



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

Unidad Mérida

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

**“Comportamiento y absorción de potencia de una boya cilíndrica
para un dispositivo convertidor de energía del oleaje”**

TESIS

que presenta

Carlos Martín Sosa Chuil

Para obtener el grado de

Doctor en Ciencias

en

Fisicoquímica

Directores de tesis:

Dr. Rodrigo Tarkus Patiño Díaz

Dr. Ismael de Jesús Mariño Tapia

Mérida, Yucatán, México

Agosto de 2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todas sus bendiciones y porque sin él, nada sería posible.

A mi esposa por ser mi fortaleza y por creer siempre en mí.

A mi familia por su cariño y por motivarme a siempre salir adelante.

A mis amigos de la institución, por todos esos momentos de trabajo y desvelo.

Al personal administrativo, porque siempre fue muy amable.

A mis asesores de tesis: Dr. Rodrigo Patiño y Dr. Ismael Mariño, por todo su apoyo durante esta aventura, por su confianza, sus consejos y sobre todo su paciencia.

A mis sinodales, los doctores: Rodolfo Silva, Juan J. Alvarado, Luis Díaz, Víctor Sosa y Pedro Castro, por sus consejos, comentarios y su valiosa aportación a este trabajo.

Al Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE-Océano), por brindar las herramientas y el apoyo durante el proyecto.

Al Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV- Unidad Mérida) y al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el posgrado.

Dedicado al amor de mi vida:

mi esposa Inés

RESUMEN*

En medio de una crisis climática derivada del uso masivo de combustibles fósiles, las fuentes alternativas de energía captan el interés de la sociedad en búsqueda de procesos sostenibles. La energía del océano es quizás la menos explorada, incluyendo el movimiento de las olas, las mareas, las corrientes marinas y los gradientes de salinidad y temperatura, además de la biomasa. En este trabajo se describe el resultado del análisis numérico obtenido para un Convertidor de Energía de Olas (CEO), tipo absorbedor puntual, en condiciones de oleaje regular. Se utilizó el software de dinámica de fluidos con código abierto: OpenFOAM®, para acoplar el movimiento de una boya como cuerpo sólido del CEO, dentro de una malla diseñada para la propagación de olas, a fin de calcular los parámetros del movimiento de la boya. La boya tiene una estructura cilíndrica horizontal, con un punto de pivote para la rotación en un eje. Se analizaron cinco radios de boya, ya que este parámetro aumenta considerablemente la eficiencia del absorbedor puntual. Para comprender mejor la interacción del CEO con las olas, se calcularon los coeficientes de transmisión y reflexión, junto con dos parámetros no lineales: sesgo y asimetría. Los resultados indican que, con este sistema, se puede generar más potencia de las olas más cortas, $T = 4$ s, en comparación con $T = 8$ s para la misma altura de ola. Esto implica que en sitios donde las ondas cortas son predominantes, como es el caso del Golfo de México y mar Caribe, se podría emplear una boya pequeña sin una disminución en la eficiencia y con reducciones considerables de costos, comparado con sitios de oleaje más largo (i.e. Pacífico Mexicano). Finalmente, este modelo de CEO aumenta los valores de sesgo de ola, parámetro que está relacionado con el transporte de sedimentos hacia la costa; por lo tanto, si se diseña adecuadamente un arreglo de CEOs instalados cerca de la costa, además de la energía absorbida de las olas, también podría promoverse un efecto de recuperación de arena en la playa.

* Sosa, Carlos, Ismael Mariño-Tapia, Rodolfo Silva, and Rodrigo Patiño. "Numerical Performance of a Buoy-Type Wave Energy Converter with Regular Short Waves." *Applied Sciences* 13, no. 8 (2023): 5182.

ABSTRACT*

In the middle of a climatic crisis, derived from the massive use of fossil fuels, alternative energy sources catch the interest of society in search of sustainable processes. Energy from the oceans is perhaps the less explored, including waves. The numerical performance of a buoy-type Wave Energy Converter (WEC) under regular wave conditions is described in this work. The open-source computational fluid dynamics software OpenFOAM® was used to couple a grid for the solid body motion of the WEC, with the grid designed for wave propagation, in order to calculate buoy movement parameters. The buoy has a horizontal, cylindrical structure, with a pivot point for semi-axis rotation. Five buoy-radiuses were analyzed, as this parameter considerably increases the efficiency of the point absorber. To better understand the interaction of the WEC with the waves, the transmission and reflection coefficients were calculated, along with two non-linear parameters: skewness and asymmetry. The results indicate that, with this system, more power can be extracted from shorter waves, $T = 4$ s, compared to $T = 8$ s of the same wave height. This implies that a small buoy could be employed at sites with this prevailing wave regime, as on the North Yucatan coast, without a decrease in efficiency and with considerable cost reductions. Finally, this WEC increases the values of wave skewness, which is linked to onshore sediment transport; therefore, if appropriately designed, WEC arrays installed near the coast could also promote onshore sediment transport.

* Sosa, Carlos, Ismael Mariño-Tapia, Rodolfo Silva, and Rodrigo Patiño. "Numerical Performance of a Buoy-Type Wave Energy Converter with Regular Short Waves." *Applied Sciences* 13, no. 8 (2023): 5182.

CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
CONTENIDO.....	III
LISTA DE FIGURAS.....	V
LISTA DE TABLAS.....	VIII
ACRÓNIMOS	IX
NOMENCLATURA	X
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. MARCO CONTEXTUAL.....	4
1.1 Demanda energética mundial	4
1.2 Energía de las olas y su aprovechamiento.....	5
1.3 Antecedentes del Convertidor de Energía del Oleaje.....	6
1.4 Estado actual del dispositivo y perspectivas	10
1.5 Objetivos	11
1.5.1 Objetivos específicos	11
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	12
2.1 Energía del Oleaje.....	12
2.1.1 Teoría lineal	14
2.2 Tecnologías de energía del océano	17
2.2.1 Convertidores de Energía del Oleaje (CEO)	18
2.3 Fuerzas que intervienen en un CEO	20
2.4 Componentes del dispositivo CEO.....	22
2.4.1 Volante de inercia del CEO.....	23
2.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	26
2.6 Software de simulación OpenFOAM	27
2.6.1 Modelo numérico.....	29
2.6.2 Solucionador sixDoFRigidBodyMotion	31

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	32
3.1 Configuración de la simulación	32
3.2 Cálculos de la energía del oleaje	36
3.2.1 Energía de las olas y su absorción por la boya.....	36
3.2.2 Transporte de sedimentos y propiedades de oleaje no lineales	39
3.3 Componentes del dispositivo del CEO	41
3.3.1 Revoluciones de la polea	46
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48
4.1 Tiempo de ejecución y estabilidad del modelo.....	48
4.2 Pruebas de sensibilidad	50
4.3 Absorción de potencia del dispositivo CEO.....	55
4.4 Efectos potenciales del CEO sobre el transporte de sedimentos y la protección costera	58
4.5 Análisis de componentes del dispositivo	63
CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXOS.....	82
Anexo A. Mapa de distribución global de la potencia media anual del oleaje	82
Anexo B. Captura del programa ParaView durante el análisis de simulación.....	82
Anexo C. Archivos de ejemplo de la simulación para boya en oleaje regular ($R = 0.25 m$, $T = 4 s$ y $H = 1 m$).....	83
Anexo D. Código para la depuración de datos obtenidos en la simulación (<i>Phyton</i>).	86
Anexo E. Imágenes del dispositivo CEO escala 1:20.	88

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** a) Dispositivo MICO-1T, escala 1:20; b) Esquema de partes principales. La energía absorbida por la boya se transforma en energía cinética rotacional que se convierte en energía eléctrica. Fuente: [40]..... 7
- Figura 2.** Convertidor de energía del oleaje MICO-1T: a) esquema de funcionamiento, b) prototipo a escala 1:10. Fuente: [42]. 9
- Figura 3.** Dispositivo MICO-2T: a) escala 1:20, b) pruebas en el canal de oleaje del IIUNAM. Fuente: [41]..... 9
- Figura 4.** Características del oleaje en Sisal, Yucatán: a) Matriz de disponibilidad (H_s , T_p) con isolíneas de potencia, b) dirección predominante de potencia. Fuente: [43]. 11
- Figura 5.** Diagrama de periodos de la distribución de energía del oleaje en el océano. Elaboración propia basado en: [46]. 12
- Figura 6.** Caracterización de la distribución global de la potencia media anual del oleaje realizada por Gunn y Stock-Williams [22]. Los colores de los contornos permiten distinguir los diferentes continentes. 13
- Figura 7.** Características de una onda monocromática $\eta(x, t)$ propagándose en dirección x , en el tiempo t . a) distribución espacial con $t = t_0$, b) distribución temporal con $x = x_0$ 15
- Figura 8.** Clasificación de los dispositivos de captura de energía del oleaje. Fuente: [52, 53]. 18
- Figura 9.** Convertidores de energía del oleaje: a) CETO 6, absorbedor puntual, 2015 [54]; b) Oyster, cuerpo oscilante o péndulo invertido, 2012 [55]; c) OceanLinx, columna oscilante de agua, 2014 [56] y d) Pelamis, atenuador, 2008 [29]. Imágenes tomadas de: [53]. 19
- Figura 10.** Dispositivo CEO donde se pretende implementar la boya..... 23
- Figura 11.** Representación del volante de inercia para el dispositivo CEO estudiado. . 24
- Figura 12.** Torque y velocidad angular en el volante de inercia para un ciclo de trabajo. 25
- Figura 13.** Diagrama del proceso para la simulación CFD. Fuente: [60]. 27
- Figura 14.** Representación de los grados de libertad de un cuerpo rígido: traslación (surge, sway y heave) y rotación (roll, pitch y yaw) [75]. 31
- Figura 15.** NWT para la simulación con una boya de 0.25 m de radio R . La propagación de la ola es en la dirección del eje x positivo, la elevación de la superficie libre coincide

con la dirección z y la longitud de la boya está en la dirección y . Los medidores de ola se colocan de -10 a 10 m en la dirección x , con $y = 0$	33
Figura 16. a) Boya con radio R ; B es el ancho característico (1 m) y L_b es la longitud del brazo, mientras que y es el eje de rotación, b) Vista superior de la boya.	34
Figura 17. Representación esquemática del proceso de implementación de simulación de la boya cilíndrica.....	36
Figura 18. Representación esquemática del modelo geométrico del dispositivo.....	42
Figura 19. Algunas restricciones que podrían presentarse durante el funcionamiento del dispositivo: a) la boya baja demasiado y tiene contacto con el soporte, b) la boya sube demasiado y golpea el soporte, c) la boya golpea la polea o sobrepasa su distancia y d) sin soporte y el brazo superior toca la polea.	44
Figura 20. Oleaje incidiendo en la boya en un caso ideal donde la boya sigue la trayectoria de superficie libre sin considerar amortiguamiento del agua, masa añadida o fuerzas externas: a) la boya queda en la cresta de la ola, b) la boya queda en el valle de la ola.....	45
Figura 21. Comparación de la elevación de la superficie libre (η) del resultado teórico y la simulación en la entrada del NWT: a) $T = 4$ s y b) $T = 8$ s , con $H = 1$ m en ambos casos. El NWT contiene la boya R_2	48
Figura 22. Cien olas simuladas para la boya con $R = 0.25$ m : a) para $T = 4$ s y b) para $T = 8$ s . Los detalles de P1 a P9 se muestran en la Tabla 5	49
Figura 23. Potencia media absorbida y su desviación estándar para las pruebas de sensibilidad de los casos presentados en la Tabla 6 ($H = 1.0$ m y $R = 0.25$ m), organizados por los parámetros ID, OD, AD y período de ola.....	53
Figura 24. Análisis estadístico para el centro de masa ($CofM_Z$), momento angular (Mom_Ang), velocidad angular (Vel_Ang), torque y potencia de salida (Pot) para los casos presentados en la Tabla 6	55
Figura 25. a) Potencia promedio absorbida por el CEO para diferentes tamaños de radio con períodos de oscilación: $T = 4$ s y $T = 8$ s . b) Eficiencia de captura por unidad de longitud de boya para diferentes valores con el diámetro de boya normalizado (radio/longitud de onda) para $T = 4$ s y $T = 8$ s períodos de olas. AR = 0.7, AD = 1, ID = 0.001 y OD = 1.5. ** OD = 2.0.	56
Figura 26. Registros de elevación de la superficie libre para la prueba con $H = 1.0$ m , $T = 4$ s y $R = 0.25$ m con sensores virtuales a distancias simétricas por cada lado de la boya: a) 2, b) 4 y c) 8 m . Los valores negativos se refieren a la izquierda de la boya y los positivos a su derecha.....	59

Figura 27. Registros de elevación de la superficie para la prueba con $H = 1.0\text{ m}$, $T = 8\text{ s}$ y $R = 0.25\text{ m}$ para gálibos virtuales a distancias simétricas a cada lado de la boya: a) 2, b) 4 y c) 8 m. Los valores negativos se refieren a la izquierda de la boya y los positivos a su derecha.....	60
Figura 28. Sesgo (asimetría horizontal a), b)) y velocidad de asimetría (c, d)) evaluados con cinco radios de boyas para $T = 4\text{ s}$ y $T = 8\text{ s}$. Los diferentes colores representan diferentes tamaños de boyas. Las líneas discontinuas verticales muestran la posición de la boya y delimitan las diferentes longitudes de la boya, incluyendo el brazo.	62
Figura 29. Longitud de la cuerda en función del ángulo del brazo de la boya con los ángulos máximo y mínimo permitidos por la limitaciones físicas del dispositivo (Figura 19).	63
Figura 30. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo, donde $h_e < L_e$. El rango de trabajo pasa por el ángulo θ_{Rf} y se satisface el sistema de ecuaciones de (60).	64
Figura 31. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo, donde $\theta_{wmin} < \theta_{min}$, donde los valores obtenidos por el sistema de ecuaciones (60) ya no son aplicables.....	65
Figura 32. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo ($h_e = L_e$).	65
Figura 33. Casos posibles cercanos a la escala 1:20 del dispositivo: a) se obtiene un máximo cambio de la cuerda con $h_e > L_e$, b) disminuyendo a_b se obtiene $h_e < L_e$ y θ_{Rf} se desplaza a la derecha, c) $h_e < L_e$ disminuye la razón de cambio y c) no se tiene una razón de cambio máxima, por lo que el ángulo mínimo de trabajo será el mínimo permitido $\theta_{wmin} = \theta_{min}$	66
Figura 34. Distribución global de la potencia media anual del oleaje [48].	82
Figura 35. Captura de pantalla durante el análisis de simulación en OpenFOAM y visualización en ParaView.	82
Figura 36. Dispositivo CEO en la etapa de modificaciones.	88
Figura 37. Dispositivo CEO en una prueba de campo (Telchac, Yucatán, México).....	88

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación de dispersión según la clasificación de las aguas superficiales.	17
Tabla 2. Propiedades por fase.	32
Tabla 3. Valores probados para el radio de la boya R y su longitud de brazo (L_b).	33
Tabla 4. Tiempo de cálculo utilizando el método de transformación de malla (<i>morphing method</i>).	50
Tabla 5. Coeficientes para las pruebas de sensibilidad, en cada caso simulado con $H = 1.0\text{ m}$, $T = 4\text{ s}$ y 8 s , realizadas para la boya con $R = 0.25\text{ m}$	51
Tabla 6. Pruebas de sensibilidad para evaluar los efectos de los parámetros AD, ID y OD en las simulaciones.	52
Tabla 7. Coeficientes de energía transmitida (K_t^2), reflejada (K_r^2), y absorbida/disipada (K_d^2) para diferentes tamaños de boyas y durante los dos períodos de olas.	58
Tabla 8. Valores de las variables que interviene en el funcionamiento del dispositivo.	63

ACRÓNIMOS

	Descripción
6-DoF	Solucionador del movimiento de cuerpo rígido con seis grados de libertad (Sixdofrigidbodymotion solver)
CEO	Convertidor de Energía del Oleaje
CFD	Dinámica de fluidos computacional (Computational Fluid Dynamics)
CINVESTAV	Centro de Investigación y de Estudios Avanzados
EMEC	European Marine Energy Centre
IIUNAM	Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México
MICO	Módulo Independiente de Captura de Olas
MULES	Limitador universal multidimensional para soluciones explícitas (Multidimensional Universal Limiter for Explicit Solution)
NMA	Nivel Medio del Agua
NWT	Tanque de ondas numérico (Numerical Wave Tank)
OpenFOAM	Operación y manipulación de campo abierta (Open Field Operation And Manipulation)
OTEC	Conversión de energía térmica del océano (Ocean thermal energy conversion)
OWC	Columna de agua oscilante (Oscillating Water Column)
PIMPLE	Método implícito de presión para la ecuación relacionada con la presión (Pressure Implicit Method for Pressure-Linked Equation)
PISO	Presión implícita con separación de operadores (Pressure Implicit with Splitting of Operators)
SGE	Energía de gradiente de salinidad (Salinity Gradient Energy)
SWAM	Simulador de olas costeras (Simulating Waves Nearshore)
VOF	Volumen de fluido (Volumen Of Fluid)
WAM	Modelo de onda (Wave Model)
WEC	Convertidor de energía de olas (Wave Energy Converter)
WW3	Visualizador de olas (Wavewatch III)

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción	Unidad (SI)
$\ddot{\theta} = \alpha_{\theta}$	Aceleración angular	rad/s^2
\ddot{z}	Aceleración en dirección z	m/s^2
H, H_0	Altura de la ola	m
H_r	Altura de ola reflejada	m
H_i	Altura de olas incidente	m
h_e	Altura del poste	m
C_w	Ancho de captura o absorción de energía	m
d	Ancho de la polea	m
θ_i	Ángulo de entrada	rad
\emptyset	Ángulo de la polea	rad
θ_{Rf}	Ángulo de referencia para mejorar la eficiencia	rad
θ_o	Ángulo de salida	rad
θ_w	Ángulo de trabajo	rad
θ_{wmax}	Ángulo de trabajo máximo	rad
θ_{wmin}	Ángulo de trabajo mínimo	rad
θ	Ángulo del brazo	rad
ϕ_T	Ángulo total de la polea en un ciclo del sistema	rad
A_s	Asimetría del oleaje	-
Δc_w	Cambio de la longitud de la cuerda entre los ángulos de trabajo	m
$\Delta U = U_2 - U_1$	Cambio en la energía cinética	J
Δc_i	Cambio en la longitud de la cuerda	m
$\Delta c_{i'}$	Cambio en la longitud de la cuerda durante la elevación de la boya	m
dc	Cambio infinitesimal de la longitud de la cuerda	m
$d\phi$	Cambio infinitesimal del ángulo de la polea	rad
\mathbf{u}	Campo vectorial de velocidad en el fluido	m/s
β	Coefficiente de amortiguamiento	$N \cdot m$
K_d	Coefficiente de disipación	-
C_s	Coefficiente de fluctuación de velocidad	-
K_r	Coefficiente de reflexión	-
S	Coefficiente de rigidez hidrostática en el oleaje	kg/s^2
K_t	Coefficiente de transmisión	-
y_{uw}	Coordenada en y del centro de la boya en el punto más alto de trabajo	m
y_{dw}	Coordenada en y del centro de la boya en el punto más bajo de trabajo	m

ρ	Densidad	kg/m^3
E_d	Densidad de energía o energía específica	J/m^2
P_d	Densidad de potencia	W/m^2
ρ_w	Densidad del agua	kg/m^3
b	Distancia del NMA al eje de rotación de la boya	m
x	Distancia en dirección x	m
e_{cw}	Eficiencia de captura	-
e_{CEO}	Eficiencia del CEO	-
e	Eficiencia final	-
E	Energía	J
U	Energía cinética	J
U_i	Energía cinética de entrada	J
E_r	Energía cinética de rotación de la boya	J
U_o	Energía cinética de salida	J
α	Fracción de fase-agua	-
ω	Frecuencia angular	s^{-1}
F_x	Fuerza aplicada en dirección x	N
F_y	Fuerza aplicada en dirección y	N
f_r	Fuerza de amortiguamiento de la radiación	N
f_e	Fuerza de excitación de la ola	N
f_h	Fuerza de flotabilidad hidrostática	N
F_{FK}	Fuerza de Froude-Krylov	N
F_0	Fuerza de la ola	N
F_r	Fuerza de radiación hidrodinámica	N
f_{hd}	Fuerza hidrodinámica debida a la ola incidente	N
f_R	Fuerza resistiva inducida por el sistema	N
g	Gravedad	$9.81 m/s^2$
s_{H_0}	Longitud de arco descrita para el centro de la boya	m
a_b	Longitud de la boya al eje	m
c	Longitud de la cuerda	m
$c(\theta_{i+1})_{i+1}$	Longitud de la cuerda en función del cambio discreto del ángulo del brazo de la boya del elemento $i + 1$	m
$c(\theta_i)_i$	Longitud de la cuerda en función del cambio discreto del ángulo del brazo de la boya del elemento i	m
L	Longitud de la ola	m
$L_e = L_b - a_b$	Longitud del brazo de la cuerda	m
B	Longitud física del CEO	m
w/h	Longitud relativa $w = L_b + R$	m
L_b	Longitud total del brazo	m
M	Masa de la boya	kg
M_b	Masa de la boya	kg

m	Masa de polea	kg
C_{wMax}	Máximo ancho de captura (surge/pitch)	k^{-1}
I	Momento de inercia	kg/m^2
I_b	Momento de inercia de la boya	kg/m^2
M_i	Momento de torsión del elemento i	$N \cdot m$
ϵ_{df}	Número de modo según el grado de libertad	-
k	Número de onda	m^{-1}
H_d	Pérdida en la altura de la ola	m
T	Periodo de la ola	s
W	Peso de la boya	N
P_{ab}	Potencia absorbida por la boya	W
P_{out}	Potencia de salida del generador	W
P_{wf}	Potencia por metro de frente de onda	W/m
h	Profundidad del agua	m
A_{wp}	Proyección del plano en el agua	m^2
R	Radio de boya	m
r	Radio de la polea	m
s_k	Sesgo del oleaje	-
η	Superficie libre	m
T_r	Tensión de la cuerda	N
t	Tiempo	s
τ_g	Torque	$N \cdot m$
τ_i	Torque de entrada	$N \cdot m$
τ_o	Torque de salida	$N \cdot m$
$\mathcal{H}(\tilde{u})$	Transformada de Hilbert para la velocidad oscilatoria.	-
\hat{n}	Vector unitario normal a la superficie	$m, N, etc.$
$\omega = \dot{\theta}$	Velocidad angular	rad/s
$\dot{\theta}_i = \omega_i$	Velocidad angular de entrada	rad/s
ω_r	Velocidad angular de la boya	rad/s
$\dot{\theta}_o = \omega_o$	Velocidad angular de salida	rad/s
$\omega_i, i = 1,2,3,4$	Velocidad angular etapas de un ciclo de trabajo	rad/s
\tilde{u}_{rms}	Velocidad cuadrática media	m/s
\mathbf{u}_c	Velocidad de compresión	m/s
C_g	Velocidad de grupo	m/s
C	Velocidad de propagación de la ola/celeridad	m/s
\tilde{u}	Velocidad oscilatoria cercana al fondo	m/s
μ	Viscosidad dinámica	Ns/m^2
V	Volumen	m^3

INTRODUCCIÓN

Con la creciente demanda energética y el impacto ambiental que generan las fuentes fósiles de energía, el auge de las energías alternativas juega un papel importante en la reducción de los contaminantes, en especial del dióxido de carbono emitido a la atmósfera [1]. En 2021, la participación de las energías renovables para la generación de electricidad alcanzó un 28.7 % del consumo total a nivel mundial, donde la demanda de electricidad llegó a su cifra récord [2]. Dentro de estas energías renovables, las centrales hidroeléctricas continúan dominando, seguidas de la generación eólica y las tecnologías solar fotovoltaicas, con un rápido crecimiento en los últimos años en términos de capacidad instalada [3]. Estas tecnologías, capaces de recolectar la energía solar y del viento, son de las más competitivas, ya se encuentran en etapa madura y no tiene problemas en su comercialización, además de que permanecen en constante desarrollo [4]. Desafortunadamente, estos recursos suelen existir de manera intermitente y presentar variabilidad en diferentes escalas de tiempo [5]. En contraste, la energía del oleaje no es solo un recurso extenso, sino que es más confiable que la mayoría de las fuentes de energía renovable; en determinadas regiones tiende a estar disponible un 90 % del tiempo, en comparación con los recursos solar y eólico, que están disponibles entre un 20 y un 30 % del tiempo [6]. Además, al menos teóricamente, la intensidad promedio de la energía del oleaje contiene un mayor potencial que otras fuentes ($2-3 \text{ kW}/\text{m}^2$) justo debajo de la superficie oceánica perpendicular a la dirección de propagación de la ola [7].

El océano cubre alrededor del 70 % de la superficie terrestre y representa un gran potencial energético que aún no se ha explotado. El potencial teórico estimado de energía renovable proveniente del océano es de aproximadamente $151,300 \text{ TW h/año}$ ($\sim 544.7 \text{ EJ}$) [8], el cual podría suplir aproximadamente 1.5 veces la demanda mundial (374 EJ en 2020 [9]). La variedad de formas diferentes de energía contenida en el océano, como los son la energía de las corrientes marinas, las mareas, el gradiente salino, el gradiente térmico y la biomasa, lo hacen atractivo como fuente de energía alternativa [10]. La extracción de esta energía puede ser empleada para la generación eléctrica, desalinización o bombeo de agua. Sin embargo, debido a su naturaleza estocástica y a la presencia de condiciones extremas (tormentas), aprovechar la energía del oleaje se

ha convertido en un verdadero desafío. A pesar de los retos y las limitaciones, han sido propuestas diferentes tecnologías capaces de recolectar la energía del oleaje. Generalmente éstas son clasificadas en tres grandes grupos: columnas de agua oscilantes, cuerpos flotantes y sistemas de desbordamiento. Aunque han sido investigadas por décadas, su importancia como fuente alternativa de energía ha retomado relevancia en los últimos años. Sin embargo, aún se encuentran en etapas tempranas y no son comercialmente viables; por lo tanto, no son económicamente competitivas con los sistemas alimentados con combustibles fósiles [11]. Otro problema de carácter económico, que afecta la comercialización de este tipo de energía, son los altos costos de inversión inicial, de instalación y de mantenimiento, haciendo que este tipo de sistemas tenga un coste mayor que otros sistemas de energía alternativa [12]. Es por ello que este tipo de sistemas requiere ser mejorado a fin de alcanzar la fase comercial a gran escala. Para la planificación y gestión adecuada de un recurso energético, se debe tomar en cuenta una serie de factores, como el tipo de tecnología, su eficiencia, el suministro, la demanda, el uso y disponibilidad del recurso [13].

