thesis, ProQuest Dissertations Publishing, 2023.
- [16] M. Folley, *Numerical modelling of wave energy converters: state-of-the-art techniques for single devices and arrays*. Academic Press, 2016.