Gracias a la continua mejora en la capacidad de procesamiento, los programas computacionales se han vuelto una herramienta que facilita el desarrollo de las tecnologías en cuestión. Modelos como el WAM (Wave Model), WW3 (WaveWatch III) y el SWAN (Simulating Waves Nearshore) son ampliamente usados para pronosticar a corto y a largo plazo los recursos energéticos, simulando las características climáticas y obteniendo un análisis de factibilidad de las zonas, acorde con sus condiciones de oleaje [14]. Por otro lado, los modelos que incluyen a los dispositivos capaces de absorber la energía oceánica, son empleados para mejorar el diseño y la eficiencia, así como para mejorar el comportamiento ante las condiciones adversas del océano [15]. Para ello, se emplean programas computacionales donde interviene la dinámica de fluidos computacional; ejemplos de este tipo de programas son Ansys, Flow-3D y OpenFOAM, entre otros, donde los primeros dos son programas comerciales y el último es un software libre de código abierto. Del mismo modo, contemplando las características esenciales de un dispositivo, se puede simular un arreglo de los dispositivos formando granjas de oleaje; finalmente, se puede incluir el análisis de costo-beneficio y el ciclo de vida del dispositivo. A finales del siglo XX, más de mil patentes relacionadas con la conversión de energía del

oleaje habían sido registradas [6, 16, 17]. Sin embargo, hasta el momento no existe un dispositivo estándar capaz de capturar la energía del oleaje de cualquier región, esto debido a la variabilidad de oleaje y sus características espectrales (amplitud, periodo pico y dirección), lo que lleva a que cada sitio presente sus propias características particulares.

El presente trabajo se enfoca, por medio de la simulación numérica, en el análisis de la boya de un dispositivo Convertidor de Energía del Oleaje (CEO) y su impacto en el transporte sedimentario y la protección costera. El Capítulo 1 contempla la literatura que coloca en contexto la situación actual de la crisis energética, las fuentes convencionales y la transición hacia las energías renovables; asimismo, enfatiza el potencial energético oceánico y su aprovechamiento para la generación eléctrica. En este mismo apartado se incluye el objetivo general y los objetivos específicos. El Capítulo 2 presenta el marco teórico, donde se describe el CEO y las características principales del software OpenFOAM. El Capítulo 3 describe la metodología abordando las ecuaciones de gobierno aplicadas a los fluidos en el modelo numérico; integra las herramientas para la discretización del dominio y los coeficientes asociados a la deformación de la superficie libre debido al movimiento del cuerpo rígido; se incluye la descripción del solucionador *InterFoam*, utilizado para fluidos multifásicos incompresibles, isotérmicos e inmiscibles (agua y aire, en este estudio); se proporciona una breve explicación de la teoría del oleaje utilizada en las simulaciones y los enfoques para los cálculos de potencia, junto con una descripción general de la forma en que las boyas, asociadas con los CEOs, absorben energía. El Capítulo 4 presenta los resultados numéricos del análisis de sensibilidad del modelo, la absorción de energía debida a los diferentes diámetros de boya y los efectos que tiene el CEO en la modificación de las propiedades no lineales del oleaje. De la misma manera, son incluidas las discusiones sobre la deformación de la malla, la absorción de energía y los efectos potenciales del transporte de sedimentos debido al movimiento del objeto flotante. Finalmente, en el último apartado son presentadas las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

CAPÍTULO 1. MARCO CONTEXTUAL

1.1 Demanda energética mundial

En las últimas décadas, el consumo de energía a nivel mundial ha aumentado exponencialmente y se destina principalmente para la industria y el transporte. Para el año 2040 se estima una proyección de 17,480 Mtep (Millones de toneladas de petróleo equivalente, 1tep = 41.87 GJ o 11.63 MWh), con un consumo eléctrico de 35,407 TWh [18] y se espera que la demanda eléctrica se duplique en los próximos 40 años, siendo cubierta principalmente por el aumento en la contribución de las energías renovables [19]. En 1990, la demanda total global de energía alcanzó los 8,795 Mtep, en el año 2017 fue de 14,080 Mtep (de los cuales 25,591 TWh fue para generación eléctrica) y en el año 2019 fue de 14,385 Mtep, donde el consumo eléctrico mundial alcanzó los 26,951 TWh [20]. En este mismo año, la energía renovable aportó para la generación eléctrica 26.5 %, principalmente por la industria hidroeléctrica, seguida de la conversión eólica y la tecnología solar fotovoltaica. Para el 2021 el aporte de las energías renovables al sector eléctrico se estimó cerca de un 30 % de la generación total; al mismo tiempo, las tecnologías emergentes en la producción eléctrica, incluidas las que provienen del recurso oceánico, aumentaron alrededor de un 7 % desde el 2019 [20].

El camino hacia una transición energética se debe llevar a cabo ciertamente mediante procesos sostenibles y combatiendo el cambio climático. Para alcanzar este objetivo, es necesario reducir la explotación de combustibles fósiles y enfocarse no solo en el aprovechamiento de fuentes renovables, sino asegurarse también que éste se realice de manera sostenible. Se estima que las energías renovables son capaces de suministrar dos terceras partes de la demanda global de energía y, al mismo tiempo, contribuir en su mayoría a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente el dióxido de carbono [21]. Por otro lado, aunque el recurso oceánico es una fuente vasta de energía, la tecnología para su aprovechamiento no ha sido completamente desarrollada, posiblemente por lo complejo de su captación o su distribución no uniforme, lo que implica una oportunidad de innovación tecnológica.

1.2 Energía de las olas y su aprovechamiento

La energía del oleaje o undimotriz constituye una importante fuente renovable y se ha calculado que su potencial energético a lo largo de las costas en el mundo es de unos 2.11 TW [22]. El oleaje contiene la más alta densidad de energía en comparación con otras fuentes de energía renovable [23]. Sin embargo, la extracción eficiente de energía proveniente de esta fuente sigue siendo un desafío considerable. Muchas tecnologías han sido propuestas y varias de ellas aún se encuentran en desarrollo o bajo investigación. Al mismo tiempo, tienen que tomarse en cuenta los problemas inherentes a las energías renovables, como por ejemplo la fluctuación de la potencia de salida o los precios no competitivos en la producción de energía [24, 25].

Por otro lado, los dispositivos que intentan aprovechar la energía proveniente de este tipo de fuentes se enfrentan a varios problemas de optimización relacionados con el diseño, como la forma y el tamaño, debido a que el recurso es dinámico y se encuentra en constante cambio (dinámica intrínseca del espectro direccional del oleaje) [26, 27]. Esto significa que las tecnologías específicas de los Convertidores de Energía del Oleaje (CEOs) se adaptan mejor a un conjunto dado de condiciones de las olas. Por lo tanto, la estimación de la disponibilidad de energía del oleaje debe tener en cuenta esta condición intrínseca, a menos que se desarrolle una tecnología muy flexible y adaptable a todos los tipos de oleaje. Un ejemplo de dispositivo que llegó a la fase comercial fue el Pelamis Wave Power, en Aguçadoura, Portugal, siendo la primera granja comercial de energía undimotriz del mundo. Fue puesta en marcha en 2008, con capacidad de 2.25 MW de generación de energía suministrada por tres dispositivos; sin embargo, sólo funcionó durante un breve período debido a dificultades técnicas con algunos de sus rodamientos [28, 29]. Una segunda versión de este dispositivo apareció en el Reino Unido en 2009, con 750 kW de generación de energía: el Pelamis P2 (de la compañía Pelamis Wave [29]) cuyo sitio de prueba fue el EMEC (European Marine Energy Centre) en las Islas Orkney, en Escocia. Desafortunadamente, la empresa tuvo dificultades financieras en 2014 y detuvo sus operaciones [30]. Otro concepto fue el Oyster 2, desarrollado para Aquamarine Power, con una capacidad de generación de 800 kW; de la misma manera se instaló y conectó a la red en el EMEC, en junio de 2012. El programa de prueba finalizó

en 2015 y el dispositivo se retiró cuando la empresa suspendió operaciones [31]. Otro ejemplo es el absorbedor puntual sumergido, conocido como dispositivo CETO, el cual fue instalado en 2010 en Fremantle, Australia; este convertidor fue conectado a la red en 2015 y parte del excedente de producción de energía se destinaba a la desalinización del agua de mar. Posteriormente, la unidad CETO 6 a escala comercial comenzó operaciones en 2017 con un sistema de capacidad instalada de 20 MW y con planes de ampliarse a 100 MW [32]. En la actualidad, estos sistemas se continúan probando en varias regiones de Europa [33].

Las experiencias acumuladas se han utilizado para mejorar la tecnología de los CEOs y optimizar la eficiencia del sistema. No obstante, este tipo de sistema para la producción de energía eléctrica es generalmente complejo y oneroso, con un costo de operación y mantenimiento relativamente alto [34]. Dentro de los aspectos a considerar en el desempeño de un CEO pueden encontrarse el entorno local y las características del dispositivo, así como el efecto de la interacción con otros dispositivos considerando una granja de energía undimotriz [35]. Además, es importante tener en cuenta el ciclo de vida completo de los dispositivos, desde la construcción hasta el desmantelamiento y el reciclaje de las piezas, incluido el impacto ambiental de ello [36, 37]. La complejidad de las tecnologías de energía del oleaje a menudo va de la mano con sus costos de fabricación y mantenimiento; por lo tanto, un diseño simple, probado y optimizado, podría minimizar los costos y volverse comercialmente viable [38].

1.3 Antecedentes del Convertidor de Energía del Oleaje

Entre los dispositivos que se asemejan al del presente estudio se encuentra el prototipo que tiene sus inicios en el año 2012, estudiado por el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), con diseño y patente por parte de la empresa Laboratorio de Investigación Sexto Sol [39] (**Figura 1-a**). Este dispositivo CEO es un Módulo Independiente de Captura de Olas, conocido como MICO.

El dispositivo está construido en aluminio con tornillería de acero inoxidable, compuesto por una boya cilíndrica colocada horizontalmente y sujeta al extremo de dos brazos. En uno de los extremos opuestos del brazo se sujeta una cuerda que le da

tracción a un volante de inercia, colocado por encima del eje de rotación del brazo; el eje del volante de inercia se encuentra conectado a un generador eléctrico. El otro extremo de la cuerda se sujeta a un contrapeso para mantener tensionada la cuerda. El diagrama de funcionamiento es presentado en la **Figura 1-b**.

El principio de funcionamiento se basa en dos etapas: la primera es la de tracción, ocurre cuando la cresta de la ola incide en la boya y ésta realiza un movimiento ascendente, con lo cual la boya adquiere energía cinética rotacional que se transfiere, por medio de la cuerda, al volante de inercia acoplado al generador eléctrico; en la segunda etapa, de restitución, la boya desciende junto con la cresta de la ola y el sistema de tracción regresa a su posición inicial para reiniciar el ciclo. De este dispositivo se deriva una serie de prototipos similares.

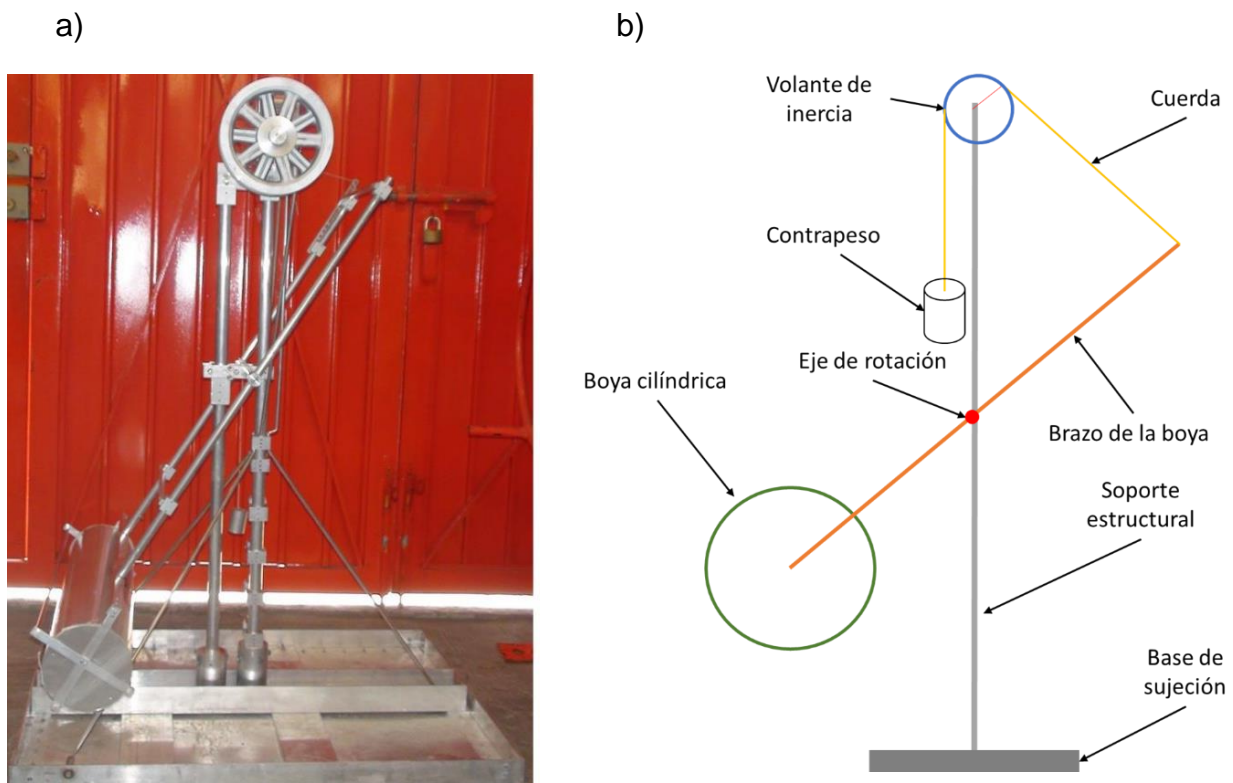


Figura 1. a) Dispositivo MICO-1T, escala 1:20: b) Esquema de partes principales. La energía absorbida por la boya se transforma en energía cinética rotacional que se convierte en energía eléctrica. Fuente: [40].

Los ensayos fueron realizados en el canal de olas de la IIUNAM. Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo en oleaje regular e irregular con alturas de ola de 5, 7.5 y 10 cm, con periodos que van de 0.8 a 2.2 s, mientras que los diámetros de boya del

dispositivo fueron de 10, 15 y 20 cm, con longitudes de brazo de boya de 80, 90 y 100 cm. En este estudio se observó que el desplazamiento de la palanca es mayor cuando el nivel del agua se encuentra por debajo del eje de rotación del brazo de la boya (bajamar) y se determinó que la eficiencia del dispositivo mejora en oleaje con periodos cortos y si la altura de la ola es mayor al diámetro de la boya con una longitud del brazo de la boya de alrededor de 1/3 de la longitud de la ola. Con esto se alcanzó una eficiencia del 37 % en oleaje irregular y hasta un 89.3 % en oleaje regular [40].

En 2015 las pruebas de campo se realizaron en el puerto de Progreso, en Yucatán, en colaboración con el Departamento de Recursos de Mar del Centro de investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV), Unidad Mérida Debido a varios problemas técnicos, el dispositivo tuvo que ser retirado por lo que el periodo de prueba fue de alrededor de 5 horas. Sin embargo, este ensayo sirvió para determinar algunos aspectos a mejorar del diseño MICO-1T a escala 1:10 [41]. Ese mismo año se realizó la caracterización del oleaje de las costas de Puerto Morelos, Q. Roo, México, a fin de conocer las condiciones de operación previo a las pruebas reales del MICO-1T a escala 1:10 (**Figura 2**). Se determinó que la altura de ola oscila entre 0.9 y 1.6 m con periodos de 5.9 a 7.4 s [42]. En 2016 se llevaron a cabo las pruebas de campo del MICO-1T a escala 1:10 en las costas de Puerto Morelos, Q. Roo. Por cuestiones técnicas, el dispositivo fue instalado a 1.6 m de profundidad, cuando su rango de operación estaba previsto entre 0.6 y 1 m de profundidad. El dispositivo estuvo operando aproximadamente 7 semanas. La eficiencia obtenida fue de 1.3 %, mientras que en las pruebas de laboratorio la eficiencia alcanzó un 40 % [41]. Probablemente la baja eficiencia se debió a que no fue instalado como fue previsto y a los problemas en el sistema de captación en la unión del brazo y la boya. Por otro lado, se observó que la estructura sirvió como arrecife artificial.

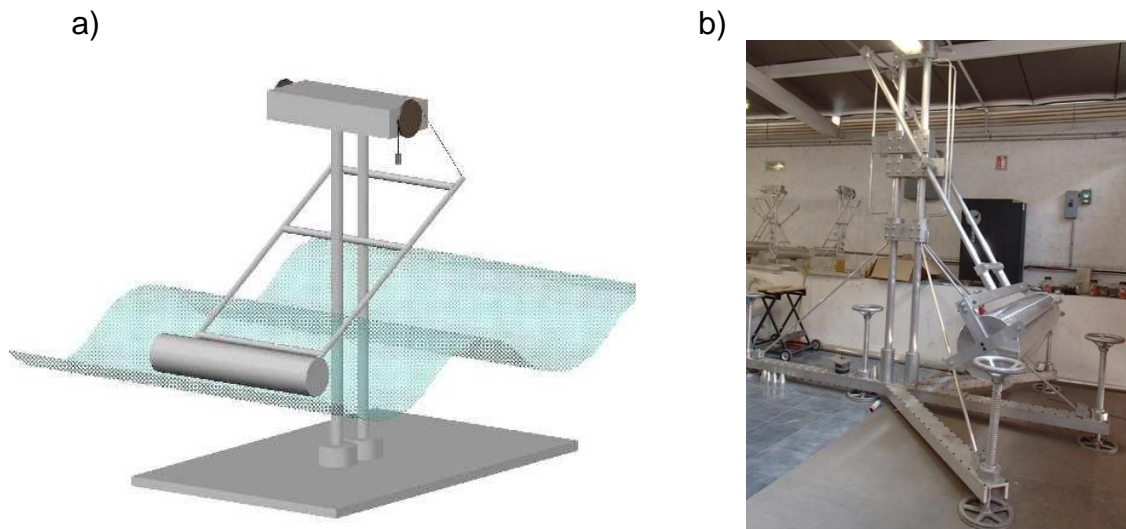


Figura 2. Convertidor de energía del oleaje MICO-1T: a) esquema de funcionamiento, b) prototipo a escala 1:10. Fuente: [42].

Finalmente, se presenta el dispositivo MICO-2T a escala 1:20. A diferencia del MICO-1T, éste consta de dos brazos y dos boyas en lugar de una (**Figura 3**). Los ensayos se realizaron con oleaje regular e irregular a 0.4 y 0.5 m de profundidad, con periodos de 0.8 s y 1 s, con una altura de ola de 0.1 m. Para este dispositivo, también se determinó que la eficiencia es mayor en oleaje regular, con periodos cortos y a baja profundidad [41].

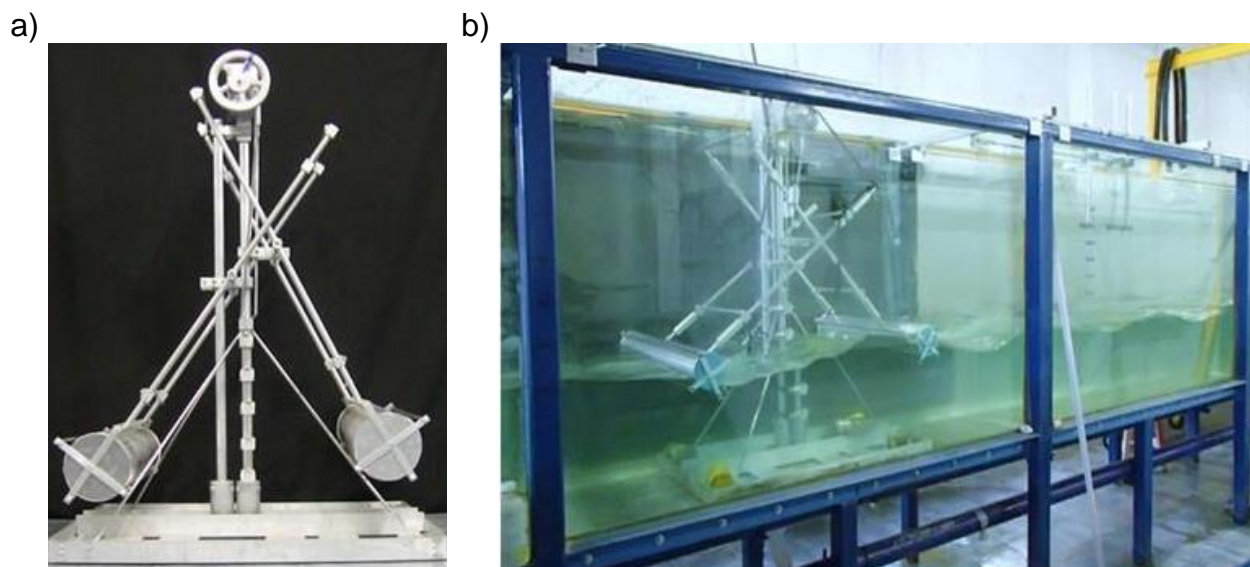


Figura 3. Dispositivo MICO-2T: a) escala 1:20, b) pruebas en el canal de oleaje del IIUNAM. Fuente: [41].

1.4 Estado actual del dispositivo y perspectivas

La boya que se estudia en este trabajo es para un CEO que ha tomado como base los dispositivos previamente mencionados. Este prototipo presenta cambios significativos. Por ejemplo, cambios en el mecanismo de tracción, sugiriendo un sistema retráctil de restauración de la cuerda para evitar fallos, como los que surgieron en las pruebas de campo de los dispositivos mencionados; mejoras en la forma de sujeción de la boya con el brazo y un grado extra de libertad para que la boya se oriente paralela al frente de onda.

A pesar de las pruebas realizadas, aún quedan incógnitas por resolver para mejorar su eficiencia y del por qué se dieron resultados tan diferentes en las pruebas de laboratorio y las de campo. Entre las cuestiones para maximizar la eficiencia del dispositivo (además de las dimensiones de la boya) se encuentra el largo de los brazos, la distancia del eje de rotación del brazo de la boya con respecto al nivel medio del mar, la distancia vertical del eje de rotación del brazo de la boya al eje del volante de inercia, las dimensiones del volante de inercia, entre otras.

Para validar este estudio es necesario rediseñar el dispositivo CEO con las adecuaciones mencionadas y realizar las respectivas pruebas de campo. Estudios previos han realizado la caracterización de ocho zonas de la costa yucateca. Con alturas de ola significativa (H_s) que van desde los 0.5 a 1 m de altura y periodos pico (T_p) de 3 a 5 segundos con predominancia noreste, encontrando una disponibilidad de 0.5-2 kW/m de potencia con una ocurrencia del 30 % (**Figura 4**) [43]. Es necesario diseñar una tecnología CEO que pueda aprovechar mejor el recurso en estas condiciones de operación [44].

Para el análisis numérico de la boya, producto de la presente contribución, se ha seleccionado una altura de ola de 1 m y un periodo de 4 s, correspondiente al valor intermedio del registrado para Sisal, Yucatán; para un segundo caso y con fines comparativos, se conserva la altura de ola de 1 m, pero se emplea un periodo de 8 s. Aunque este último periodo no es el que más ocurre, podría generar una energía anual mayor y sirve de base para analizar las condiciones extremas de operación.

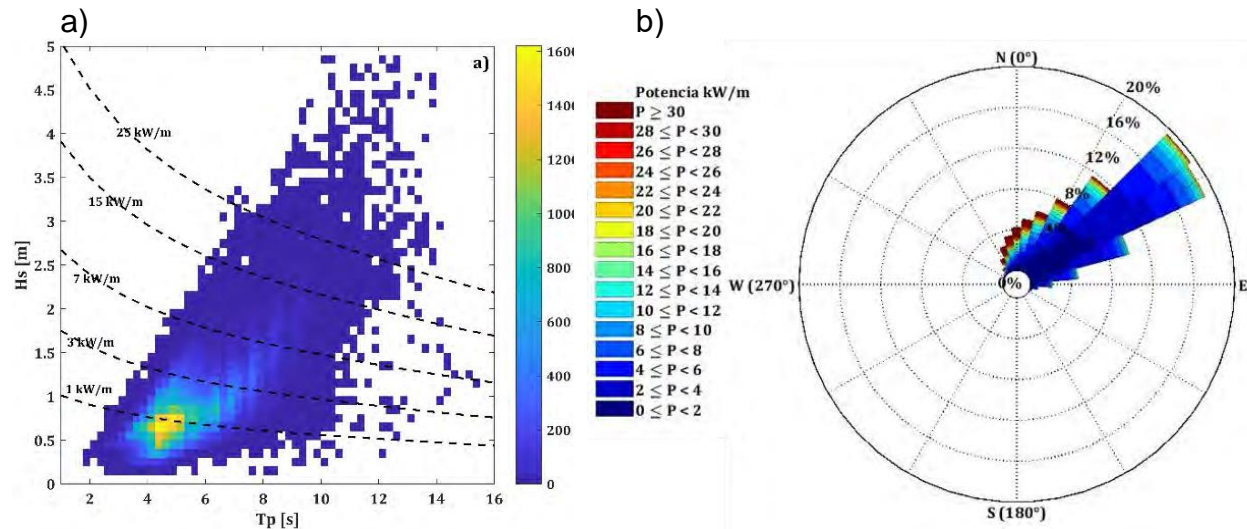


Figura 4. Características del oleaje en Sisal, Yucatán: a) Matriz de disponibilidad (H_s , T_p) con isolíneas de potencia, b) dirección predominante de potencia. Fuente: [43].

1.5 Objetivos

Empleando el programa libre de código abierto OpenFOAM, se pretende determinar el comportamiento y la absorción de potencia de una boya cilíndrica para un dispositivo Convertidor de Energía del Oleaje (CEO), en función del radio de la boya y sometida a las siguientes condiciones de operación en oleaje regular: altura de ola de un metro, con periodos de cuatro y ocho segundos.

1.5.1 Objetivos específicos

Entre los objetivos específicos destacan: realizar pruebas de sensibilidad de los parámetros de la simulación, determinar la potencia absorbida como función del radio de la boya, determinar los efectos potenciales del CEO sobre el transporte de sedimentos y la protección costera, e identificar aspectos a mejorar para prototipos posteriores.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Energía del Oleaje

Algunos de los procesos que se dan a diferentes escalas de tiempo y espacio en el océano son las ondas capilares, las olas gravitatorias superficiales, el flujo medio oceánico, las mareas, las circulación estuarina y de plataforma continental, entre otros [45]. La energía asociada a cada uno de esos procesos tiene su origen de una fuerza perturbadora como la atracción del Sol y la Luna, los terremotos, las tormentas o la acción del viento; de igual forma, se requiere una fuerza restauradora, como lo es la fuerza de Coriolis, la gravedad o la tensión superficial del agua [46] (**Figura 5**). Debido a su naturaleza, las olas producidas por el viento son las más energéticas, de ahí que sea una de las fuentes de energía marina de mayor interés.

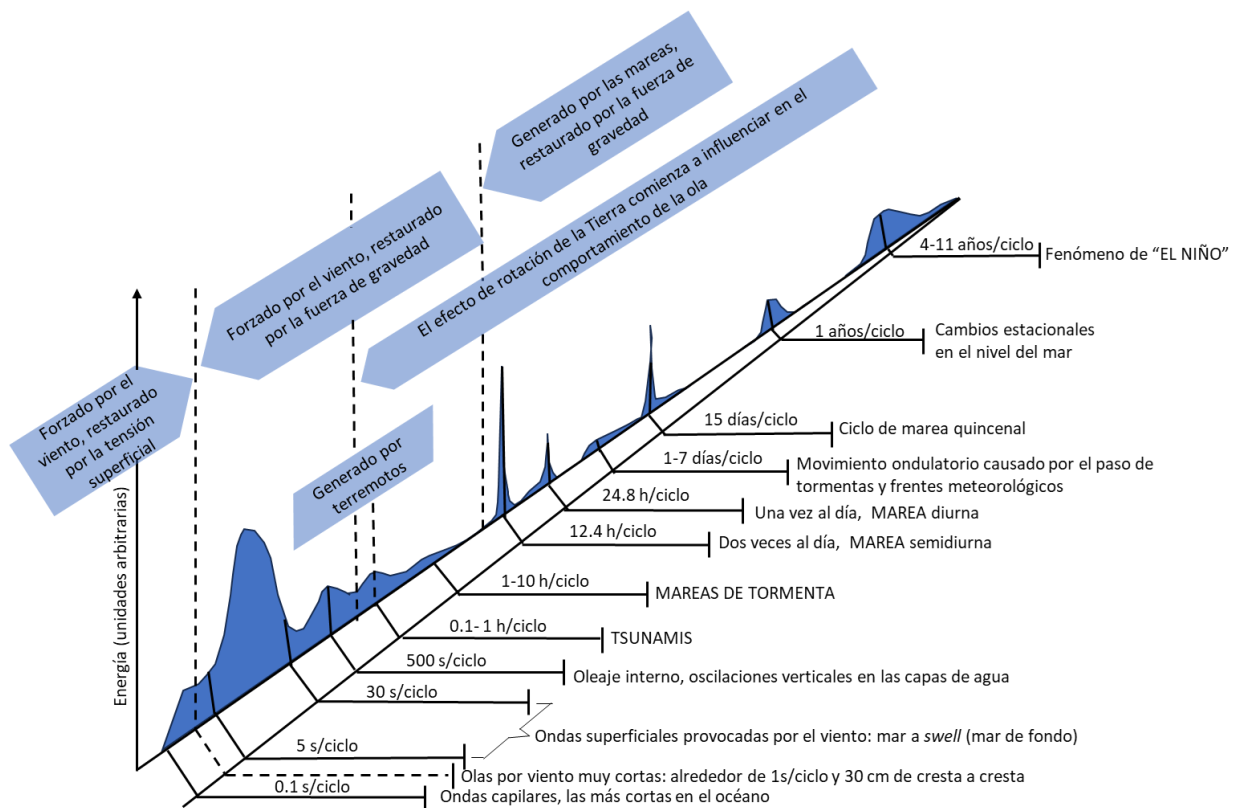


Figura 5. Diagrama de periodos de la distribución de energía del oleaje en el océano. Elaboración propia basado en: [46].

La energía proveniente del Sol provoca diferencias de temperatura, incitando las corrientes de aire (viento) que interactúan con la superficie oceánica. Estas corrientes de aire son las responsables de la generación del oleaje. Este oleaje superficial se produce al momento de que el aire y el agua interactúan. El aire transfiere parte de su energía, perturbando la estabilidad de la superficie del agua, donde la gravedad restablece esta perturbación; la interacción de presiones del viento en una ola y la gravedad provocan que la ola se propague. Esta energía transferida es acumulada como energía potencial, cuando la masa de agua se desplaza sobre el nivel del mar, y como energía cinética debida al movimiento oscilatorio de las partículas [47]. En 2008, la distribución global de la potencia media anual del oleaje fue cuantificada por Cornett, empleando los datos de WaveWatch-III [48] (ver Anexo A), mientras que en 2012 una versión más reciente fue realizada por Gunn y Stock-Williams (**Figura 6**), estimando que la potencia media total del oleaje en el mundo es superior a los 2 TW o su equivalente 12,532 TWh/año [22].

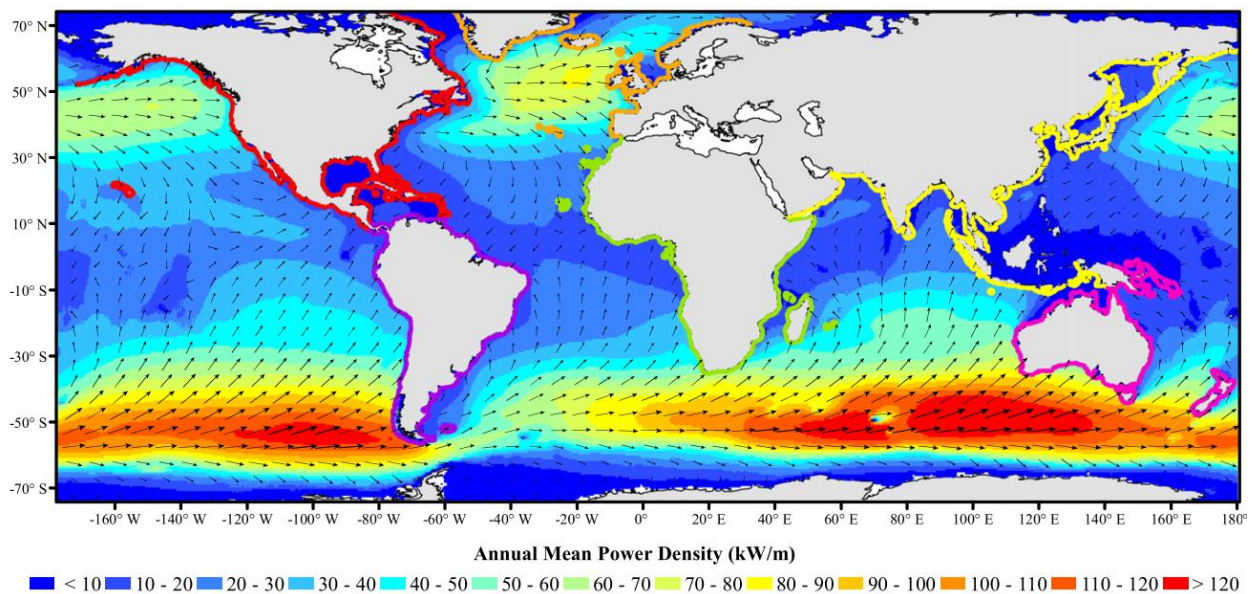


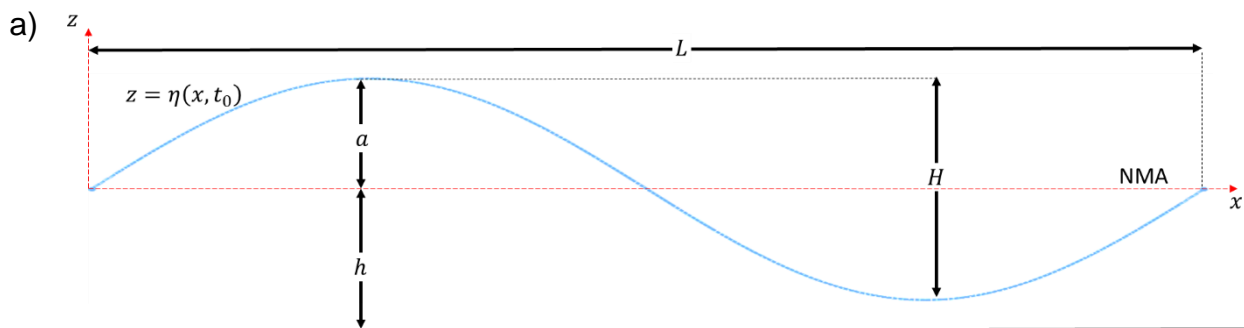
Figura 6. Caracterización de la distribución global de la potencia media anual del oleaje realizada por Gunn y Stock-Williams [22]. Los colores de los contornos permiten distinguir los diferentes continentes.

2.1.1 Teoría lineal

A lo largo de los años, diferentes teorías de oleaje han surgido para poder describir matemáticamente las complejas transformaciones del oleaje y la interacción con diferentes cuerpos de agua. Entre las teorías más conocidas se encuentran la teoría lineal de Airy (1845) [49], las teorías de Stokes (1847) [50], que incluyen aproximaciones de segundo orden y de orden superior, la teoría no lineal de ondas largas de Boussinesq y la teoría de Korteweg-de Vries para oleaje en aguas poco profundas [46]. Una buena aproximación para usos en ingeniería es la teoría lineal, la cual describe a las olas oceánicas como una simple onda sinusoidal. La superficie libre η para una onda sinusoidal progresiva, en función del tiempo t y de la distancia horizontal x , tiene la siguiente ecuación:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{L} - \frac{2\pi t}{T}\right) \quad (1)$$

Donde η es la elevación de la superficie del agua relativa al nivel medio del agua (NMA, en m); H es la altura de la ola (m); L la longitud de la ola (m); T el periodo de la ola (s) y h es la profundidad del agua (distancia desde el fondo del mar hasta el NMA, en m). Más adelante serán usados también g , la constante gravitacional (9.81 m/s^2) y h , la profundidad del agua (distancia desde el fondo del mar hasta el NMA, en m). Dado que la propagación de la ola es función del espacio y tiempo, para un determinado instante de tiempo ($t = t_0$) se tiene una distribución espacial y para una distancia de propagación determinada ($x = x_0$) se tiene una distribución temporal (**Figura 7**).



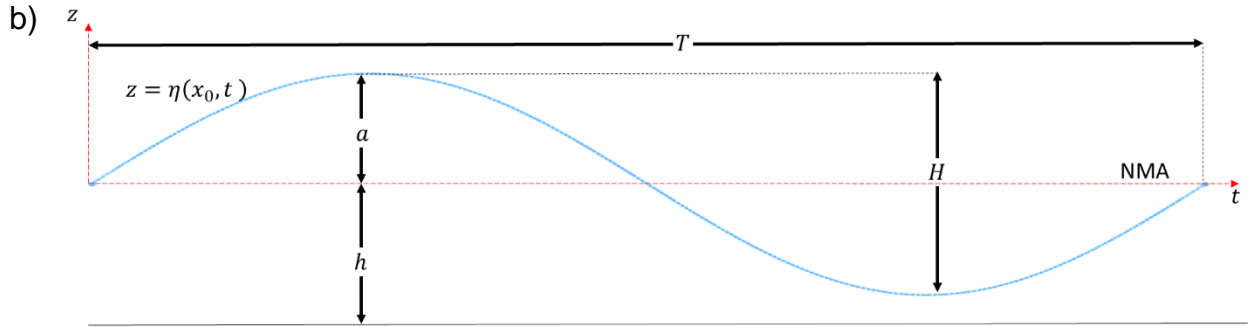


Figura 7. Características de una onda monocromática $\eta(x, t)$ propagándose en dirección x , en el tiempo t . a) distribución espacial con $t = t_0$, b) distribución temporal con $x = x_0$.

Para que la teoría lineal sea aplicable se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: el desplazamiento debe ser bidimensional, el fondo marino debe ser fijo e impermeable y corresponder al límite horizontal, deben tenerse valores pequeños tanto de la amplitud con respecto a la profundidad ($h/H \gg 1$) como de la relación entre H y L de la onda ($H/L < 1$); finalmente, que la forma de la onda sea invariable espacial y temporalmente.

Para describir el campo de velocidades de fluido se requiere de un potencial escalar de velocidades (Φ). En un flujo irrotacional, este potencial cumple con la ecuación de Laplace ($\nabla^2 \Phi = 0$). Para la obtención del potencial deben satisfacerse las condiciones de frontera dinámica y mixta para la superficie libre, la cinemática para el fondo horizontal y las condiciones de contorno laterales. Manipulando matemáticamente se llega al potencial:

$$\Phi(x, z, t) = \frac{H g}{2 \omega} \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2)$$

donde, ω es la frecuencia angular ($2\pi/T$) y k es el número de onda ($2\pi/L$).

De acuerdo con la teoría lineal, donde se asume $a/L \ll 1$, la relación de dispersión de una ola regular está dada por:

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (3)$$

Asociando el número de onda y la frecuencia angular con la relación de dispersión se obtiene la expresión para la longitud de onda:

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(2\pi h/L) \quad (4)$$

Para la velocidad de propagación se tiene:

$$C = \frac{\omega}{k} = \frac{L}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh(2\pi h/L) \quad (5)$$

La densidad de energía o energía específica E_d para una ola es la energía total promedio por unidad de superficie (J/m^2), dada por:

$$E_d = \frac{E}{L} = \frac{\rho_w g H^2}{8} \quad (6)$$

Si la densidad de energía es dividida entre el periodo de la ola, se tiene la densidad de potencia de la ola (W/m^2):

$$P_d = \frac{E_d}{T} = \frac{\rho_w g H^2}{8T} \quad (7)$$

Para la potencia por metro de frente de onda se tiene: $P_{wf} = C_g E_d$. La celeridad de la ola está dada por $C = L/T$ y la celeridad de grupo o velocidad del frente de onda se calcula de la forma $C_g = d\omega/dk$. Estas ondas superficiales pueden clasificarse con la profundidad relativa, el cociente entre la profundidad del agua y la longitud de la ola en: aguas profundas ($h/L > 0.25$), aguas intermedias ($0.25 \geq h/L > 0.05$) y aguas someras ($0.05 \geq h/L$). Según sea el caso de la relación entre la profundidad y la longitud de onda, se puede obtener la velocidad de grupo y la relación de dispersión como se muestra en la Error! Not a valid bookmark self-reference.

Tabla 1. Relación de dispersión según la clasificación de las aguas superficiales.

	Condición	Velocidad de grupo	Relación de dispersión
Aguas someras	$kh \leq \frac{\pi}{10}$ $L \geq 20h$	$C_g = \frac{\omega}{k} = \sqrt{gh}$	$\omega^2 = gk^2h$
Aguas intermedias	$\frac{\pi}{10} < kh < \pi$	$C_g = \frac{\omega}{2k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right)$	$\omega^2 = gk \tanh(kh)$
Aguas profundas	$kh \geq \pi$ $h \geq \frac{L}{2}$	$C_g = \frac{\omega}{2k} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{g}{k}}$	$\omega^2 = gk$

2.2 Tecnologías de energía del océano

El intento del ser humano por aprovechar la energía proveniente del océano no es reciente: la primera patente registrada data de 1799, en donde los parisinos Girard articularon una viga y en un extremo en el mar se tenía acoplada una boya, mientras que el otro extremo de la viga activaba algún dispositivo [51]. En la actualidad se tienen más de mil patentes registradas de dispositivos que aprovechan algún tipo de energía proveniente del océano [17]. Entre las tecnologías de energía del océano se encuentran los dispositivos basados en vibraciones de flujo inducido, los convertidores de oleaje bioinspirados, obtención de energía por medio del gradiente salino (SGE, por sus siglas en inglés: Salinity Gradient Energy), la conversión de energía térmica oceánica (OTEC, por sus siglas en inglés: Ocean Thermal Energy Conversion), los dispositivos basados en la energía de las mareas y los llamados convertidores de energía del oleaje conocidos como CEO (WEC, por sus siglas en inglés: Wave Energy Converter) [52].

2.2.1 Convertidores de Energía del Oleaje (CEO)

Un Convertidor de Energía del Oleaje, conocido como CEO, es un dispositivo capaz de coleccionar la energía cinética o potencial del oleaje y transformarla en otro tipo de energía. Los convertidores de energía del oleaje pueden ser clasificados principalmente de dos maneras, por su ubicación en la costa y por su principio de operación. Por su ubicación con respecto a la costa, los CEOs pueden estar en la costa (*onshore*), cercanos a la costa (*nearshore*, entre los 20 y 40 m) y mar adentro (*offshore* > 50 m). En la clasificación según el principio de operación se encuentran las columnas oscilantes de agua (OWC, por sus siglas en inglés: Oscillating Water Column), los absorbedores puntuales y los dispositivos de desbordamiento. Cada uno de ellos puede estar sujeto o no al fondo del mar; la **Figura 8** muestra los detalles de esta clasificación [52, 53]. Entre los dispositivos CEOs más conocidos se encuentran los absorbedores puntuales, las columnas de agua oscilantes, los atenuadores (p. ej., Pelamis) y los terminadores (p. ej., Wave Dragon). Sin embargo, en la práctica, varios de estos dispositivos se encuentran en la fase de desarrollo o en investigación y sólo unos pocos se han utilizado comercialmente para generar energía a partir de las olas.

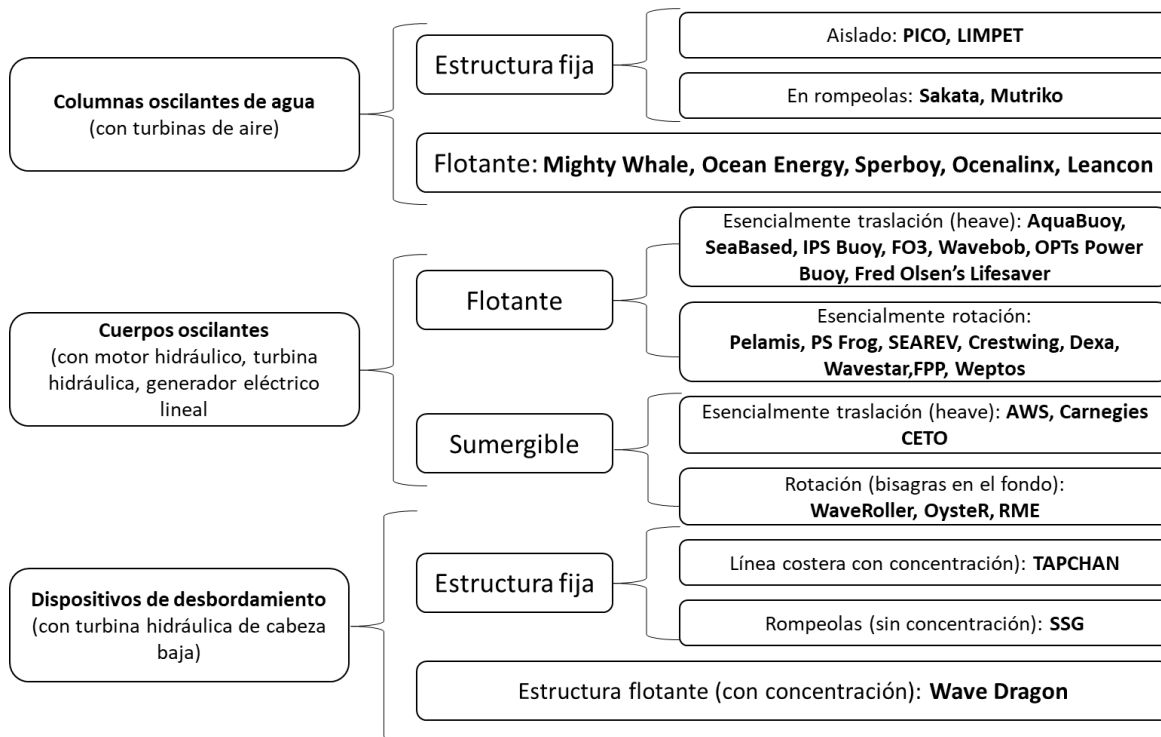


Figura 8. Clasificación de los dispositivos de captura de energía del oleaje. Fuente: [52, 53].

La **Figura 9**, muestra algunos ejemplos de estos dispositivos: a) proyecto demostrativo Carnegie CETO 6 ubicado frente a las costas de Albany en Australia, basado en un boya completamente sumergida acoplada a un mecanismo PTO (*Power Take Off*) para generar 1.5MW [54]; b) proyecto Oyster 800 (2012-2015), con una capacidad instalada de 800 kW, fue desarrollado por Aquamarine Power e instalado por el EMEC (European Marine Energy Centre) en Orkney, Escocia, consistiendo en una placa con una bisagra anclada al fondo marino y permitiendo el movimiento de una lado a otro accionando un mecanismo hidráulico [55]; c) proyecto OceanLinx colocado frente a la península de Fleurieu, en el sur de Australia, y finalizado en junio de 2014, basado en tecnología OWC para generar 1MW y trabajar en aguas poco profundas [56]; y d) El primer proyecto en comercializarse del mundo en 2008, desarrollado por la empresa Pelamis Wave Power (actualmente Ocean Power Delivery), basado en energía del oleaje, instalado en las costas de Agucadoura, en Portugal, donde la granja contaba con tres dispositivos Pelamis con capacidad instalada total de 2.25 MW [29].

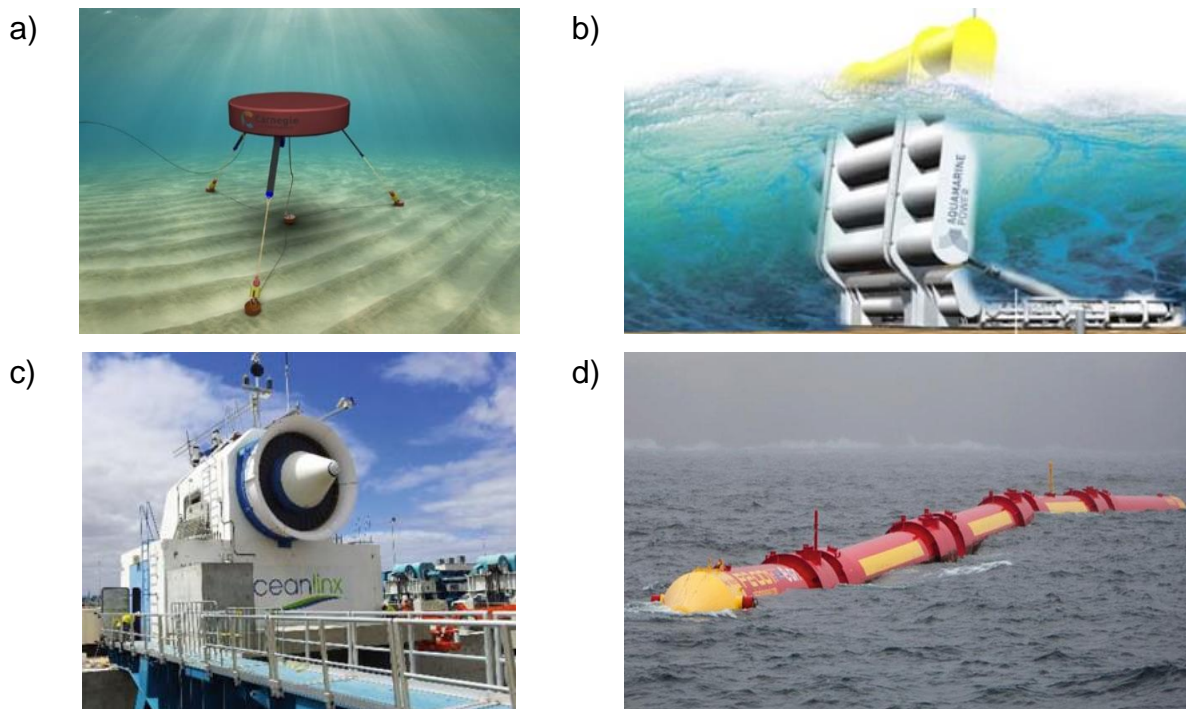


Figura 9. Convertidores de energía del oleaje: a) CETO 6, absorbedor puntual, 2015 [54]; b) Oyster, cuerpo oscilante o péndulo invertido, 2012 [55]; c) OceanLinx, columna oscilante de agua, 2014 [56] y d) Pelamis, atenuador, 2008 [29]. Imágenes tomadas de: [53].

2.3 Fuerzas que intervienen en un CEO

Los objetos flotantes en el agua, como los CEOs, experimentan varias fuerzas y generan algún tipo de movimiento. Para que un dispositivo convertidor del oleaje capte o absorba energía, requiere al menos un grado de libertad para activar algún mecanismo de conversión de energía. Por ejemplo, en un absorbedor puntual, cuando una ola interactúa con la boya, el movimiento de ascenso es debido a la flotabilidad y el de descenso a la gravedad. Las fuerzas que surgen de la excitación, la radiación y la gravedad son algunos ejemplos habituales de cargas externas que experimenta un CEO [53]. Las fuerzas de excitación y radiación son las principales cargas externas que estos dispositivos experimentan.

En el caso más simple, la ecuación de gobierno para un cuerpo flotante (con un solo grado de libertad) en movimiento vertical se puede expresar como [57]:

$$M_b \ddot{z} = f_{hd} + f_R \quad (8)$$

donde M_b es la masa de la boya, \ddot{z} es la aceleración vertical de la boya, f_{hd} es la fuerza hidrodinámica debida a la ola incidente y f_R es la fuerza resistiva inducida por el sistema. La fuerza hidrodinámica se puede tratar en detalle como:

$$f_{hd} = f_e + f_r + f_h \quad (9)$$

donde f_e es la fuerza de excitación de las olas, f_r es la fuerza de amortiguamiento de la radiación y f_h es la fuerza de flotabilidad hidrostática. Se desprecian los efectos de las fuerzas viscosas y de fricción. La excitación es una fuerza de presión debida a las ondas incidentes. Para este estudio, la fuerza de excitación de la ola (fuerza de la ola incidente) está de acuerdo con el enfoque hidrodinámico lineal de la fuerza de Froude-Krylov, con ayuda del teorema de Gauss [46]:

$$\mathbf{F}_{FK} = \iiint_V \nabla p dV = - \iint_S p \hat{n} dS \quad (10)$$

donde V es el volumen del cuerpo sumergido y \hat{n} es el vector unitario normal a la superficie. Para cuerpos pequeños:

$$F_x = \rho g k \frac{H \cosh(k(h + \bar{z}))}{2 \cosh(kh)} \sin(k\bar{x} - \omega t) \forall_0 \quad (11)$$

$$F_y = -\rho g k \frac{H \sinh(k(h + \bar{z}))}{2 \cosh(kh)} \cos(k\bar{x} - \omega t) \forall_0 \quad (12)$$

(\bar{x}, \bar{z}) denota la coordenada del centroide del cuerpo. La magnitud de la fuerza para un cuerpo cerca de la superficie es:

$$|\mathbf{F}| = \rho g k \forall_0 \frac{H}{2} = g \rho_b V_b k \frac{H}{2} \quad (13)$$

La fuerza de radiación hidrodinámica surge del movimiento del cuerpo flotante. En la condición de superficie libre linealizada, esta carga es debida al modo del movimiento armónico η_j y se puede expresar como [58]:

$$F_r = -A_{kj} \frac{d^2 \eta_j}{dt^2} - B_{kj} \frac{d\eta_j}{dt} \quad (14)$$

donde, en dos dimensiones, A_{kj} es el coeficiente de masa añadido y B_{kj} son los coeficientes de amortiguamiento. La fuerza vertical lineal por unidad de longitud en el cilindro se determina de la siguiente manera [58].

$$F_{r_3} = -\frac{1}{2} \rho \pi R^2 \frac{d^2 \eta_3}{dt^2} \quad (15)$$

y el coeficiente de amortiguamiento en oleaje (considerando una frecuencia muy alta para simplificar el problema) se hizo la suposición de que es muy pequeño y cercano a cero. La fuerza hidrostática es la fuerza restauradora relacionada con los efectos de la gravedad y la flotabilidad según el principio de Arquímedes, y viene dada por:

$$F_h = S_3 \eta_3 \quad (16)$$

donde S es el coeficiente de rigidez hidrostática en el oleaje y A_{wp} es el área del plano de agua.

$$S = \rho g A_{wp} \quad (17)$$

Finalmente, la máxima fuerza ocurre cuando:

$$\eta_{max} = H_0/2 \quad (18)$$

2.4 Componentes del dispositivo CEO

El dispositivo CEO se compone de la boya cilíndrica unida a unos brazos que pasan por un eje de rotación, mientras que en cada lado del otro extremo de los brazos se sujeta una cuerda, que su vez se enrolla a una polea conectada a un generador eléctrico. Los componentes principales del CEO son: ① Polea y volante de inercia, ② Boya, ③ Brazo de la boya, ④ Cuerda, ⑤ Soporte, ⑥ Soporte secundario, ⑦ Chumacera, ⑧ Base y ⑨ Generador eléctrico. Los componentes se muestran en la **Figura 10**.

El dispositivo cuenta con dos grados de libertad: un eje de rotación horizontal para ajustarse a la dirección de la onda incidente y un eje de rotación vertical para accionar el movimiento de ascenso y descenso de la boya provocado por el paso de la superficie libre del agua, de la tal manera que, al accionar el movimiento, el brazo tira de la cuerda, haciendo girar la polea conectada al generador eléctrico. Este generador está adaptado de tal manera que el movimiento de giro se dé en una sola dirección. La energía cinética de rotación de la boya E_r es la energía que se ha captado de la ola. Esta energía cinética rotacional se define como:

$$E_r = \frac{1}{2} I_b \omega_r^2 \quad (19)$$

donde I_b es el momento de inercia de la boya, ω_r es la velocidad angular de la boya.

Por otro lado, para las pruebas de eficiencia, el soporte del eje de rotación de la boya tiene un sistema móvil para modificar su distancia con respecto al NMA. Adicionalmente este sistema de tracción cuenta con un mecanismo retráctil de la cuerda para que no sea necesario un peso de restitución, como en los sistemas en los que se basa (**Figura 1**).

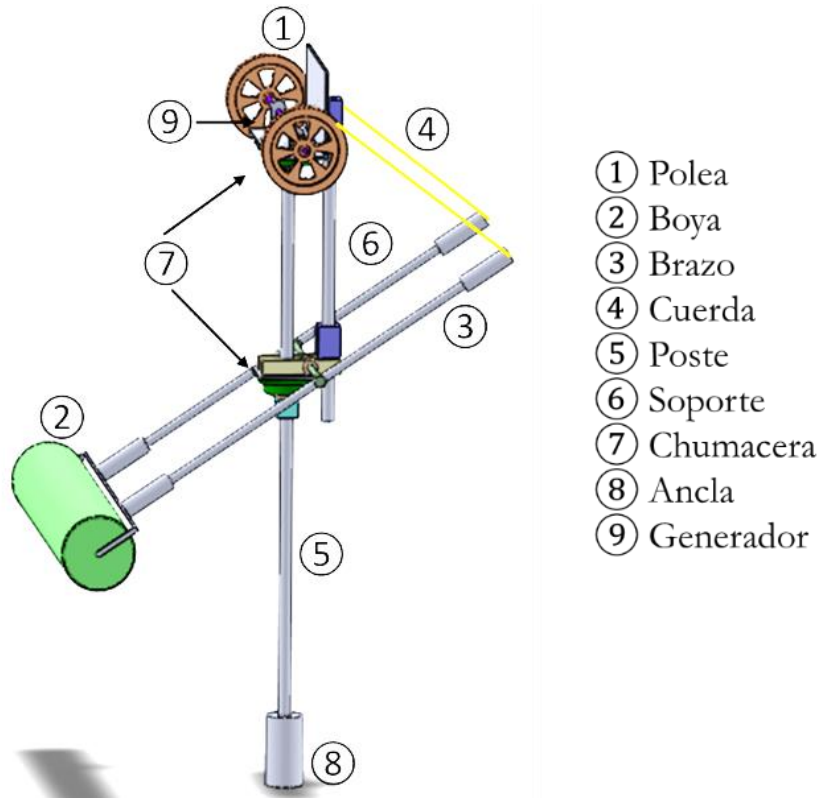


Figura 10. Dispositivo CEO donde se pretende implementar la boya.

2.4.1 Volante de inercia del CEO

Para evitar fluctuaciones excesivas del torque de salida, el eje de tracción del dispositivo está provisto de un volante de inercia que garantiza que la salida de potencia intermitente se suavice, es decir que intente mantener una rotación constante. La velocidad suavizada en el eje mueve el generador eléctrico. El volante es un dispositivo capaz de absorber y entregar energía rotacional. La energía cinética se almacena para minimizar la variación de la velocidad angular durante el ciclo del dispositivo. El aumento de la velocidad angular está asociado con la energía absorbida, mientras que la disminución de la velocidad angular está relacionada con la entrega de energía. De acuerdo con el principio de D'Alembert, el movimiento del volante se puede calcular como la suma de todos los momentos M_i que intervienen, en función de los desplazamientos angulares (θ_i, θ_o), la velocidad angular ($\dot{\theta}$), el momento de inercia I y los pares de torsión de entrada o de accionamiento τ_i y de la carga τ_o (**Figura 11**), como muestra la ecuación (20).

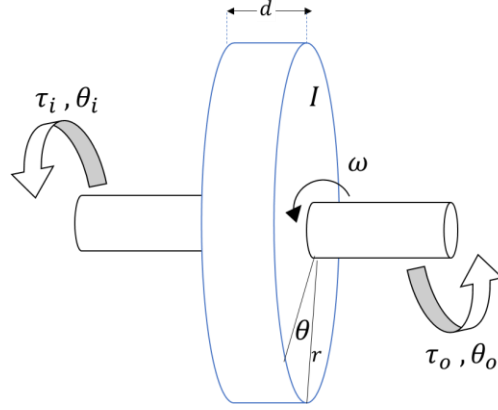


Figura 11. Representación del volante de inercia para el dispositivo CEO estudiado.

$$\sum_i M_i = \tau_i(\theta_i, \dot{\theta}_i) - \tau_o(\theta_o, \dot{\theta}_o) - I\ddot{\theta} = 0 \quad (20)$$

La ecuación (20) se puede reescribir como:

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} = \tau_i(\theta_i, \omega_i) - \tau_o(\theta_o, \omega_o) \quad (21)$$

Dado que se emplea un eje rígido que conecta al volante de inercia y al generador $\theta_i = \theta_o = \theta$ y $\omega_i = \omega_o = \omega$:

$$I\alpha = \tau_i(\theta, \omega) - \tau_o(\theta, \omega) \quad (22)$$

Para la velocidad angular se tiene:

$$\dot{\theta} = \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (23)$$

y la aceleración angular:

$$\ddot{\theta} = \alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (24)$$

La **Figura 12** muestra una situación hipotética idealizada para un ciclo de trabajo: el área del rectángulo delimitado por θ_1 y θ_2 , es el ángulo de giro debida a un par de torsión τ_i (entrada de energía: positivo) y representa la energía absorbida de entrada U_i y debida a la aceleración la velocidad angular cambia de ω_1 a ω_2 ; en la rotación de θ_2 a θ_3 no se presenta momento de torsión, por lo tanto, la velocidad angular es constante

($\omega_3 = \omega_2$); de θ_3 a θ_4 se satisface la carga con el momento de torsión de salida τ_o (salida de energía negativa U_o), disminuyendo la velocidad angular de ω_3 a ω_4 .

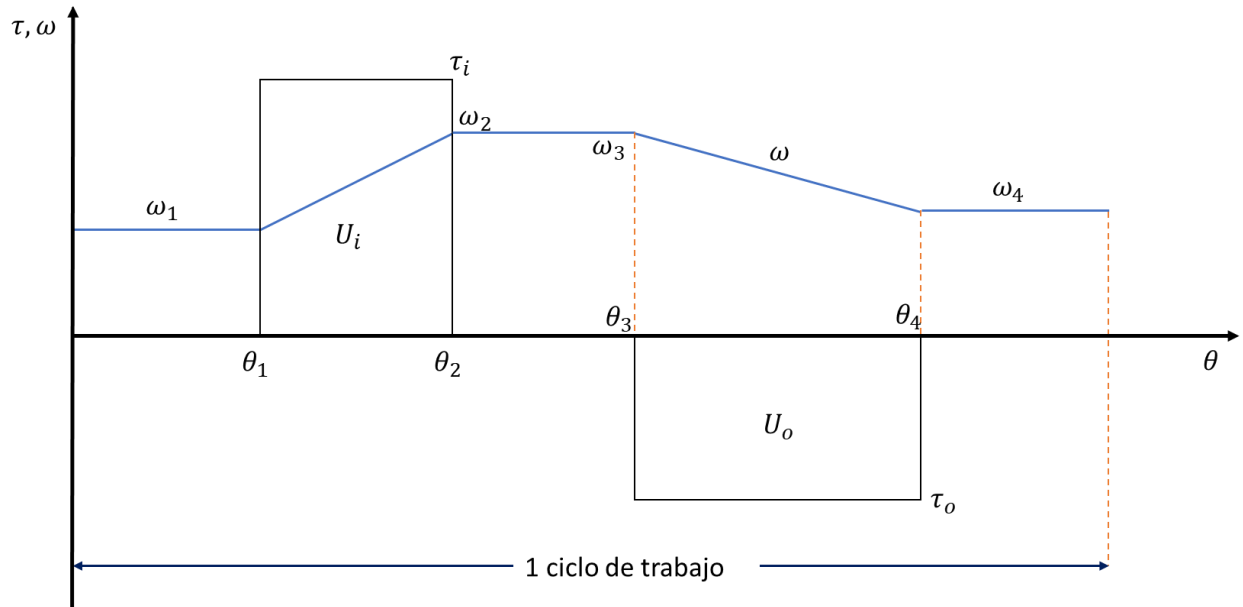


Figura 12. Torque y velocidad angular en el volante de inercia para un ciclo de trabajo. Considerando el coeficiente de fluctuación de velocidad

$$C_s = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega} \quad (25)$$

Aquí la velocidad angular nominal media está dada por:

$$\omega = \frac{1}{2}(\omega_2 + \omega_1) \quad (26)$$

Por otro lado, el cambio de la energía cinética está determinado por:

$$U_2 - U_1 = \frac{I}{2}(\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (27)$$

Factorizando la ecuación (27) e incluyendo el coeficiente de fluctuación C_s y la velocidad angular nominal ω se tiene:

$$U_2 - U_1 = \frac{I}{2}(\omega_2 + \omega_1)(\omega_2 - \omega_1) = C_s I \omega^2 \quad (28)$$

Finalmente, para el momento de inercia del volante se tiene:

$$I = \frac{U_2 - U_1}{C_s \omega^2} = \frac{\Delta U}{C_s \omega^2} \quad (29)$$

El momento de inercia de un disco rígido $I = \frac{1}{2} mR^2$, con relación a su radio R y su masa $m = \frac{\pi r^2 d}{4} \rho$ y $U = \int_{\theta_i}^{\theta_f} \tau(\theta) d\theta$ es el trabajo realizado por la rotación. Mientras que el par de torsión del diseño del generador debe ser equivalente al par de torsión promedio, de tal manera que:

$$\int_{\theta_{\omega_{min}}}^{\theta_{\omega_{max}}} (\tau_g - \tau_{prom}) d\theta = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} I \omega d\omega = \frac{I}{2} (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (30)$$

Con las especificaciones del generador, los parámetros del volante de inercia, los pares de torsión y las velocidades angulares asociados, es posible diseñar el volante de inercia apropiado.

2.5 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

La dinámica computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés: Computational Fluid Dynamics), consiste en la simulación de flujos de fluidos empleando métodos numéricos para resolver las ecuaciones diferenciales parciales de conservación de la masa, del momento y de la energía [59]. Debido a que no se tiene una solución analítica de las ecuaciones que rigen el comportamiento del flujo de los fluidos, se utiliza algún método de discretización espacial del dominio por medio de una malla, los cuales consisten en dividir el dominio en pequeños volúmenes de control para que posteriormente se aplique algún método numérico para resolver las ecuaciones de conservación en cada volumen de control. El diagrama del proceso para la simulación CFD se ilustra en la **Figura 13**.

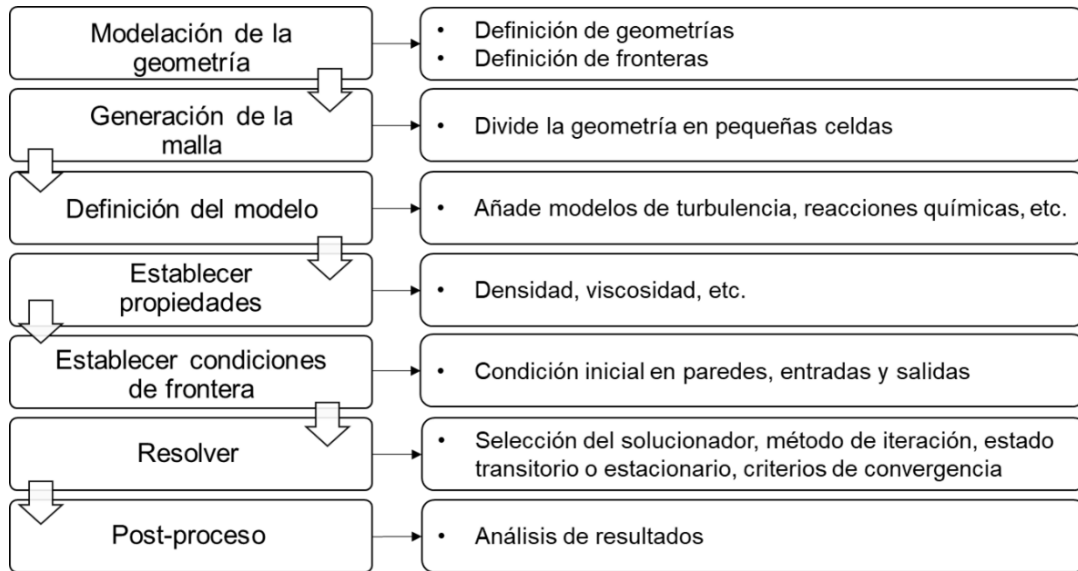


Figura 13. Diagrama del proceso para la simulación CFD. Fuente: [60].

Como se mencionó anteriormente, la herramienta CFD permite resolver las ecuaciones de continuidad, momento y energía. Estas ecuaciones son difíciles de resolver numéricamente y sólo algunos casos particulares tienen solución analítica. La siguiente ecuación general de balance en notación tensorial es para un escalar, vector o tensor ϕ :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \sum_i U_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \sum_i D \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_i^2} + S(\phi) \quad (31)$$

$$\left\{ \begin{array}{c} \text{tasa de acumulación} \\ \text{(tiempo)} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{transporte por} \\ \text{convección} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{c} \text{transporte por} \\ \text{difusión} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{c} \text{término} \\ \text{fuente} \end{array} \right\}$$

La transferencia de masa, calor y cantidad de movimiento ocurren por convección del flujo y por el movimiento aleatorio de las moléculas, o en el flujo turbulento por el movimiento aleatorio de los elementos del fluido, mientras que el transporte de momento viscoso es debido al movimiento aleatorio de las moléculas llevando su momento promedio en todas direcciones [60].

2.6 Software de simulación OpenFOAM

Uno de los componentes más importantes que determinan la eficiencia de recolección de energía de un dispositivo absorbedor puntual es el diseño de una boya

[61]. La boya captura la energía de las olas del océano y transfiere esta energía (por medio de un mecanismo de tracción) a un generador para convertirla en energía eléctrica. El movimiento de la boya es inducido por las olas de la superficie libre, donde la máxima absorción de energía se alcanza cuando el absorbedor puntual está en resonancia con las olas [62]. Para encontrar la configuración óptima, se debe estudiar la forma y el tamaño de la boya, así como los grados de libertad de todo el sistema y el campo de flujo a su alrededor. En las etapas iniciales de desarrollo del CEO, los objetivos mencionados anteriormente pueden lograrse parcialmente con simulaciones numéricas. En este sentido, la dinámica de fluidos computacional juega un papel importante en el ahorro de tiempo y costos, debido a que es una excelente herramienta para la optimización y mejora del diseño, a partir de un análisis de eficiencia. OpenFOAM (por sus siglas en inglés: Open Field Operation and Manipulation) es un software gratuito de código abierto, desarrollado por OpenCFD Ltd desde el año 2014. Este modelo de manipulación y operación que emplea librerías C++ está diseñado para resolver una gran diversidad de problemas relacionados con la mecánica de fluidos [63]. Por lo tanto, es un software adecuado para analizar un diseño CEO: en los últimos años, OpenFOAM se ha utilizado ampliamente para configurar canales o tanques numéricos de oleaje (NWT por sus siglas en inglés: Numerical Wave Tank), empleados para la investigación y el desarrollo de CEOs, siendo comparado con otras herramientas similares de este tipo [64]. Esta herramienta puede ser usada para modelar la geometría de un dispositivo y su interacción con algún fluido, donde por lo general resulta con buen grado de precisión, aunque el tiempo de ejecución y la alta demanda de recursos computacionales puede ser una desventaja [65]. Por otro lado, durante la simulación de un CEO en un NWT, la calidad de la malla puede disminuir en el transcurso del tiempo de la simulación y pueden aparecer grandes distorsiones debido al diseño de la malla y al movimiento vertical del cuerpo más allá de los límites de estabilidad del modelo [66] o por la presencia de múltiples objetos flotantes [67]. Existen diferentes metodologías de movimiento para la malla dinámica a fin de evitar su distorsión, aunque algunos pueden conducir a inestabilidad numérica y, finalmente, a fallas en la simulación [64]. Algunos ejemplos son el método *overset grid* que fue lanzado en OpenFOAM desde la versión v1706 y ha sido ya validado [66], así como el método de *mesh morphing*. Estos dos métodos ya han sido

empleados en simulaciones para el análisis de dispositivos CEO [68], y aunque el método de cuadrícula desbordada (*overset grid*) puede soportar grandes desplazamientos de un objeto interactuando con algún fluido sin cambios topológicos en la malla, se determinó que presenta costos computacionales muy altos en comparación con el método de transformación de malla (*mesh morphing*) [69]. La implementación de un modelo CFD podría ser un proceso muy complejo; por lo tanto, se requiere experiencia para crear una simulación numérica correcta. Además, esto puede requerir un proceso de ajuste de malla exigente cuando el movimiento del dispositivo está sometido a la interacción con el fluido incluido en la simulación.

2.6.1 Modelo numérico

En este trabajo, el software de código abierto CFD OpenFOAM® (versión v1912) es empleado para realizar las simulaciones y evaluar la eficiencia del dispositivo. En el dominio del fluido se aplica la discretización del tiempo y espacio de la ecuación de Navier-Stokes, aplicando el método de volumen finito. Para un NWT, la geometría del dominio se crea con la utilidad *blockMesh*, que descompone el dominio en bloques hexaédricos. Para la discretización espacial, se emplea el método estándar de integración Gaussiana por volumen finito, que se basa en la suma de los valores de las caras de las celdas y se interpola desde los centros de las celdas [70]. Para la descripción de la dinámica de fluidos, la ecuación de momento en el volumen de fluido (VOF) se define tanto para la fase aire como para fase el agua. Suponiendo fluidos incompresibles y flujo laminar, la ecuación de Navier-Stokes para la conservación del momento está dada por [71]:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u}\mathbf{u}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{f}_b \quad (32)$$

donde, de acuerdo con las coordenadas cartesianas (x, y, z) , \mathbf{u} describe el campo vectorial de velocidad en el fluido, $\mathbf{T} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$ es el tensor de esfuerzos que involucra la viscosidad dinámica μ y una operación traspuesta (T), ρ la densidad del fluido, p es la presión y \mathbf{f}_b indica las fuerzas externas como la gravedad (\mathbf{g}). Considerando la

conservación de la masa, la ecuación de continuidad para fluidos incompresibles está descrita por:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (33)$$

Para delimitar la superficie libre en el solucionador de flujo multifase, el método VOF aplica el parámetro α , basado en la fracción de volumen de cada fase para diferenciar la interfaz de agua y aire, donde $\alpha = 1$ para agua y $\alpha = 0$ para el aire, mientras que la fracción de volumen de fase $0 < \alpha < 1$ representa la celda que contiene la interfaz agua-aire. De acuerdo con el método VOF, la ecuación escalar para la fracción de fase agua-aire se puede escribir como [72]:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u}\alpha) + \nabla \cdot [\mathbf{u}_c\alpha(1 - \alpha)] = 0 \quad (34)$$

donde \mathbf{u}_c es la velocidad de compresión, es decir la velocidad relativa entre la fase líquida y gaseosa.

En el solucionador *InterFoam*, tanto el fluido como el movimiento de un objeto flotante están integrados. En cada paso de tiempo, el algoritmo del solucionador de movimiento implícito calcula las fuerzas, actualiza la aceleración y luego mueve el objeto a su nueva posición. En el paso final, el solucionador modifica la malla para ajustar los nuevos cambios, en relación con el paso de tiempo anterior [73]. Después de que el movimiento es evaluado, el solucionador del fluido inicia con la corrección del campo de flujo por medio del método VOF utilizando el limitador universal multidimensional para solución explícita (MULES, por sus siglas en inglés: Multidimensional Universal Limiter For Explicit Solution), el cual, como su nombre lo indica, considera un factor delimitador del flujo en la solución temporal. El siguiente paso en el procedimiento es resolver la ecuación de momento y presión con la implementación del algoritmo PIMPLE (Pressure Implicit Method for Pressure-Linked Equation). Los algoritmos PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operators) y SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) se combinaron para lograr el algoritmo PIMPLE. Dentro de este algoritmo PIMPLE, se inicia el siguiente paso de tiempo hasta alcanzar el máximo número de iteraciones. Este procedimiento se repite hasta el final de la simulación [74].

2.6.2 Solucionador sixDoFRigidBodyMotion

El solucionador `sixDoFRigidBodyMotion` (6-DoF) es implementado para resolver problemas de movimiento de rotación y traslación de un cuerpo rígido e involucra las fuerzas que actúan sobre él. En el solucionador 6-DoF se establece la configuración de la morfología de la malla (*inner* y *outer distance*) y se definen los parámetros físicos del cuerpo rígido, el método de solución del movimiento del cuerpo, las restricciones de movimiento y las fuerzas externas que no provienen del fluido y que son aplicadas al objeto. Entre las propiedades del cuerpo se encuentra la cantidad de masa, su centro de masa, su momento de inercia y las condiciones iniciales de su velocidad; para los solucionadores se tienen los métodos de Newmark, CrankNicolson y symplectic; también se establecen los coeficientes de relajación de la aceleración y amortiguamiento del cuerpo. El cuerpo puede ser restringido en su movimiento a un eje, una línea, un plano un punto o a una orientación específica. Las fuerzas limitantes pueden actuar de manera constante, lineal, amortiguada, entre otras; finalmente son establecidas las condiciones de frontera. En aplicaciones navales, los modos que se presentan en un cuerpo rígido flotando en un fluido por la acción de una fuerza son los de traslación (*surge*, *sway* y *heave*) y de rotación (*roll*, *pitch* y *yaw*) como se aprecia en la **Figura 14** [75].

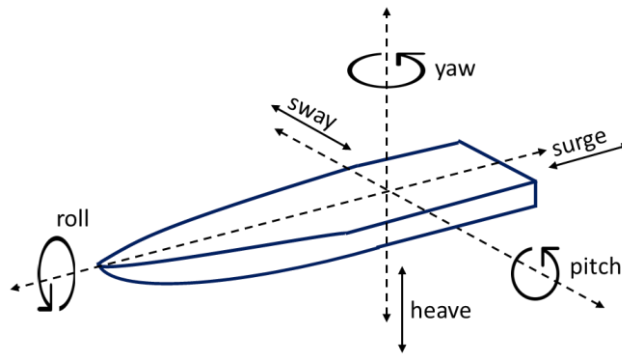


Figura 14. Representación de los grados de libertad de un cuerpo rígido: traslación (surge, sway y heave) y rotación (roll, pitch y yaw) [75].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

3.1 Configuración de la simulación

La configuración de la simulación se centró en la boya, que es el componente más importante del dispositivo CEO de tipo absorbedor puntual en estudio. Dentro del ambiente OpenFOAM se utilizó como solucionador de malla dinámica *InterFoam*, diseñado para fluidos inmiscibles isotérmicos en un volumen de fluido VOF acoplado a un solucionador de movimiento de cuerpo rígido de seis grados de libertad (6-DoF) (bibliotecas *sixDoFRigidBodyMotion* [76]). Como modelo de flujo fue seleccionado el flujo laminar para evitar turbulencia en la simulación, ya que la rotura de olas no es necesaria en las simulaciones. En el canal de oleaje numérico, el agua y el aire son los fluidos que intervienen en la simulación e interactúan con la boya. Las propiedades de los dos fluidos involucrados se presentan en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Propiedades por fase.

Propiedad	Unidades	Agua	Aire
Viscosidad cinemática	$m^2 \cdot s^{-1}$	1.0×10^{-6}	1.48×10^{-5}
Densidad	$kg \cdot m^{-3}$	1024.0	1.0
Tensión superficial entre las dos fases.	$N \cdot m^{-1}$	0.07	0.07

El NWT se diseñó con la utilidad *blockMesh*: el dominio numérico fue una geometría rectangular de 20 m en la dirección x , 5 m en la dirección y y 6 m en dirección z , con una resolución del volumen de control de $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1 m$. Aunque el número de elementos de malla se redujo en los extremos de la NWT para reducir el tiempo de cálculo, se implementó una malla más fina para el área de interés que rodea la boya y de esta manera lograr resultados más precisos. El centro del dominio contenía el punto pivote de la boya en las coordenadas (0, 0, 0). La propagación del oleaje se dio en la dirección del eje x positivo, la elevación de la superficie libre coincide con la dirección z y la longitud de la boya queda en dirección y . Para medir el cambio de elevación de la superficie libre del oleaje se colocaron puntos de prueba en dirección x de -10 a 10 m, con espacios de un metro entre medidores consecutivos y en posición $y = 0$ como condición inicial. El dominio NWT con una boya de prueba se esquematiza en la **Figura 15**.

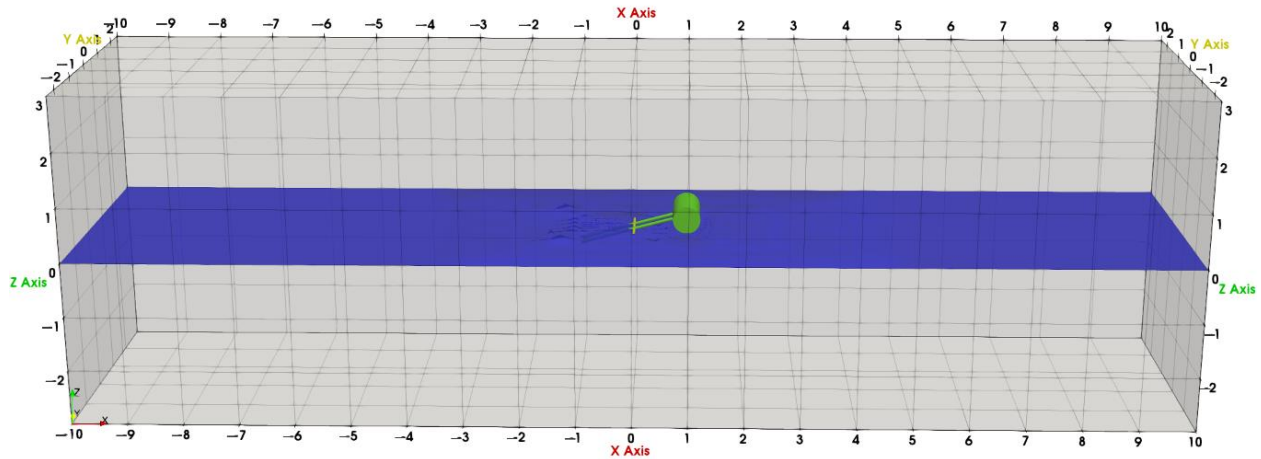


Figura 15. NWT para la simulación con una boya de 0.25 m de radio R . La propagación de la ola es en la dirección del eje x positivo, la elevación de la superficie libre coincide con la dirección z y la longitud de la boya está en la dirección y . Los medidores de ola se colocan de -10 a 10 m en la dirección x , con $y = 0$.

La boya cilíndrica (considerada como cuerpo rígido para el solucionador 6-DoF) tuvo un ancho $B = 1$ m con radio R que fue cambiado para las diferentes pruebas realizadas ($R = 0.1, 0.25, 0.5, 1.0$ y 1.5 m). La boya estaba conectada a dos brazos de diámetro constante (0.03 m) y longitud L_b que cambiaba dependiendo del radio de la boya (**Tabla 3**). De R_1 a R_4 , la relación R/L_b aumentó proporcionalmente a R , mientras que los brazos para R_4 y R_5 cumplieron la misma relación R/L_b . La densidad de la boya $\rho_b = 181.44$ kg \cdot m $^{-3}$.

Tabla 3. Valores probados para el radio de la boya R y su longitud de brazo (L_b).

Boya	R (m)	L_b (m)	R/L_b
R_1	0.10	1.5	0.067
R_2	0.25	2.0	0.125
R_3	0.50	3.0	0.167
R_4	1.00	4.0	0.250
R_5	1.50	6.0	0.250

La boya se consideró como un cuerpo flotante con dos restricciones: la primera fue un punto fijo anclado en la coordenada $(0, 0, 0)$ para evitar movimientos de traslación; en segundo lugar, se estableció un eje de rotación en el eje y para permitir sólo el movimiento en el plano XZ , es decir, la boya tenía un grado de libertad rotando verticalmente, perpendicular a la dirección de la ola incidente. No se consideraron otras

restricciones, por ejemplo, fuerzas externas, resorte lineal, amortiguamiento lineal, etc. La boya se construyó previamente en formato de estereolitografía (STL) en el software de código abierto SALOME [77], y se incorporó al dominio espacial utilizando la herramienta *snappyHexMesh* de OpenFOAM. En la **Figura 16** se presenta una vista detallada de la boya.

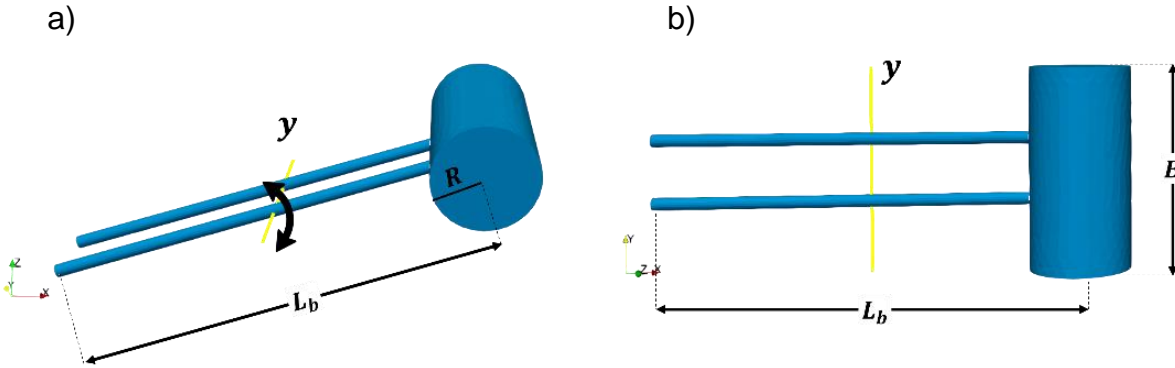


Figura 16. a) Boya con radio R ; B es el ancho característico (1 m) y L_b es la longitud del brazo, mientras que y es el eje de rotación, b) Vista superior de la boya.

Para la discretización espacial del dominio geométrico, la entrada, la salida, los lados y la parte superior del NWT se establecieron como el tipo *'patch'* (en OpenFOAM se emplea para establecer que no se tiene información geométrica ni topológica de la malla); mientras que el fondo marino y la boya se establecieron como tipo de *'wall'*, indicando que son geometrías que interactuaban como objetos sólidos. A través del dominio de entrada (en $x = -10\text{ m}$), la condición de frontera impuesta fue la teoría de Stokes de primer orden (una teoría lineal), donde la elevación de la superficie η ocurre en la coordenada z y la propagación de la onda se da en la dirección x . Se estableció que el oleaje de Stokes se propague a una profundidad constante ($h = 3.0\text{ m}$), para que no existieran cambios en el flujo de energía por efectos de propagación de las olas. En la entrada se configuró como *activeAbsorption* y en la salida se impuso el módulo *shallowWaterAbsorption*, ambos para absorber la superficie libre de las olas y evitar su reflexión. Otra forma de generar la superficie libre del oleaje en OpenFOAM es mediante las librerías de *waves2foam*, esta biblioteca incluye una técnica de la zona de relajación (*relaxation zone*) para evitar la reflexión de las ondas transmitidas [78]. En este estudio no se utilizó la herramienta de *waves2foam*, sólo se emplearon las bibliotecas incluidas en OpenFOAM v1912.

Entre las propiedades del oleaje se incluyó una sola amplitud $a = 0.5 \text{ m}$ ($H = 2a$) y periodos para olas cortas y largas ($T = 4 \text{ s}$ y $T = 8 \text{ s}$, con valores de inclinación de ola de $H/L = 0.0527$ y $H/L = 0.0238$, respectivamente). De esta forma, se evaluaron ondas con potencias teóricas diferentes. Durante las condiciones iniciales, en $t = 0$, el nivel medio de agua (NMA) coincidió con $z = 0$ y el lecho marino tenía una profundidad de agua constante de $h = 3.0 \text{ m}$ a lo largo del plano XY. Para la discretización del tiempo, se fijó el paso inicialmente en 0.01 s y para conservar la estabilidad numérica, se permitió un ajuste automático de este paso de tiempo basado en el número de Courant, en lugar de adoptar un paso de tiempo fijo.

Dentro del archivo *alpha.water*, en el campo inicial para las condiciones de contorno, se aplicó *zeroGradient* en la salida, los lados, la boya y el fondo, para evitar efectos de tensión superficial entre las paredes y la interfaz agua-aire. Mientras tanto, en la entrada y la parte superior, se definió como *waveAlpha* e *inletOutlet*, respectivamente, con un valor de 0 para indicar la entrada del tren de oleaje. En el archivo de velocidad (U), los límites de entrada y salida se configuraron como tipo *waveVelocity* para que se satisfaga la velocidad de la ola en la entrada y salida; y la boya se estableció como *movingWallVelocity* para que se mueva con velocidad como un objeto rígido, mientras que el límite superior se estableció como *pressureInletOutletVelocity* y el resto de los 'patches' se establecieron en *fixedValue* uniforme en (0,0,0). En el caso de la presión, todos los 'patches' se establecieron en *fixedFluxPressure* con un valor de 0, excepto en la parte superior, que se estableció como *totalPressure* (p_0), la cual es evaluada por el modelo en cada paso de tiempo. Finalmente, sólo la trayectoria de la boya se estableció como "calculada", mientras que los otros 'patches' se establecieron como valor fijo uniforme: *fixedValue uniform* (0,0,0) en el archivo *pointDisplacement*. Este proceso se resume en la **Figura 17**.

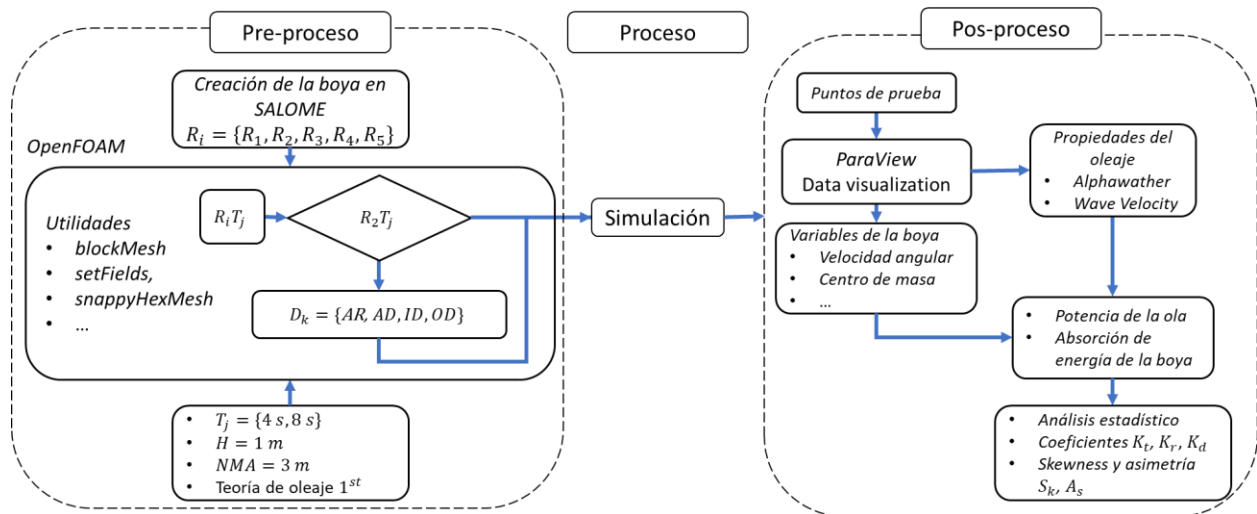


Figura 17. Representación esquemática del proceso de implementación de simulación de la boya cilíndrica.

En cuanto a la demanda computacional, todas las simulaciones se ejecutaron en un sistema de 64 bits con una memoria de 31.3 GB (procesador intel®Core™i7-6950X CPU@3.00GHzx20). Para asegurar la consistencia en los resultados de las simulaciones numéricas, se corrieron 100 períodos de olas para cada prueba individual. La simulación más larga duró 3,488 h utilizando los recursos informáticos disponibles.

3.2 Cálculos de la energía del oleaje

En esta sección se pretende enfatizar, de los cálculos, la capacidad de captura de energía del dispositivo CEO, en particular del absorbedor puntual. Los mecanismos que intervienen en la obtención de la eficiencia incluyen principalmente la geometría de boya y sus características físicas, el tipo de mecanismo de transmisión de potencia y el tipo de generador, si es el caso de producción de energía eléctrica.

3.2.1 Energía de las olas y su absorción por la boya

Para el cálculo de perfiles de onda y velocidades, se empleó la teoría de oleaje de Stokes de primer orden. En ondas unidireccionales, la potencia de la ola por unidad de ancho del frente de onda, o flujo de energía de onda, se puede estimar como [46]:

$$P_{wf} = C_g E_d \quad (35)$$

Esta ecuación también se conoce como densidad de potencia, ya que E_d es la densidad de energía de las olas (J/m^2) y C_g es la velocidad del grupo (m/s).

Como se ha mencionado previamente, las ondas de agua se pueden clasificar por su profundidad relativa. En el caso de las pruebas numéricas descritas en este manuscrito, donde $h = 3 m$ con periodos de ola de 4 y 8 s, se consideraron olas de profundidad intermedia, para las cuales la potencia por unidad de frente de onda se define como:

$$P_{wf} = \frac{\rho g^2}{16\omega} H^2 D(kh) \quad (36)$$

donde H es la altura de la ola local, ω es la frecuencia angular ($2\pi/T$), k es el número de onda ($2\pi/L$), h es la profundidad del agua y

$$D(kh) = \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)}\right) \tanh(kh) \quad (37)$$

La densidad de potencia disponible se puede relacionar con la potencia absorbida por el dispositivo CEO a través de un parámetro denominado ancho de captura o absorción C_w [79], definido como la relación entre la potencia absorbida por la boya (P_{ab}) y el flujo de energía de las olas disponible por unidad de longitud de cresta:

$$C_w = \frac{P_{ab}}{P_{wf}} \quad (38)$$

Aquí $P_{ab} = \tau \cdot \omega_r$ y τ es el torque asociado, mientras que ω_r es la velocidad angular. Estos parámetros se obtienen mediante el análisis del movimiento de la boya. Como P_{ab} está en W y P_{wf} en W/m , C_w tiene unidades en metros. Evans [80] estableció que, para cuerpos simétricos axiales que están sujetos a oleaje regulares, el máximo ancho de captura teórica se define como:

$$C_{wMax} = \epsilon_{df} \frac{L}{2\pi} \quad (39)$$

donde L es la longitud de onda y el valor adimensional ϵ_{df} está vinculado a los grados de libertad. En CEOs con un eje de simetría vertical oscilando en modo *heave* se tiene que $C_{wMax} = k^{-1}$ y para modos de *surge* o *pitch* (**Figura 14**), como en este caso, $\epsilon_{df} = 2$ [52].

En este sentido, la relación entre la potencia undimotriz máxima extraída y el flujo de potencia undimotriz disponible de la ecuación (38) es igual a la ecuación (39), es decir, $C_{wMax} = P_{abMax}/P_{wf}$. Este resultado implica que la geometría de la boya no está relacionada con el máximo C_w ; más bien, está vinculado a los grados de libertad. En conclusión, la forma del objeto flotante es independiente de su ancho máximo de captura, lo que se conoce al conocido ‘efecto antena’, donde un pequeño flotador puede absorber olas en un ancho mayor que su propia dimensión [81].

En cuanto a la conversión de energía disponible de las olas para la boya o para el dispositivo, pueden destacarse diferentes tipos de eficiencia. Un medio simple para evaluar la eficiencia de captura, o eficiencia hidrodinámica, es dividir el ancho de captura (ecuación 38) entre una longitud característica:

$$e_{cw} = \frac{P_{ab}}{P_{wf}B} = \frac{C_w}{B} \quad (40)$$

donde B representa la longitud física del CEO y en este caso es el ancho de la boya (ver **Figura 16**). En la literatura se puede consultar una descripción más detallada de la relación de ancho de captura promedio anual de diferentes tecnologías CEO [82]. Por otro lado, la eficiencia del CEO (e_{CEO}) se puede obtener como la razón de la potencia de salida del generador (P_{out}) y la capacidad de captura de potencia P_{ab} :

$$e_{CEO} = \frac{P_{out}}{P_{ab}} \quad (41)$$

Finalmente, la eficiencia final (e) del CEO, considerando toda la maquinaria del dispositivo y su conversión de energía, se puede describir como:

$$e = \frac{P_{out}}{P_{wf}B} = e_{cw}e_{CEO} \quad (42)$$

Este estudio se centró en los efectos de diferentes diámetros de boya sobre el rendimiento de la capacidad de captura de energía para un conjunto dado de

características de olas, independientemente del ancho de la boya. Por lo tanto, las ecuaciones (38) y (39) son adecuadas para este propósito, mientras que las ecuaciones (40) a (42) pueden usarse cuando los resultados de esta investigación se comparen con experimentos físicos donde se pueda calcular P_{out} .

3.2.2 Transporte de sedimentos y propiedades de oleaje no lineales

En el océano, la extracción de energía del oleaje a través de dispositivos CEO puede alterar la hidrodinámica y la morfodinámica costera. Esto puede deberse al proceso de extracción real o debido a que los CEO alteran la propagación de las olas (reflexión, difracción y disipación), lo que es especialmente importante si los dispositivos se colocan cerca de la costa. Se podría argumentar que la ubicación de CEO más cerca de la costa sería beneficiosa si el diseño de la granja de CEOs cumple un doble propósito: generación de energía libre de carbono y protección costera [83].

Un dispositivo CEO montado en una boya podría actuar como un rompeolas flotante, disipando la energía de las olas y mitigando los efectos de la erosión en la costa. En este caso, dos parámetros son importantes: la relación de inmersión (la altura del agua que cubre el dispositivo, dividida por la profundidad del agua) y la longitud relativa (la longitud de la boya, dividida por la profundidad del agua w/h , donde: $w = L_b + R$): en un rompeolas, los coeficientes de reflexión aumentan con la longitud relativa [84]. El conocimiento de los coeficientes de reflexión, disipación y transmisión producidos por un dispositivo CEO puede ser clave para la instalación de dispositivos aislados o una granja de ellos. Estos tipos de parámetros de transporte sedimentario del oleaje son útiles no sólo para evaluar los efectos sobre la costa, sino también sobre otros CEOs o sobre otras estructuras marinas.

El coeficiente de reflexión (K_r) se calcula como la relación entre las alturas de las olas incidente y reflejada (H_r/H_i), generalmente se evalúa donde las olas entrantes se acercan al CEO en el extremo hacia el mar. El coeficiente de transmisión (K_t) se define como la relación entre las alturas de las olas transmitidas e incidentes (H_t/H_i); este parámetro por lo general se evalúa del lado protegido del CEO: el lado de la costa. Finalmente, se debe agregar un coeficiente para compensar la energía disipada o

absorbida por la interacción onda-estructura (K_d); esto se calcula utilizando la relación entre la supuesta pérdida en la altura de la ola, denotada por H_d , y la altura de la ola incidente, H_d/H_i . La pérdida de energía está relacionada con los coeficientes antes mencionados a fin de lograr la conservación de la energía de las olas [85]:

$$K_t^2 + K_r^2 + K_d^2 = 1 \quad (43)$$

De acuerdo con la ecuación (43), el balance entre las alturas de onda reflejada, transmitida y disipada debe cumplir con la siguiente relación:

$$H_t^2 + H_r^2 + H_d^2 = H_i^2 \quad (44)$$

La ecuación (44) cuantifica la pérdida de energía de las olas cuando el tren de olas interactúa con el CEO. En las simulaciones, H_i y H_r se evaluaron en los puntos $P_1(-9.95,0,0)$, $P_2(-8,0,0)$ y $P_3(-7,0,0)$, por lo que las distancias de separación entre puntos de medición fueron de $x_{12} = 1.95$ y $x_{13} = 2.95$.

Finalmente, para H_t , el punto evaluado fue $P_4(+10,0,0)$. Las alturas de las olas incidentes y reflejadas se midieron mediante la metodología propuesta por Mansard y Funke [86]. Este procedimiento se basa en aplicar el método de mínimos cuadrados para separar los espectros incidente y reflejado asumiendo componentes de Fourier en la descomposición de la superficie libre. Sugieren el uso de tres indicadores colocados en el canal en posiciones adecuadas en relación con la longitud de onda. Se utilizaron 21 puntos de prueba (sensores virtuales), colocados a un metro de distancia en dirección x . Para cuantificar la absorción de energía de las olas de un solo CEO con la metodología mencionada, parte de la altura de las olas se puede relacionar con la disipación de energía; a su vez, ésta se relaciona con la energía absorbida por la boya. Por lo tanto, la absorción/disipación de energía de las olas (H_d^2) puede calcularse a partir de la ecuación (44) como $H_d^2 = H_i^2 - (H_t^2 + H_r^2)$.

En este trabajo se utilizó la herramienta CFD para evaluar los efectos de la boya del dispositivo en la modificación de las propiedades de las olas no lineales que

contribuyen al transporte de sedimentos hacia la costa, como la asimetría vertical y la asimetría de la velocidad [33, 87]. El sesgo de velocidad se define como [88]:

$$S_k = \frac{\langle \tilde{u}^3 \rangle}{\langle \tilde{u}^2 \rangle^{3/2}} = \frac{\langle \tilde{u}^3 \rangle}{\tilde{u}_{rms}^3} \quad (45)$$

donde \tilde{u} es la velocidad oscilatoria cercana al fondo y \tilde{u}_{rms} es la velocidad cuadrática media (RMS) de flujo libre. El sesgo de aceleración o asimetría de onda vertical (A_s) se puede calcular como [89]:

$$A_s = \frac{\langle \mathcal{H}(\tilde{u})^3 \rangle}{\langle \tilde{u}^2 \rangle^{3/2}} \quad (46)$$

donde $\mathcal{H}(\tilde{u})$ es la transformada de Hilbert de la velocidad oscilatoria. Para la simulación, los medidores de oleaje utilizados para registrar la velocidad de la ola se colocaron cada metro desde $x = -10 \text{ m}$ hasta $x = 10 \text{ m}$, con $y = 0$ y $z = -2.75 \text{ m}$.

3.3 Componentes del dispositivo del CEO

En este apartado se presenta una forma simplificada para analizar el principio de trabajo y entender el comportamiento del dispositivo. De esta manera pueden identificarse las condiciones del oleaje óptimas de operación o los parámetros adecuados que el dispositivo debe poseer para mejorar su eficiencia, es decir, cómo influye el arreglo de cada uno de estos parámetros en la eficiencia del dispositivo.

En la **Figura 18** se muestra una representación esquemática de la geometría del dispositivo para un análisis simplificado del problema. En este primer análisis no son consideradas las fuerzas que provocan el movimiento: el objetivo es relacionar el movimiento de ascenso del brazo de la boya con el giro de la polea. Para ello, se traza una línea temporal (d) relacionando el ángulo que forma el brazo de la boya y el soporte vertical del dispositivo (θ), con la longitud de desenrolle de la cuerda c . Se define la distancia del eje de rotación del brazo de la boya (punto rojo) al eje de rotación de la polea h_e , el radio de la polea de (r) y la longitud del segmento del brazo (L_b) donde se sujeta la cuerda que tira de la polea.

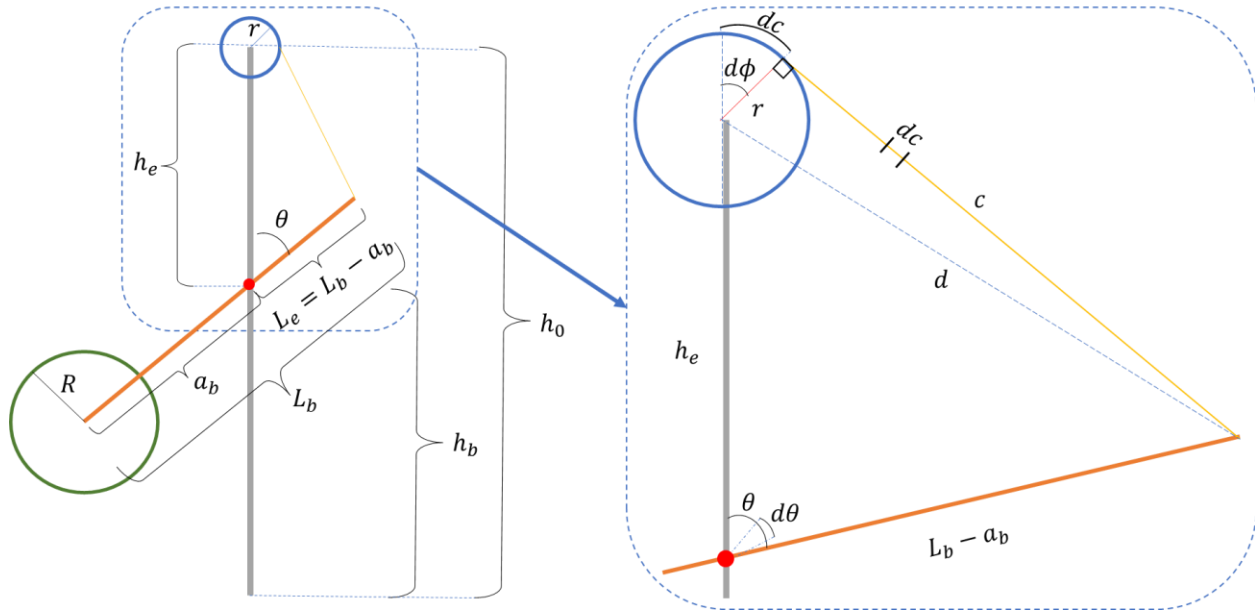


Figura 18. Representación esquemática del modelo geométrico del dispositivo.

Con la longitud temporal d se aplica el teorema de Pitágoras y se tiene:

$$d^2 = r^2 + c^2 \quad (47)$$

Empleando la misma línea temporal, por la ley de cosenos se obtiene:

$$d^2 = L_e^2 + h_e^2 - 2L_e h_e \cos \theta \quad (48)$$

donde $L_e = L - a_b$. Combinando las ecuaciones (47) y (48) se llega a:

$$c(\theta) = (L_e^2 + h_e^2 - 2L_e h_e \cos \theta - r^2)^{1/2} \quad (49)$$

La ecuación (49) representa la longitud de la cuerda en función del ángulo del brazo $c(\theta)$; como se observa, esta relación no es lineal. Para encontrar la razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo de la boya se aplica la primera derivada con respecto al ángulo del brazo de la boya y se tiene:

$$\frac{dc(\theta)}{d\theta} = \frac{L_e h_e \sin \theta}{(L_e^2 + h_e^2 - r^2 - 2L_e h_e \cos \theta)^{1/2}} \quad (50)$$

Para encontrar la razón máxima de la ecuación (50), se aplica la segunda derivada y se iguala a cero.

$$\frac{d^2c}{d\theta^2} = 0 \quad (51)$$

Por lo tanto, podemos definir el ángulo de referencia que satisface la ecuación anterior, y viene dado por:

$$\theta_{Rf} = \cos^{-1} \left[\frac{L_e^2 + h_e^2 - r^2 + \sqrt{(r^2 - L_e^2 - h_e^2)^2 - 4L_e h_e}}{2L_e h_e} \right] \quad (52)$$

Este ángulo se refiere al punto donde se obtiene la razón máxima de cambio. El dispositivo no trabaja en un ángulo puntual, sino que su ciclo barre una trayectoria angular; sin embargo, esta trayectoria debe presentarse alrededor de este ángulo θ_{Rf} para garantizar el mayor desenrolle de la cuerda durante el ascenso de la boya, que se traduce en las revoluciones de la polea. Es decir, que la clave es encontrar los límites de integración para obtener la mayor cantidad de vueltas de polea de acuerdo con los parámetros de la ola.

Hasta ahora no se ha considerado el radio de la boya, además de que no se ha hecho hincapié en la pregunta planteada sobre cuál debe ser la distancia del eje de rotación de la boya con respecto al nivel medio del mar para mejorar la eficiencia del dispositivo, tal y como se mencionó en los primeros apartados: el dispositivo trabaja mejor en bajamar, es decir que el NMA queda muy por debajo del eje de rotación de la boya según las experiencias en las pruebas de laboratorio y de campo.

Para el análisis se consideran algunos casos extremos que la boya puede presentar durante su funcionamiento. La **Figura 19** muestra el ángulo máximo y mínimo del brazo de boya en algunas condiciones extremas.

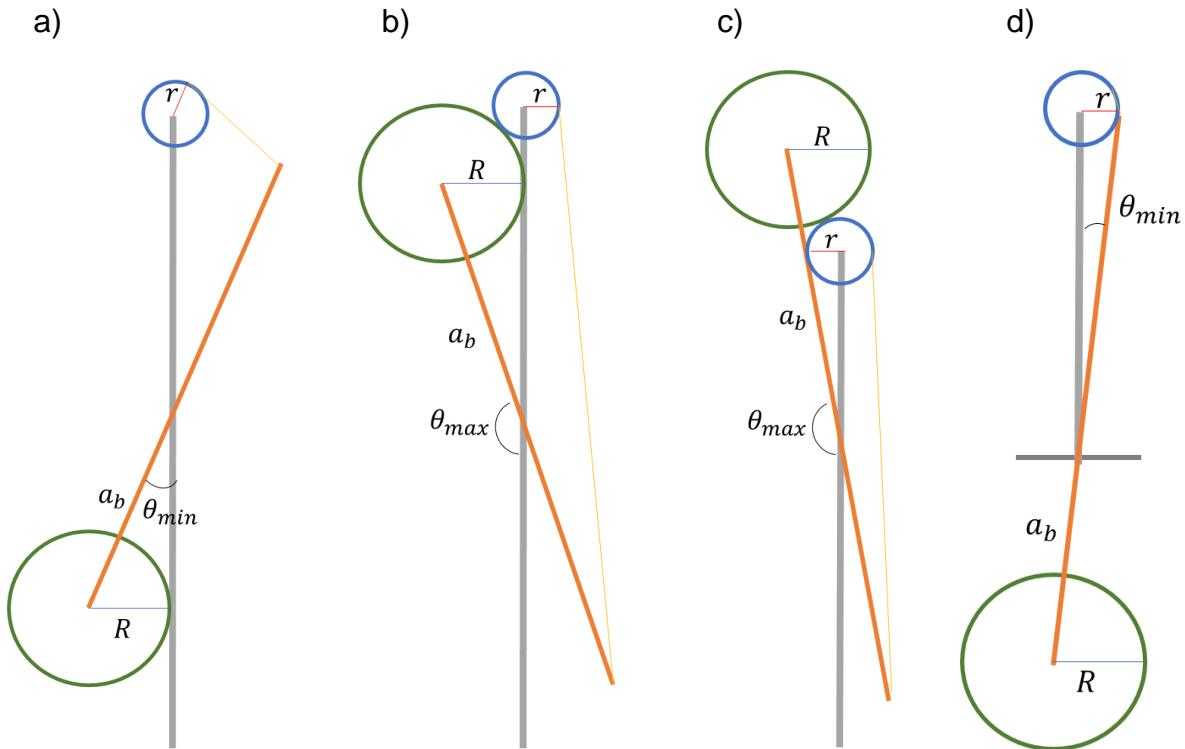


Figura 19. Algunas restricciones que podrían presentarse durante el funcionamiento del dispositivo: a) la boya baja demasiado y tiene contacto con el soporte, b) la boya sube demasiado y golpea el soporte, c) la boya golpea la polea o sobrepasa su distancia y d) sin soporte y el brazo superior toca la polea.

Las restricciones a) y b) de la **Figura 19** implican que el ángulo del brazo se encuentre entre los límites permitidos $\theta_{min} \leq \theta \leq \theta_{max}$, esta expresión se puede presentar matemáticamente como:

$$\sin^{-1}\left(\frac{R}{a_b}\right) \leq \theta \leq \begin{cases} \pi - \sin^{-1}\left(\frac{R}{a_b}\right) \\ \pi - \sin^{-1}\left(\frac{r}{a_b}\right) \end{cases} \quad (53)$$

Al igual que los límites permitidos, se define un rango de trabajo que se relaciona con las condiciones del oleaje regular:

$$\theta_{wmin} \leq \theta_w \leq \theta_{wmax} \quad (54)$$

Estos ángulos que marcan la trayectoria de trabajo están relacionados con el cambio de la longitud de la cuerda Δc_w , de tal manera que:

$$\Delta c_w(\theta_{w_{max}}, \theta_{w_{min}}) = c(\theta_{w_{max}}) - c(\theta_{w_{min}}) \quad (55)$$

Considerando el caso ideal donde la boya sigue la trayectoria de la superficie libre, en el ascenso y descenso, sin considerar la fuerza debida a la gravedad, amortiguamiento del agua, masa añadida o fuerzas externas, se simplifica el análisis cinemático.

De acuerdo con la **Figura 20**, la distancia del NMA al eje de rotación (distancia b) debe satisfacer las siguientes condiciones:

$$b = y_{dw} + R - \frac{H_0}{2} \quad (56)$$

$$b = y_{uw} + R + \frac{H_0}{2}$$

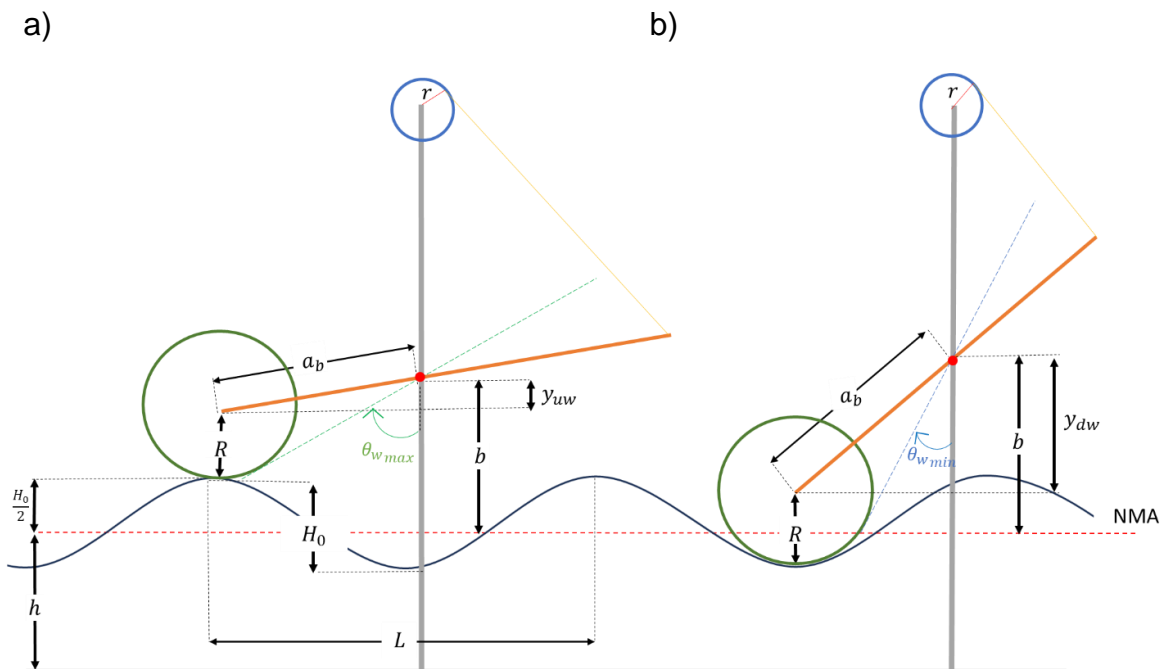


Figura 20. Oleaje incidiendo en la boya en un caso ideal donde la boya sigue la trayectoria de superficie libre sin considerar amortiguamiento del agua, masa añadida o fuerzas externas: a) la boya queda en la cresta de la ola, b) la boya queda en el valle de la ola.

donde H_0 es la altura de la ola, R es el radio de la boya, y_{uw} y y_{dw} son las coordenadas de las alturas máxima y mínima alcanzadas por la boya en una ola incidente,

respectivamente. Las distancias anteriores en el movimiento de subida y bajada se descomponen, según la longitud del brazo de la boya y el ángulo formado, de la siguiente manera:

$$y_{dw} - y_{uw} = H_0 \quad (57)$$

$$a_b \cos \theta_{w_{min}} - a_b \cos \theta_{w_{max}} = H_0$$

donde a_b es la distancia desde el eje de rotación al centro de la boya. Así, para un comportamiento ideal en ondas regulares, tenemos que:

$$\cos \theta_{w_{min}} - \cos \theta_{w_{max}} = \frac{H_0}{a_b} \quad (58)$$

Para trabajar en un intervalo cercano al ángulo de referencia y maximizar $dc/d\theta$, se puede emplear la siguiente relación:

$$\frac{dc(\theta_{w_{max}})}{d\theta} = \frac{dc(\theta_{w_{min}})}{d\theta} \quad (59)$$

Al combinar este resultado con la ecuación (58), tenemos un sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} \cos \theta_{w_{max}} - \cos \theta_{w_{min}} = \frac{H_0}{a_b} \\ \frac{dc(\theta_{w_{max}})}{d\theta} = \frac{dc(\theta_{w_{min}})}{d\theta} \end{array} \right. \quad (60)$$

3.3.1 Revoluciones de la polea

Para las revoluciones por minuto (RPM), generadas por las condiciones del apartado anterior, el cambio infinitesimal de la longitud de la cuerda y el ángulo de la polea es:

$$dc = r d\phi \quad (61)$$

Aprovechando el movimiento de subida y bajada de la boya, por puntos discretos, se puede disponer la longitud de la cuerda a cada elemento (i). Para el movimiento ascendente, $\Delta c_{i'}$ es el diferencial de la cuerda y sigue la expresión:

$$c(\theta_{i+1})_{i+1} > c(\theta_i)_i \rightarrow \Delta c_i \rightarrow \Delta c_{i'} \quad (62)$$

La suma sobre $\Delta c_{i'}$ es el desplazamiento total de la cuerda para el movimiento ascendente, y ϕ_T es el ángulo total de la polea en un ciclo del sistema, ambas cantidades están relacionadas de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\phi_T = \frac{\sum_{i'} \Delta c_{i'}}{r} \quad (63)$$

Para el número de vueltas de la polea, se toma la longitud de la cuerda enrollada entre el valor de la circunferencia de la polea:

$$rev = \frac{\phi_T}{2\pi} = \frac{\sum_{i'} \Delta c_{i'}}{2\pi r} \quad (64)$$

En las olas regulares existe un ciclo para cada período, por lo tanto, podemos saber cuántas vueltas se dan por ciclo y por segundo. Considerando el caso ideal en un ciclo, donde el tiempo que tarda la boya en alcanzar su punto más alto en la cresta de la ola, se puede considerar como la mitad del periodo de la ola ($T \rightarrow T/2$):

$$rev/s = \frac{\phi_T}{2\pi T/2} = \frac{\sum_{i'} \Delta c_{i'}}{\pi r T} \quad (65)$$

Cabe resaltar que este análisis cinemático es únicamente para el ascenso de la boya, mientras que el descenso se considera de restauración del sistema y éste para conservar el movimiento de rotación, requiere del volante de inercia, donde intervienen las fuerzas que provocan el movimiento, el cual no está en el alcance de este primer análisis. Como cada ciclo corresponde a un período de onda, podemos estimar las revoluciones por minuto (RPM):

$$RPM = \frac{60}{\pi r T} \int_{\theta_{wmin}}^{\theta_{wmax}} \frac{c(\theta)}{d\theta} d\theta \quad (66)$$

Estas son las RPM mínimas esperadas de la polea del dispositivo en la parte de ascenso del ciclo de trabajo para un período en olas regulares.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Tiempo de ejecución y estabilidad del modelo

La **Figura 21** muestra una comparación de los datos de la superficie libre de la simulación y el resultado teórico, calculados en el límite de entrada del NWT. La superficie libre fue reproducida con precisión por OpenFOAM. El movimiento de los cuerpos flotantes bajo la acción de las olas ya ha sido validado y se ajusta bien a los datos experimentales reportados [90, 91]. Un caso similar a la presente simulación fue presentado por Qu et al. [92], que estudiaron las fuerzas hidrodinámicas que actúan en prismas horizontales, rectangulares y circulares semisumergidos. En su proceso de validación se comparó la superficie libre del oleaje teórica y simulada, con una variación relativa del 1.08%.

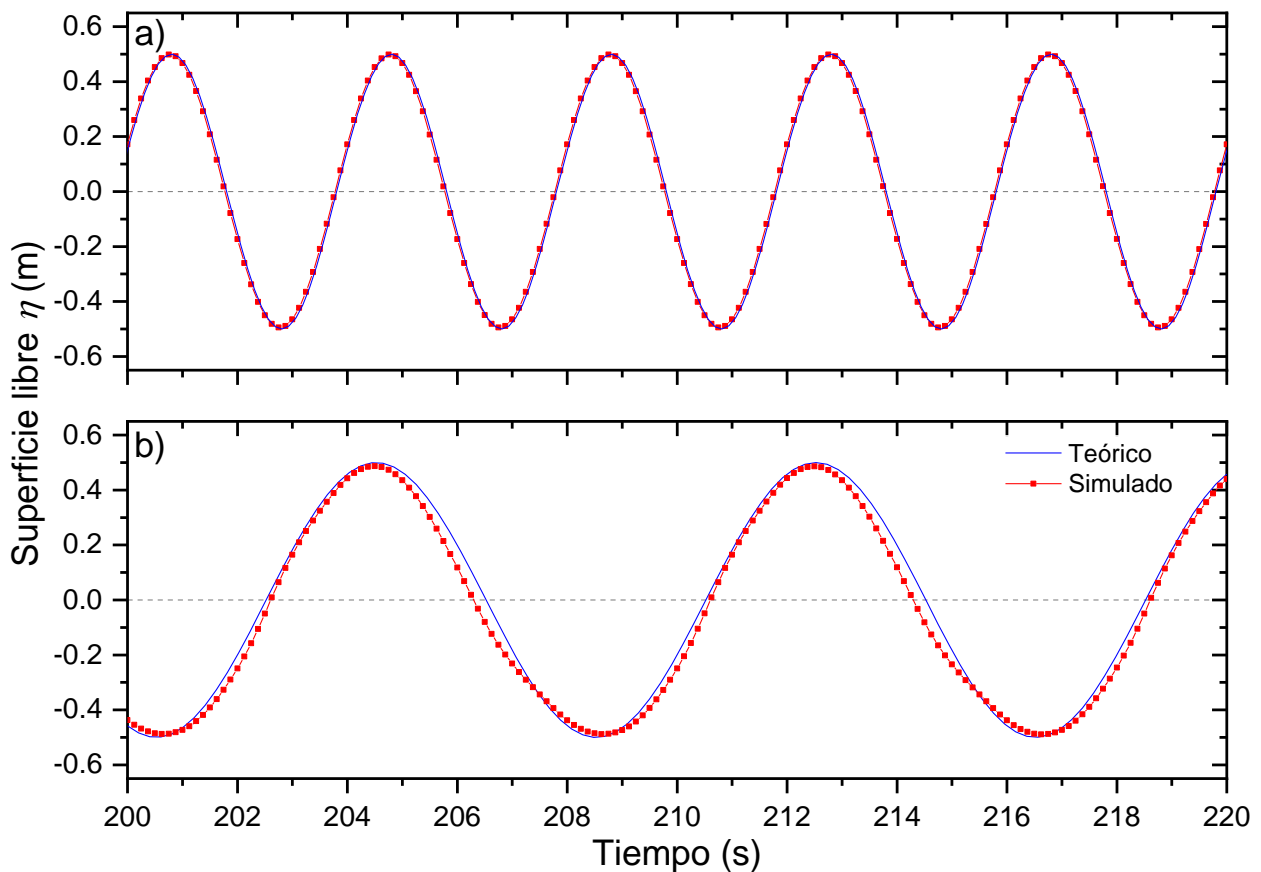


Figura 21. Comparación de la elevación de la superficie libre (η) del resultado teórico y la simulación en la entrada del NWT: a) $T = 4$ s y b) $T = 8$ s, con $H = 1$ m en ambos casos. El NWT contiene la boya R_2 .

En la **Figura 21** se observa que no hay una diferencia significativa entre las superficies libres calculadas teóricamente y las simuladas. Por lo tanto, se considera que el resultado de esta configuración de simulación está de acuerdo con la calidad de la malla. La configuración adicional del NWT para evaluar el conjunto de casos posteriores no fue necesaria. Como se mencionó anteriormente, las limitaciones de un enfoque simulado obligan a tratar los resultados del presente estudio con cautela.

Los resultados, con relación a la entrega de potencia promedio, muestran que luego de algunos periodos de ola, los promedios y las desviaciones estándar de las simulaciones del modelo no cambian significativamente, como se aprecia en la **Figura 22**. (los parámetros para cada simulación de P1 a P9 se describen en la **Tabla 5**).

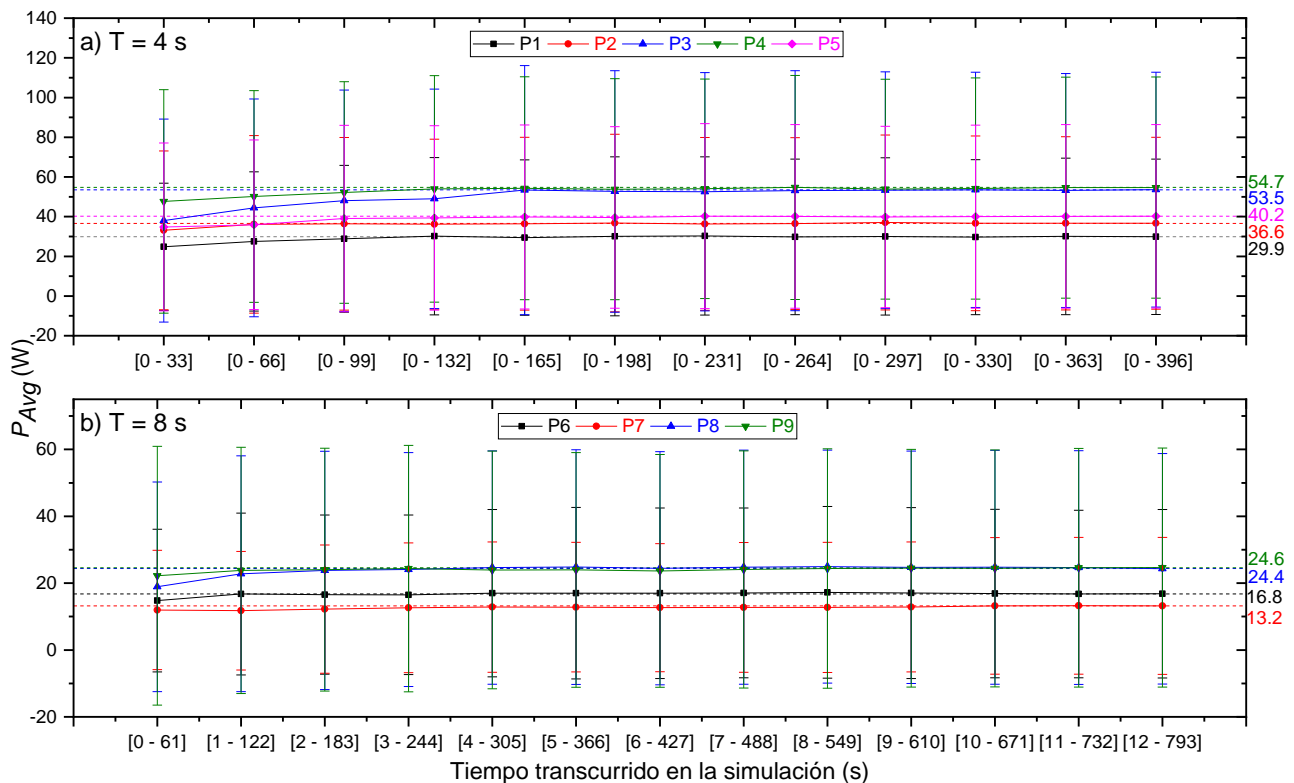


Figura 22. Cien olas simuladas para la boya con $R = 0.25 \text{ m}$: a) para $T = 4 \text{ s}$ y b) para $T = 8 \text{ s}$. Los detalles de P1 a P9 se muestran en la **Tabla 5**.

El resumen de los tiempos de ejecución de la simulación de cien olas para cada prueba se presenta en la **Figura 22**, mientras que el tiempo de cómputo se resume en la **Tabla 4**. Se puede observar que el tiempo de cálculo aumenta a medida que aumenta el tamaño de la boya. Vale la pena mencionar que el tiempo de cálculo con el método *overset grid* es el doble del tiempo de ejecución que con el método de malla dinámica o transformación de malla (*morphing method*), lo que hace que el primero sea considerablemente más exigente desde el punto de vista computacional [68].

Tabla 4. Tiempo de cálculo utilizando el método de transformación de malla (*morphing method*).

Radio de la boya (R)	Tiempo de cálculo para la simulación (horas)	
	$T = 4 s$	$T = 8 s$
R_1	127.23	260.23
R_2	226.01	491.94
R_3	615.93	1246.81
R_4	1196.84	2390.67
R_5	2027.45	3488.00

4.2 Pruebas de sensibilidad

Esta sección describe el análisis de sensibilidad realizado para identificar los parámetros de movimiento del cuerpo rígido (boya), donde los resultados fueron más sensibles y propensos a cambios. Estos parámetros son: *Acceleration Relaxation* (AR), que actúa para reducir la aceleración directamente; *Acceleration Damping* (AD), utilizado para eliminar la divergencia generada por eventos de aceleración repentina, siendo proporcional a la magnitud de la aceleración; *Inner Distance* (ID), la extensión de la región de movimiento del fluido alrededor del cuerpo sólido; finalmente, *Outer Distance* (OD), que se refiere a la extensión de la región de transformación de malla alrededor del cuerpo. Las distancias *inner* y *outer* son equivalentes a la difusividad, aunque en función de la distancia. Al revisar la literatura, no se encontró mucha información sobre estos parámetros de simulación en OpenFOAM asociados al movimiento del cuerpo rígido y la deformación de malla, además de que pocos autores mencionan el tema. Entre los pocos

reportes se tiene como ejemplo el de Windt et al. [66, 69]: investigaron las técnicas *morphing method* y *overset grid*, comparando sus resultados con los datos de un tanque experimental del dispositivo WaveStar, infiriendo que el uso del método de *overset grid* es más costoso desde el punto de vista computacional y que se requiere una configuración minuciosa del modelo; por lo tanto, las distancias *Inner* y *Outer* son criterios importantes que se asocian con el radio o la longitud de la boya. Los valores adoptados aquí están dentro de los rangos considerados anteriormente. Los puntos de la cuadrícula de la malla, dentro del dominio en el rango $ID < D < OD$, se deformaron mientras el objeto se movía y, a menudo, los valores de ID estaban en el orden del espesor de la capa límite y OD estaba restringido por el límite de frontera más cercano [93, 94].

El análisis se realizó considerando la variación de los coeficientes a un radio constante, $R = 0.25 \text{ m}$, por ser la malla que más rápido corría: los valores se muestran en la **Tabla 5**. Las simulaciones se etiquetaron como P1 a P9, realizadas para períodos de 4 y 8 s. Para cada prueba se simuló un total de 100 periodos de olas sin rotura. Los nueve casos presentados se dividieron en cinco grupos, probando una combinación de diferentes parámetros.

Tabla 5. Coeficientes para las pruebas de sensibilidad, en cada caso simulado con $H = 1.0 \text{ m}$, $T = 4 \text{ s}$ y 8 s , realizadas para la boya con $R = 0.25 \text{ m}$.

Caso	T(s)	AR	AD	ID	OD
P1	4	0.7	1.0	0.001	1.5
P2		0.7	1.0	0.001	2.0
P3		0.5	0.5	0.001	1.5
P4		0.5	0.5	0.00001	1.5
P5		0.7	0.75	0.001	1.5
P6	8	0.7	0.75	0.001	1.5
P7		0.7	1.0	0.001	1.5
P8		0.5	0.5	0.001	1.5
P9		0.5	0.5	0.00001	1.5

La **Tabla 6** muestra el conjunto de pruebas de sensibilidad para evaluar los efectos de los parámetros AD, ID y OD en las simulaciones. Por ejemplo, en la prueba OD-4T se

compararon los casos P1 y P2, donde solo se modificó el parámetro *Inner Distance* y el resto permaneció sin cambios; en la prueba ID-4T se analizaron las diferencias entre P3 y P4, donde sólo se modificó el parámetro *Inner Distance*. Se omitió el análisis del parámetro AR porque no se observó un efecto considerable para los valores adoptados, este parámetro controla la tasa de disminución de la aceleración.

Tabla 6. Pruebas de sensibilidad para evaluar los efectos de los parámetros AD, ID y OD en las simulaciones.

Número de prueba	Prueba de sensibilidad	Casos comparados
1	OD-4T	P1, P2
2	ID-4T	P3, P4
3	AD-4T	P1, P5
4	AD-8T	P6, P7
5	ID-8T	P8, P9

Estas pruebas se evaluaron inicialmente calculando la potencia instantánea al multiplicar los valores instantáneos del torque (τ) y la velocidad angular (ω_r); la potencia de salida se calculó como el promedio de la potencia instantánea durante el tiempo de la simulación. Los resultados para los nueve casos son presentados en la **Figura 23**; no hubo diferencias significativas en los tiempos de ejecución ya que todos se realizaron con boya de 0.25 m. Como se observa en la figura, un aumento en el coeficiente OD induce un aumento en la potencia promedio y su desviación estándar. Las pruebas del coeficiente ID no mostraron cambios significativos en la potencia media (al menos en los valores evaluados). Por otro lado, los cambios en el coeficiente AD tuvieron efectos considerables sobre la potencia media y su desviación estándar, al menos para las olas de período más corto ($T = 4$) donde los valores medios fueron un 34% más altos. Al establecer el valor predeterminado $AD = 1$, se produjo el valor mínimo de la potencia de salida. Para evitar la sobreestimación de la potencia, se seleccionó esta última configuración en los análisis posteriores.

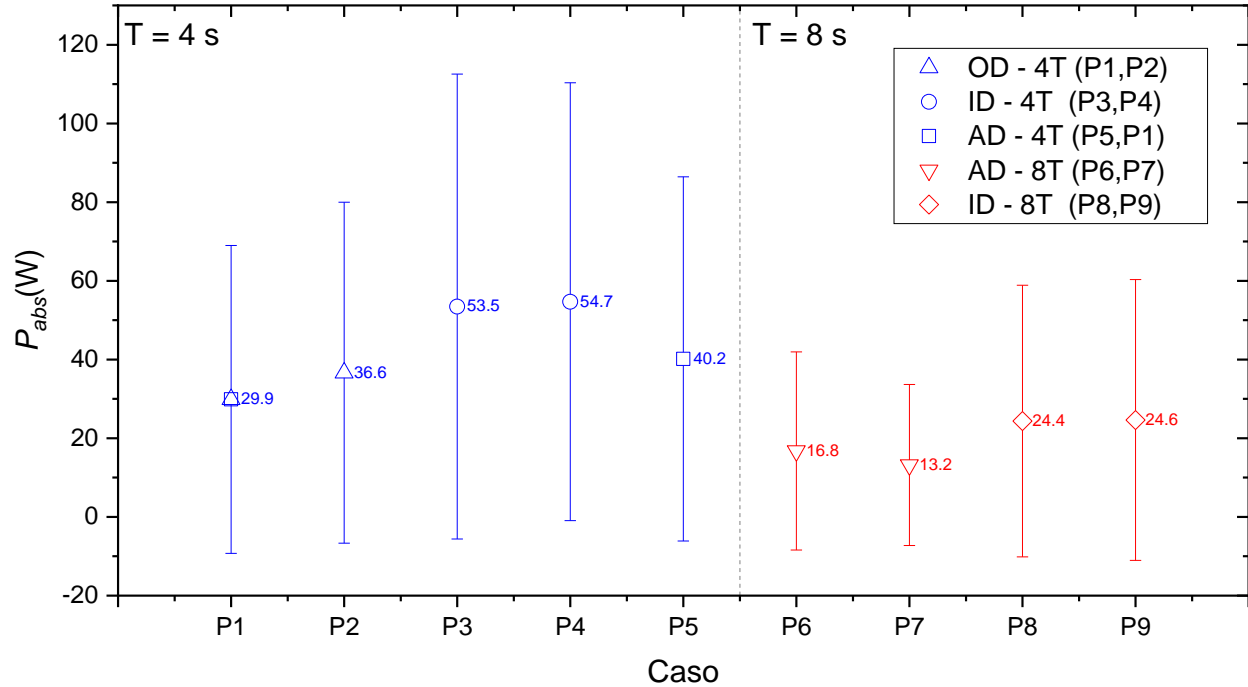


Figura 23. Potencia media absorbida y su desviación estándar para las pruebas de sensibilidad de los casos presentados en la **Tabla 6** ($H = 1.0\text{ m}$ y $R = 0.25\text{ m}$), organizados por los parámetros ID, OD, AD y período de ola.

Para complementar los resultados presentados en la **Figura 23**, se realizó un análisis adicional utilizando la serie temporal de las otras variables disponibles para la boya, como el centro de masa de la boya (CofM_Z), momento angular (Mom_Ang), velocidad *angular* (Vel_Ang) y el torque. Dado que la potencia de salida depende tanto de la velocidad angular como del torque, los valores de potencia (Pot) también se incluyeron en el análisis. Los parámetros estadísticos calculados para cada uno de los pares de series de tiempo (números de prueba en la **Tabla 5**), incluyeron (i) el error cuadrático medio (RMSE), para indicar la magnitud del error en las mismas unidades de la variable (los valores pequeños de este parámetro indican una mayor similitud entre los casos de la **Tabla 6**); (ii) el índice de dispersión (SI), que indica el porcentaje de error, calculado al dividir el RMSE entre el promedio del modelo; (iii) el coeficiente de correlación de Pearson, denotado como r_p con valores entre -1 y $+1$, que define la relación lineal como negativa o positiva, o la ausencia de correlación ($r_p \sim 0$); finalmente, (iv) BIAS, una medida de la tendencia a la subestimación (sobrestimación) cuando se encuentran valores negativos (positivos).

La **Figura 24** muestra los resultados obtenidos del análisis estadístico. El centro de masa (CofM_Z) parece ser la variable de mejor desempeño, con valores bajos de RMSE y SI, y con una correlación lineal bastante alta, mostrando muy poco efecto al cambiar OD, ID o AD. Por otro lado, el torque pareció ser la variable con los valores de RMSE más altos de todas las pruebas realizadas, siendo los cambios en ID los que más afectaron el RMSE. El torque también fue la variable que mostró la menor correlación lineal r_p , especialmente para cambios en ID y AD. Los cambios en el último coeficiente también tuvieron los valores más altos de sesgo positivo (ver **Figura 24-d**). Los estadísticos para la velocidad angular tuvieron valores bastante bajos de RMSE y SI, respectivamente, mientras que el BIAS para esa variable fue bastante cercano a cero. Esta es una gran ventaja, ya que los cálculos de potencia se basan tanto en el torque como en la velocidad angular.

Como no se disponía de experimentos físicos para la validación, los criterios para elegir la combinación de parámetros a utilizar fueron aquellos que proporcionaran valores más bajos de BIAS y RMSE para la potencia y aquellos que evitaran sobreestimaciones elevadas para el torque. Esas características se encontraron en las pruebas donde el AD = 1 se estableció con el valor predeterminado (P1 y P7). Se notó en varias pruebas realizadas, pero no reportadas aquí, que cambios drásticos en estos parámetros podrían inducir la inestabilidad del modelo a través de una distorsión excesiva de malla. Los resultados, empleando el modelo OpenFOAM, demuestran estar de acuerdo con los datos experimentales cuando se aplican los parámetros correctos, tomando en cuenta las respectivas suposiciones y limitaciones [95].

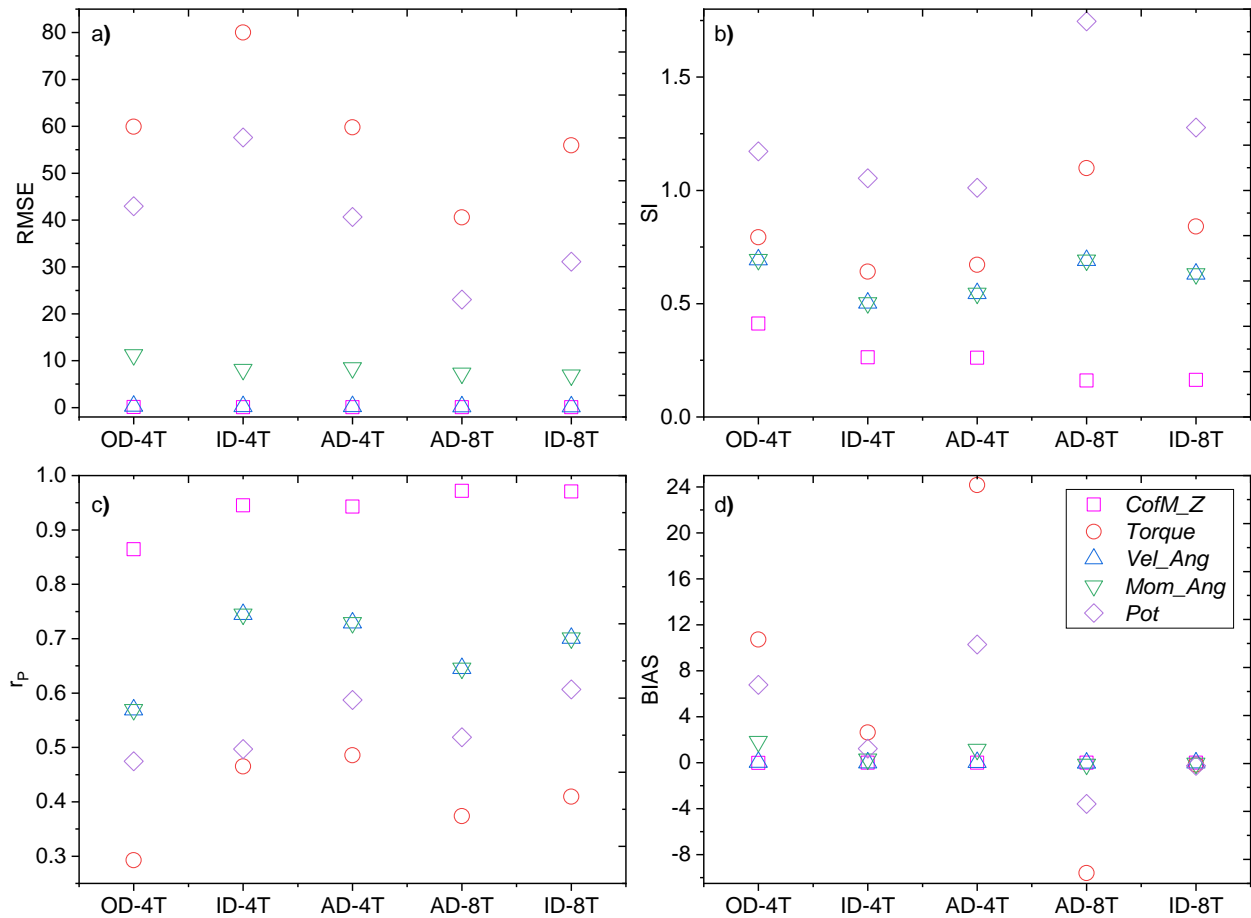


Figura 24. Análisis estadístico para el centro de masa (*CofM_Z*), momento angular (*Mom_Ang*), velocidad angular (*Vel_Ang*), torque y potencia de salida (*Pot*) para los casos presentados en la **Tabla 6**.

4.3 Absorción de potencia del dispositivo CEO

Los valores de los parámetros obtenidos en las pruebas de sensibilidad se establecieron para evaluar sistemáticamente los cambios en el radio de la boya. Estos valores se presentaron en los casos P1 y P7 de la **Tabla 5** (AR = 0.7, AD = 1, ID = 0.001 y OD = 1.5). Como se esperaba, la potencia de salida promedio aumentó con el radio de la boya, este comportamiento se observa en la **Figura 25-a**; quizás, sorprendentemente, con este sistema de boyas las olas de período más corto ($T = 4\text{ s}$) proporcionaron una potencia promedio considerablemente mayor que con las olas de período más largo ($T = 8\text{ s}$). También es evidente en la **Figura 25-a** que las olas de 4 s inducen un aumento exponencial de potencia con un radio de boya creciente, mientras que los valores de

potencia para la boya con olas de período más largo ($T = 8 \text{ s}$) pueden indicar una tasa de aumento mucho más lenta. Por otro lado, la **Figura 25-b** parece sugerir que la eficiencia de captura (eje- y) de una boya cuyo tamaño es una fracción dada de la longitud de onda (eje - x) sería muy similar para olas $T = 4 \text{ s}$ y $T = 8 \text{ s}$. Aquí, es importante señalar que el caso de 1.5 m para $T = 4 \text{ s}$ no se pudo ejecutar con un valor de $OD = 1.5$ debido a las inestabilidades causadas por el movimiento de la boya y el aumento del tamaño de la boya en la malla. Por lo tanto, se tuvo que adoptar un valor de $OD = 2$, lo que podría implicar un error del 1.2% para los valores medios de la potencia promedio absorbida (ver valores de SI presentados en la **Figura 24**).

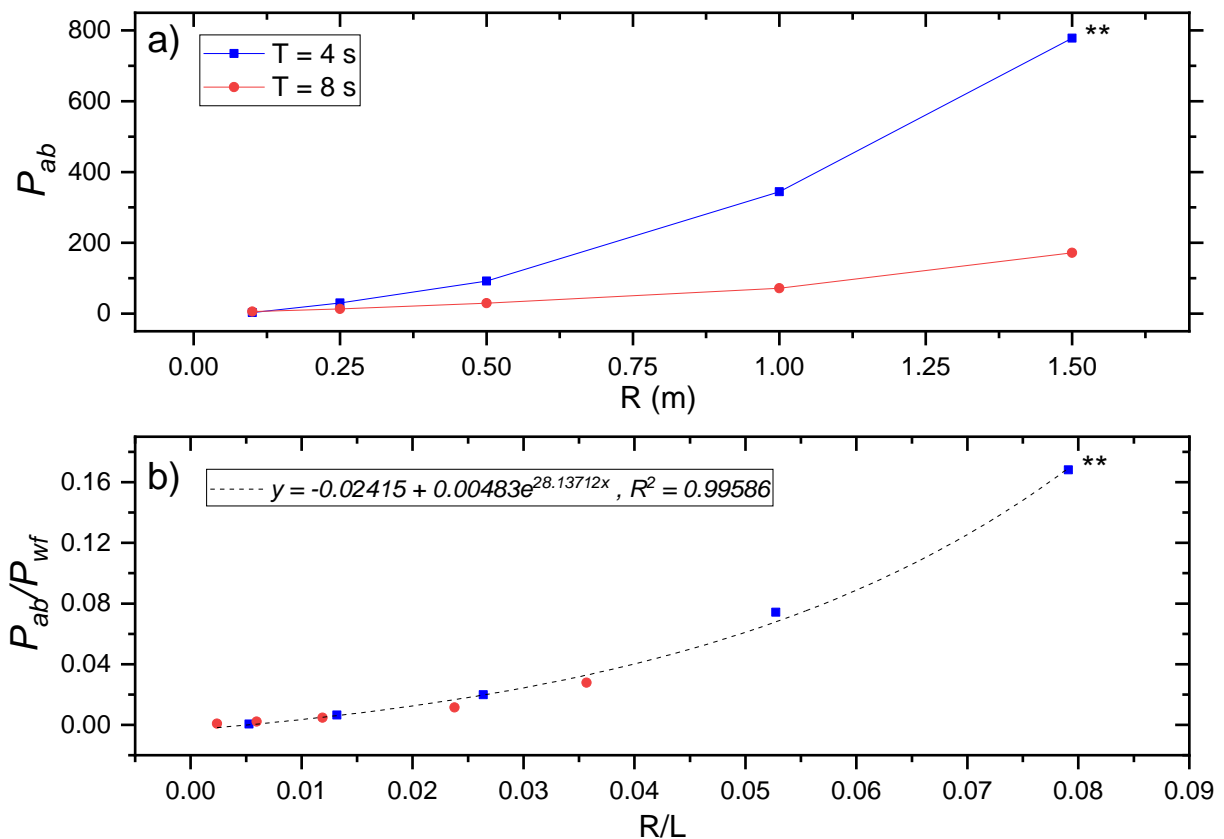


Figura 25. a) Potencia promedio absorbida por el CEO para diferentes tamaños de radio con períodos de oscilación: $T = 4 \text{ s}$ y $T = 8 \text{ s}$. b) Eficiencia de captura por unidad de longitud de boya para diferentes valores con el diámetro de boya normalizado (radio/longitud de onda) para $T = 4 \text{ s}$ y $T = 8 \text{ s}$ períodos de olas. $AR = 0.7$, $AD = 1$, $ID = 0.001$ y $OD = 1.5$. ** $OD = 2.0$.

Los resultados presentados en la **Figura 25** tienen implicaciones significativas para la evaluación de la disponibilidad de energía de las olas y para la fabricación de CEOs del tipo presentado en este documento. Por ejemplo, si sólo confiamos en los resultados

del flujo de energía de las olas (ecuación (35)) de un sitio determinado, para evaluar la disponibilidad de energía de las olas, se esperaría que un sitio con olas de período más largo (es decir, $T = 8 s$) generaría más energía que un sitio con olas de período más corto (es decir, $T = 4 s$) por unidad de altura de ola. Sin embargo, en estos experimentos, usando una boya $R = 1 m$, las ondas $T = 4 s$ capturaron considerablemente más energía (un factor de 4.82), que las olas $T = 8 s$ (**Figura 25-a**). Este factor parece aumentar de manera exponencial con un radio mayor. Esto implica que, para lograr la misma eficiencia de captura, las olas $T = 4 s$ necesitan diámetros de boya mucho más pequeños que las olas $T = 8 s$, lo que posiblemente haría que los dispositivos sean más baratos de fabricar. Por ejemplo, para lograr una eficiencia de captura de 0.16 a 3 m de profundidad, una ola $T = 8 s$ necesitaría una boya con un radio de 3.36 m ($R/L = 0.08$), mientras que una ola $T = 4 s$ necesitaría una boya de la mitad del tamaño (1.5 m). Por lo tanto, con la tecnología analizada en este documento, las regiones donde dominan las olas de período más corto (mares cerrados) generarían más energía y con un dispositivo más económico que en las regiones dominadas por olas de período más largo. Estos resultados están de acuerdo con los resultados observados en otros lugares [96]. En consecuencia, con los resultados presentados en este trabajo, la disponibilidad de energía del oleaje oceánico tiene una alta dependencia de la tecnología utilizada para recolectarla y debiera ser considerada en las evaluaciones tecno-económicas.

Para evaluar la cantidad de energía absorbida por el sistema, se analizaron los resultados obtenidos del cálculo del balance de energía global (ecuación (44)), donde los valores de K_a^2 podrían interpretarse como la cantidad de energía que fue absorbida por el CEO o disipado a través de los procesos turbulentos. La **Tabla 7** presenta estos resultados, en comparación con la energía transmitida a través de la boya y reflejada por ella. Los resultados de este análisis son consistentes con los resultados presentados en la **Figura 23**, donde la cantidad de energía absorbida por el sistema sujeto a olas de $T = 4 s$ fue considerablemente mayor (~35%) que la energía absorbida por el mismo sistema, pero sujeto a $T = 8 s$. Está claro que la cantidad de energía reflejada fue mínima, algo esperado ya que la estructura estaba flotando en la superficie.

Tabla 7. Coeficientes de energía transmitida (K_t^2), reflejada (K_r^2), y absorbida/disipada (K_d^2) para diferentes tamaños de boyas y durante los dos períodos de olas.

Boya	$T = 4 s$			$T = 8 s$		
	K_t^2	K_r^2	K_d^2	K_t^2	K_r^2	K_d^2
R_1	0.298	0.005	0.698	0.477	0.006	0.517
R_2	0.300	0.004	0.695	0.489	0.006	0.506
R_3	0.298	0.005	0.698	0.484	0.005	0.511
R_4	0.290	0.006	0.704	0.480	0.005	0.515
R_5	0.284	0.013	0.704	0.474	0.007	0.519

4.4 Efectos potenciales del CEO sobre el transporte de sedimentos y la protección costera

Otra implicación de los resultados presentados en la **Tabla 7**, es que la boya actúa de manera similar a un rompeolas al reducir la altura de las olas que llegan a la costa. Esto solo daría como resultado una reducción significativa de energía si la distancia a la costa y el número de CEOs se organizaran adecuadamente. Los valores de K_t^2 observados después del paso de las olas por el dispositivo se redujeron considerablemente cerca de la boya. Como cabría esperar, según los argumentos presentados en la sección anterior, el efecto protector del CEO sería mayor para olas con $T = 4 s$ que para olas con $T = 8 s$, ya que la potencia absorbida de las olas de período más corto es mayor. Es decir, las olas más largas tendrían menos atenuación al interactuar con el CEO como cuerpo flotante, tal como se observa en muchos rompeolas flotantes [97].

Por otra parte, es importante analizar el comportamiento de la elevación de la superficie libre en diferentes partes del NWT, ya que la forma de una ola es un buen indicador de transferencias de energía no lineales, lo que podría tener efectos significativos en el transporte de sedimentos cerca de la costa. Las series de tiempo de elevación de la superficie libre en diferentes posiciones del NWT se presentan en las **Figura 26** y **Figura 27**. Las posiciones de los puntos de observación en el modelo $G_i[x] = G_i[i - 11]$ donde x está en la dirección de propagación de la onda, se establecieron cada metro de -10 a $10 m$ en la dirección x ; por ejemplo, el tercer medidor (de izquierda a

derecha), G_3 o $G_3[-8]$ está en la posición $x = -8$ m. La posición del CEO estaba en $x = 0$ ($G_{11}[0]$), con valores negativos a la izquierda y positivos a la derecha. Todos los indicadores se colocaron al nivel del agua inicial. Los registros de superficie libre para $R = 0.25$ m y $T = 4$ s se presentan en la **Figura 26**. Los medidores de la figura se seleccionaron sistemáticamente antes ($x = -8, -4, -2$) y después ($x = 2, 4, 8$) de la posición de la boya. La deformación de la superficie libre en los medidores $G_9[-2]$ y $G_{13}[2]$ fue debida a la interacción de las olas con la boya, debido a que se encontraban muy cerca de ella.

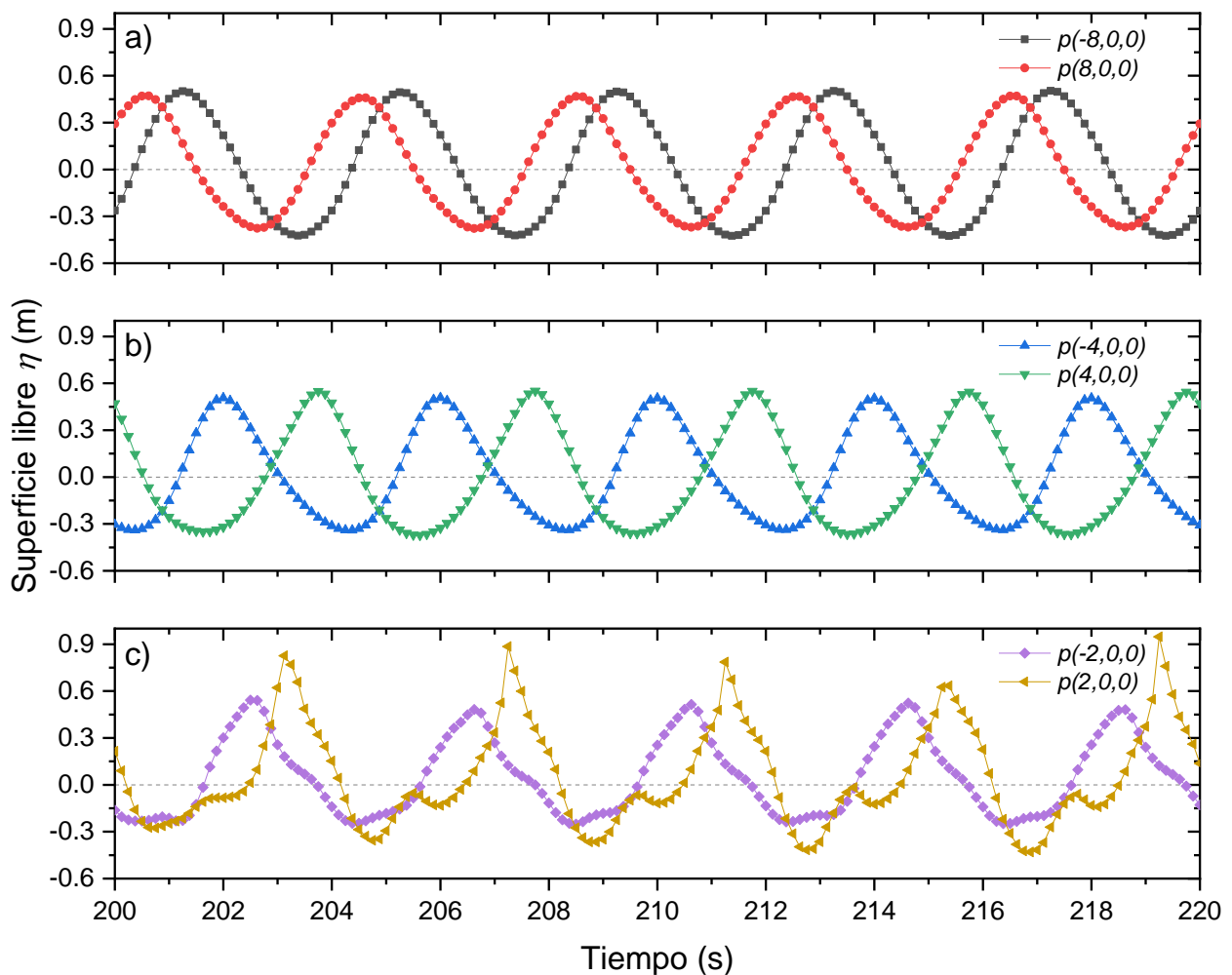


Figura 26. Registros de elevación de la superficie libre para la prueba con $H = 1.0$ m, $T = 4$ s y $R = 0.25$ m con sensores virtuales a distancias simétricas por cada lado de la boya: a) 2, b) 4 y c) 8 m. Los valores negativos se refieren a la izquierda de la boya y los positivos a su derecha.

De manera similar se muestra la **Figura 27**, pero con resultados para $T = 8$ s. Varios estudios han investigado la elevación de la superficie libre con OpenFOAM; por ejemplo, Hu et al. compararon la elevación máxima de la cresta con las teorías de Stokes de primer y segundo orden, demostrando que la elevación de la ola predicha por la simulación en OpenFOAM y la teoría concuerdan bien con la configuración adecuada [98].

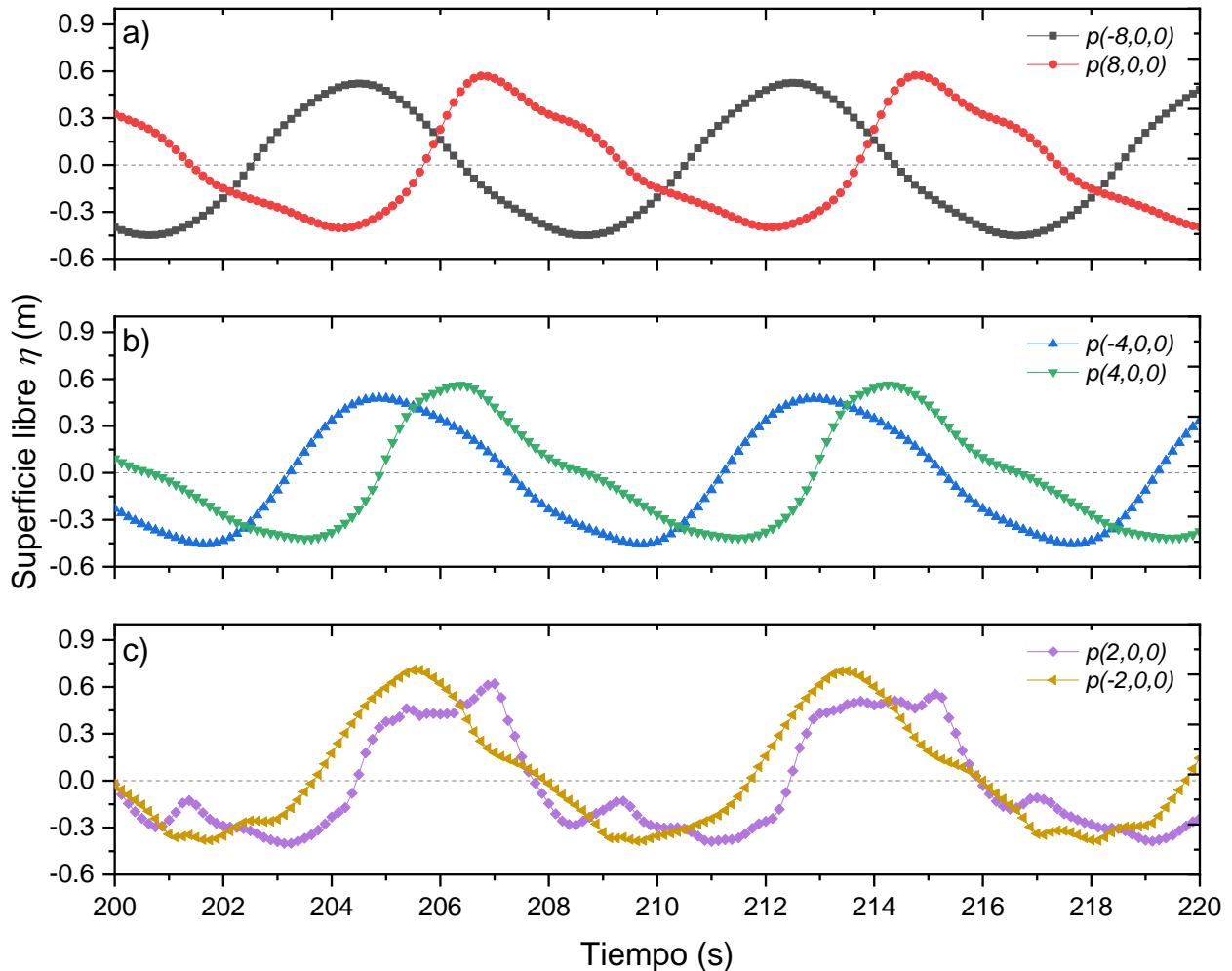


Figura 27. Registros de elevación de la superficie para la prueba con $H = 1.0$ m, $T = 8$ s y $R = 0.25$ m para gálibos virtuales a distancias simétricas a cada lado de la boya: a) 2, b) 4 y c) 8 m. Los valores negativos se refieren a la izquierda de la boya y los positivos a su derecha.

La **Figura 26-a** muestra un registro bastante simétrico de las olas propagándose hacia la boya, incrementando su sesgo (asimetría horizontal) hacia las olas en $x = 2$ m: después de la boya presentan mayor deformación. Las olas del lado derecho del NWT recuperaron gradualmente su forma sinusoidal, pero con menor altura. Para olas $T = 8$ s

(**Figura 27**), el perfil de elevación de la superficie comienza presentando menos asimetría horizontal, y las deformaciones observadas más cerca de la boya son menos pronunciadas que las observadas para $T = 4$ s. En el lado derecho de la NWT, las olas desarrollan una asimetría vertical en forma de diente de sierra inversa, que es más clara en las olas más alejadas de la boya, en $x = 8$ m.

Se puede realizar una evaluación más cuantitativa de la forma de las olas calculando el sesgo y la asimetría de las ondas. Como estos parámetros están asociados con procesos de transporte de sedimentos, la variable utilizada para su evaluación fue la velocidad orbital cercana al fondo, en lugar de la elevación de la superficie. La asimetría (S_k) está relacionada con una asimetría horizontal en la forma de la velocidad, donde las velocidades orbitales hacia la costa (*onshore*) son mayores y de menor duración que las velocidades orbitales dirigidas costa afuera (*offshore*), que son más suaves y de mayor duración ("onda de Stokes", p. ej., **Figura 27-c** para $x = 2$). Este comportamiento de las velocidades orbitales se ha asociado con el transporte predominante de sedimentos hacia la costa [33, 87, 99]. El transporte cercano a la costa también está relacionado con la asimetría vertical (A_s), donde las olas se lanzan hacia adelante con forma de diente de sierra (p. ej., la **Figura 27-a** en $x = 8$ muestra una forma de diente de sierra inversa). Los valores positivos de A_s , definidos por la ecuación (46), están asociados con una contribución al transporte de sedimentos hacia la costa.

Los valores de sesgo y asimetría, calculados usando las ecuaciones (45) y (46), se muestran en la **Figura 28**. Para ambos períodos de olas, los valores de S_k tendieron a aumentar considerablemente hacia la posición de la boya, alcanzando un valor máximo justo después de pasar la boya. A partir de ese momento, los valores de S_k disminuyeron considerablemente a valores cercanos a 0.1, para nuevamente aumentar hacia el final del NWT. En el caso de las olas con $T = 8$ s, tras el paso de la boya, el aumento de S_k fue menos prominente y alcanzó valores muy similares a los alcanzados en la posición de la boya. Esta tendencia se puede observar para todos los radios de las boyas, lo que implica que el aumento del transporte de sedimentos cerca de la costa mitigará la erosión costera y mejorará el acrecentamiento de la playa. Los valores de asimetría fueron

bastante bajos, ya que las condiciones de oleaje iniciales sólo incluían ondas de Stokes monocromáticas de primer orden.

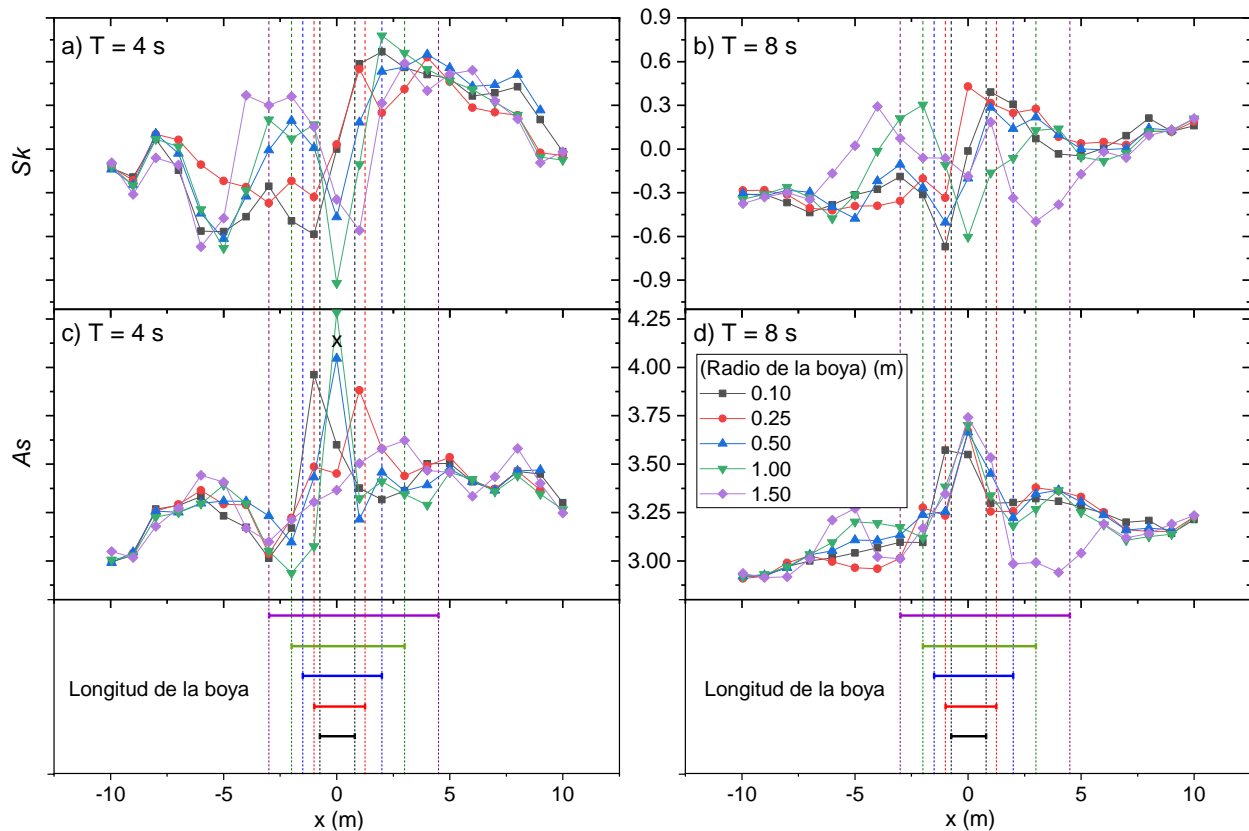


Figura 28. Sesgo (asimetría horizontal a), b)) y velocidad de asimetría (c, d)) evaluados con cinco radios de boyas para $T = 4$ s y $T = 8$ s. Los diferentes colores representan diferentes tamaños de boyas. Las líneas discontinuas verticales muestran la posición de la boya y delimitan las diferentes longitudes de la boya, incluyendo el brazo.

El comportamiento de la asimetría (A_s) se presenta en la **Figura 28** c y d. Para esta variable se observan resultados similares, con un incremento en A_s cerca de la boya. Sin embargo, existen diferencias muy importantes entre $T = 4$ s y $T = 8$ s. Para el primer periodo, la magnitud de los cambios en A_s son muy leves (incrementos de sólo 0.05) y la evolución de A_s es bastante plana, mientras que con $T = 8$ s, los incrementos en A_s son mayores (0.15) y tienen un incremento lineal hacia el final del TNM. Una comparación entre S_k y A_s sugiere que los cambios en S_k son más propensos a transportar sedimentos hacia la costa que los de A_s .

4.5 Análisis de componentes del dispositivo

En esta sección se contempla el comportamiento del dispositivo con el cambio de las variables de la ecuación (49) y esquematizados en la **Figura 18**. Entre las condiciones consideradas se tiene que, el brazo que sujeta la boya debe ser mayor a la amplitud de la ola, esto para que el dispositivo aproveche el movimiento completo de ascenso de la ola hasta la cresta. En la **Tabla 8** se aprecian los valores de las variables de A1 y A2 que se ajustan a la simulación y A3 que presenta valores similares a los del dispositivo a escala 1:20.

Tabla 8. Valores de las variables que interviene en el funcionamiento del dispositivo.

Prueba	R	r	a_b	L_e	h_e	H
A1	0.25	0.05	1.0	1.0	0.8	1.0
A2	0.25	0.05	1.0	1.0	1.0	1.0
A3	0.125	0.025	0.55	0.45	0.53	0.5

La **Figura 29** muestra la gráfica de la ecuación (49) con valores de la **Tabla 8** para el caso A1. Como se esperaba, el cambio en el ángulo del brazo no muestra una relación lineal con la longitud de la cuerda desenrollada. Las líneas verticales delimitan el rango permitido (θ_{min} , θ_{max}) del movimiento de la boya a causa de las limitaciones físicas del modelo (**Figura 19**).

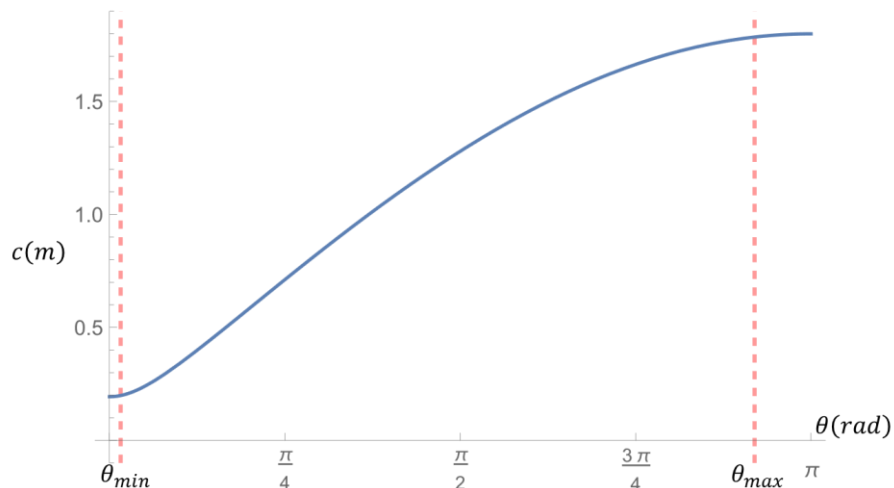


Figura 29. Longitud de la cuerda en función del ángulo del brazo de la boya con los ángulos máximo y mínimo permitidos por la limitaciones físicas del dispositivo (**Figura 19**).

Esta relación no lineal lleva a la necesidad de encontrar el rango de trabajo donde se maximice el desenrolle de la cuerda, maximizando así las revoluciones de la polea. Mientras que θ_{min} y θ_{wmax} son funciones del diseño, los ángulos mínimo y máximo de trabajo (θ_{wmin} y θ_{wmax} , respectivamente) son funciones de la altura de la ola. La altura y periodo de ola son los parámetros empleados para el diseño del dispositivo. Uno de los métodos propuestos es resolver el sistema de ecuaciones formado por las ecuaciones (58) y (59). La **Figura 30** muestra la gráfica de la razón de cambio entre la longitud de la cuerda y el ángulo del brazo de la boya de la prueba A1. En esta gráfica el rango de trabajo queda dentro de los límites de operación del dispositivo y satisface el sistema de ecuaciones.

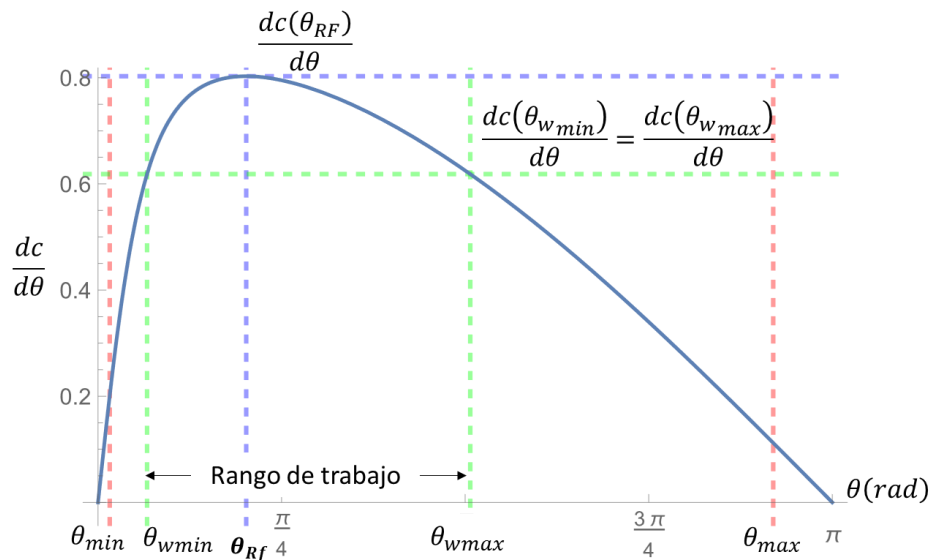


Figura 30. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo, donde $h_e < L_e$. El rango de trabajo pasa por el ángulo θ_{Rf} y se satisface el sistema de ecuaciones de (60).

En el análisis de optimización, el ángulo de trabajo mínimo podría no quedar dentro del rango permitido, como se aprecia en la **Figura 31** para la prueba A3. Esto se resuelve si el ángulo de trabajo mínimo θ_{wmin} adquiere el valor del ángulo mínimo permitido θ_{min} . En este caso no son aplicables los valores obtenidos del sistema de ecuaciones (60). En esta posición, el extremo del brazo que sujeta la cuerda se encuentra en las proximidades de la polea y se encuentra cerca del punto de máximo cambio de longitud de la cuerda θ_{Rf} .

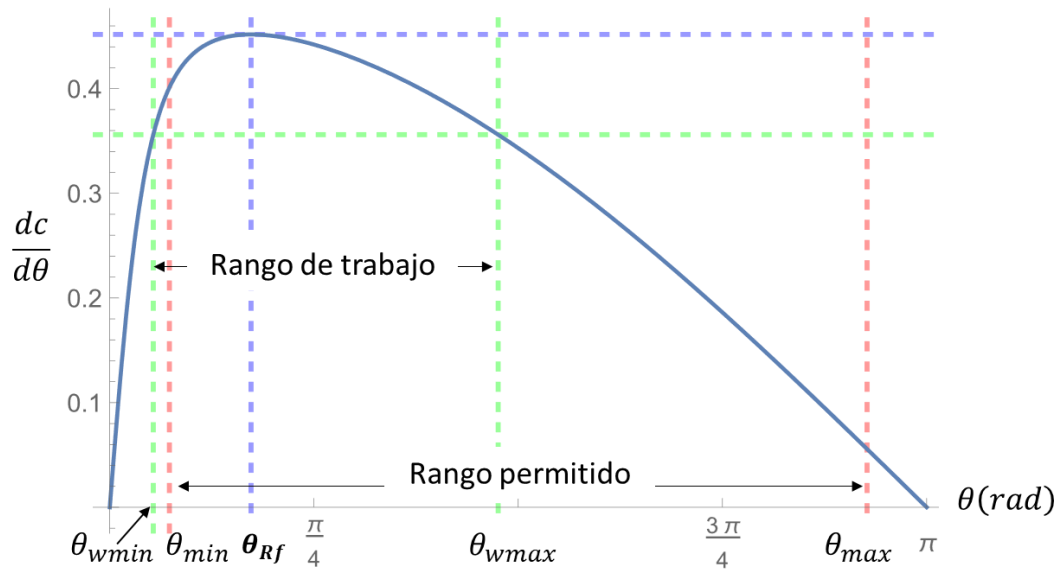


Figura 31. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo, donde $\theta_{wmin} < \theta_{min}$, donde los valores obtenidos por el sistema de ecuaciones (60) ya no son aplicables.

Por otro lado, cuando los valores de h_e y L_e son iguales, la evaluación del ángulo de referencia θ_{Rf} falla, debido a que no se tiene un máximo, sino que se está cerca de una asíntota, la cual en el análisis no tiene sentido físico y corresponde al instante en que el brazo que contiene la cuerda se traslapa con la polea. Para evitar esta contrariedad se emplea el criterio del ángulo mínimo. La **Figura 32** muestra este hecho con los valores de la prueba A2.

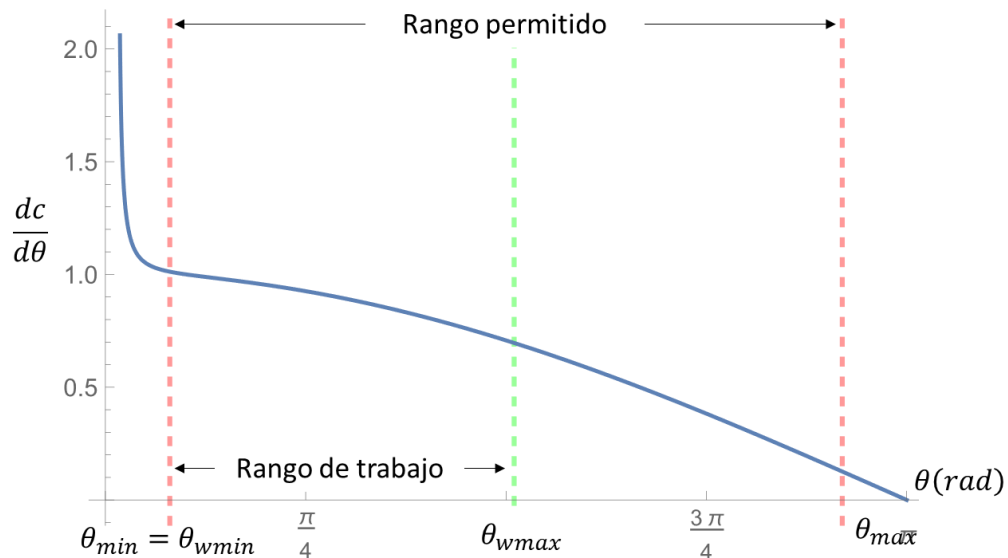


Figura 32. Razón de cambio de la longitud de la cuerda con respecto al ángulo del brazo ($h_e = L_e$).

De los anterior se entiende que las variables que afectan más al comportamiento de la parte de tracción del dispositivo son h_e , L_e y a_b . En este sentido pueden ocurrir los casos de la **Figura 33**. Estos casos se asemejan a las pruebas de laboratorio y de campo del dispositivo a escala 1:20. Como se observa, hay dos maneras de que $h_e < L_e$: disminuyendo a_b o disminuyendo directamente h_e . Si a_b disminuye, θ_{Rf} se desplaza a la derecha, pero si h_e disminuye la razón de cambio máxima disminuye.

Una de las consideraciones para los casos de la **Figura 32** y la **Figura 33-a**, es que la boya puede golpear el soporte si baja demasiado. Si este soporte inferior se sustituye por uno que no toque con la boya, el rango de trabajo se acerca a una razón de cambio de la cuerda más grande, mejorando la eficiencia del dispositivo.

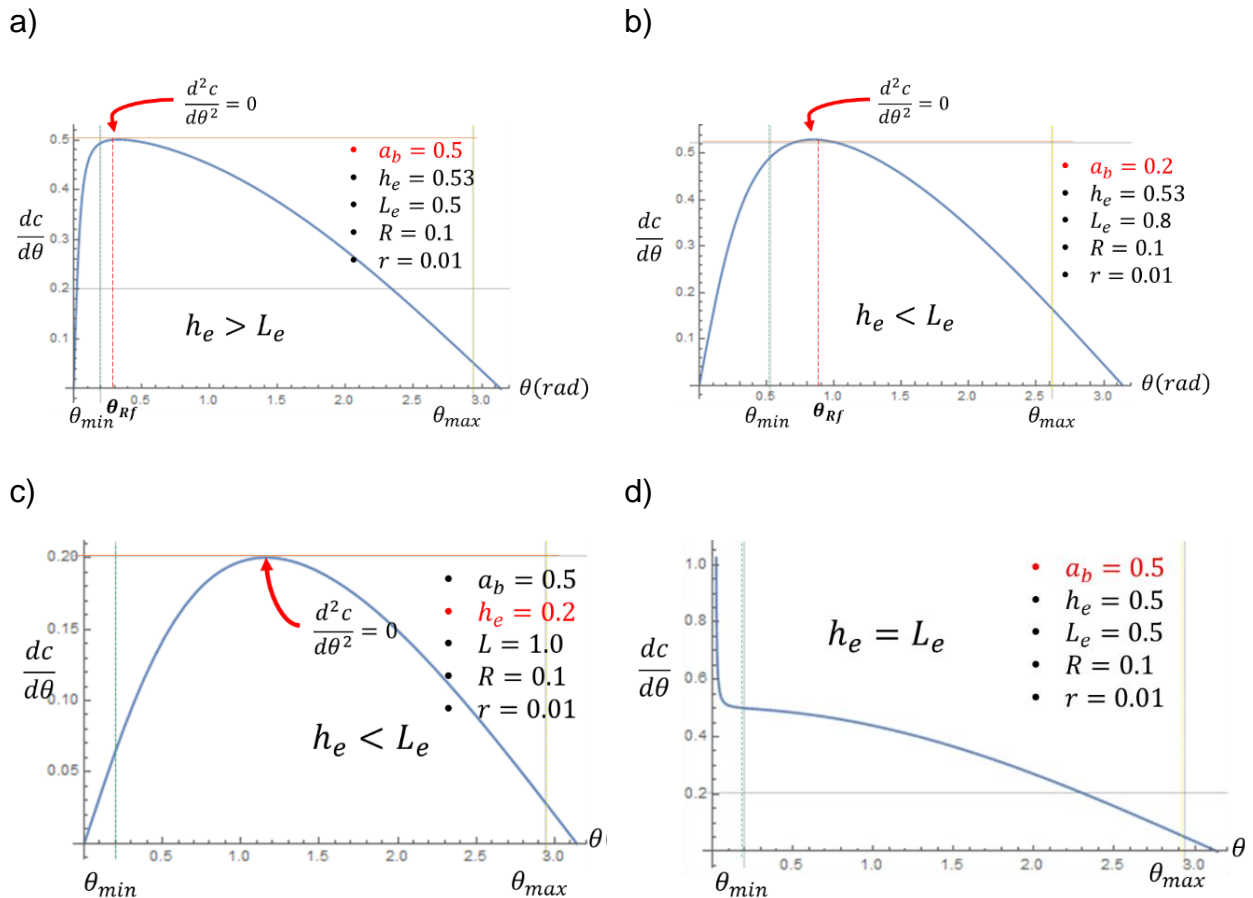


Figura 33. Casos posibles cercanos a la escala 1:20 del dispositivo: a) se obtiene un máximo cambio de la cuerda con $h_e > L_e$, b) disminuyendo a_b se obtiene $h_e < L_e$ y θ_{Rf} se desplaza a la derecha, c) $h_e < L_e$ disminuye la razón de cambio y c) no se tiene una razón de cambio máxima, por lo que el ángulo mínimo de trabajo será el mínimo permitido $\theta_{wmin} = \theta_{min}$.

Acorde con las observaciones realizadas, se determina que, si el dispositivo se diseña para un tipo de ola en particular, este también puede trabajar con olas de menor tamaño ajustando el rango de trabajo, el cual sería menor al rango permitido, por lo tanto, el dispositivo se puede diseñar para una altura de ola específica y puede trabajar con olas de menor altura, además de profundidades más bajas con la posibilidad de ajustar la eficiencia para aprovechar las nuevas condiciones de operación. Otro aspecto importante del diseño del dispositivo es que, si se contempla para una altura de ola, en condiciones extremas el mismo dispositivo se podría proteger al reducir la velocidad angular de la polea cuando la boya se acerca a su altura máxima permitida (el ángulo se acerca a θ_{max}).

CONCLUSIONES

Se realizaron simulaciones en un tanque numérico de olas (NWT), realizadas con el modelo de dinámica de fluidos computacional (CFD) implementado en el software OpenFOAM, para analizar el comportamiento de un convertidor de energía de las olas (CEO) que incluía una boya cilíndrica con unos brazos anclados a un punto y con un eje de rotación. El dispositivo se probó con diferentes radios de boya para analizar el efecto sobre la absorción de potencia cuando se somete a olas regulares (teoría de Stokes de primer orden) con una altura de ola uniforme ($H = 1.0 \text{ m}$) y períodos de 4 y 8 s.

Se ha publicado una cantidad considerable de literatura sobre el uso de OpenFOAM para modelar objetos flotantes que interactúan con fluidos; sin embargo, se ha encontrado poca discusión sobre los coeficientes AR, AD, ID y OD que están relacionados con los parámetros de movimiento del cuerpo. Se debe tener cuidado al cambiar estos coeficientes, ya que valores altos pueden inducir inestabilidad debido a la distorsión de la malla. Las pruebas de sensibilidad realizadas con una boya de 0.25 m de radio exhibieron la mayor variación en los valores de torque, lo que puede conducir a una sobreestimación de la potencia de salida. Sin embargo, el mayor porcentaje de error (valor SI) alcanzado en este estudio fue relativamente bajo (1.25 %), estando relacionado con cambios en OD. Por otro lado, los valores de la velocidad angular presentaron errores muy bajos, compensando la tendencia a la sobreestimación del torque al calcular la potencia. Los valores adoptados para el análisis coincidieron con aquellos en los que las potencias estimadas fueron menores para evitar la sobreestimación (pruebas P1 y P7).

El resultado más importante, relacionado a la absorción de potencia por la boya, es que las boyas de mayor radio absorben más energía y que, para un radio dado, las olas de mayor frecuencia (4 s en este caso) absorben varias veces más energía que las ondas de menor frecuencia (8 s). El tipo de dispositivo CEO analizado aquí se desempeñó mucho mejor en las olas cortas de alta frecuencia. Los resultados también muestran que, para una eficiencia de captura fija, las olas de menor frecuencia necesitan radios de boya mucho más pequeños que las olas de mayor frecuencia, lo que hace que el proceso de fabricación sea económicamente más competitivo, favoreciendo sitios donde predominan

las olas de menor frecuencia. El desarrollo tecnológico de los dispositivos de energía undimotriz de los absorbedores puntuales está cada vez más cerca de ser económicamente viable [100]. Los resultados obtenidos por [96] son similares a los reportados aquí.

Este tipo de dispositivo además podría servir de ayuda en la protección costera si los arreglos en una granja CEO están diseñados adecuadamente. No sólo se logra la absorción/disipación de energía por parte del obstáculo, como se observa en los coeficientes de transmisión bajos, sino también debido a las transformaciones que induce la boya en las propiedades no lineales del campo de olas, como el sesgo S_k y la asimetría A_s de las olas. Los valores del sesgo aumentaron considerablemente cerca de la posición de la boya y más hacia la costa, lo que sugiere que los dispositivos podrían inducir el transporte de sedimentos hacia la costa.

Como no fue posible evaluar todos los casos con geometrías complejas a alta resolución en esta investigación, el NWT se configuró con una malla gruesa. Sin embargo, en lugar de cambiar la densidad de malla, el escenario más crítico se evaluó después de pruebas de sensibilidad numérica, para no sobrestimar el resultado.

Debido a su diseño, este dispositivo CEO se puede ajustar a las condiciones de operación del oleaje mejorando la eficiencia; para ello, se requiere cambiar no solo el tamaño de la boya, sino también las variables h_e , L_e , a_b y la distancia del eje de rotación de la boya al nivel medio del agua. Se recomienda que $h_e < L_e$ y seleccionar la distancia del eje de rotación de la boya al nivel medio del agua que se ajuste a los rangos de trabajo sugeridos (θ_{wmin} y θ_{wmax}) para garantizar que se tenga una razón adecuada de cambio de la cuerda con respecto al brazo de la boya, lo que se refleja en un aumento de las revoluciones de la polea que accionará el generador eléctrico.

RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

Estos resultados deben tratarse con precaución ya que no hay resultados de laboratorio a gran escala que puedan usarse para validar los resultados del modelo numérico. Por lo tanto, se recomienda verificar la consistencia de estos resultados numéricos utilizando una malla mucho más fina y, por lo tanto, quizás mejorar la precisión y estabilidad de las simulaciones numéricas. Cuando se incluyen objetos en movimiento en la simulación, es importante considerar los parámetros *ID* y *OD* (*Inner y Outer Distance*, respectivamente). Aunque los valores de torque se incluyeron en los resultados numéricos, es necesario considerar el efecto de las fuerzas hidrodinámicas, ya que tiene una relación directa con el brazo y los radios de la boya.

Al modelar la boya como un rompeolas, un parámetro importante es la longitud relativa de la boya, que determina la cantidad de energía de la ola reflejada. Sin embargo, dado que la boya tiene cierto grado de libertad, el cambio en la longitud relativa podría ser engañoso; se ha descrito una metodología alternativa adecuada [101], en la que los parámetros individuales están estrechamente relacionados entre sí [102].

Aunque no fue posible completar el trabajo de experimentación, se sugiere mejorar la sujeción de la boya al brazo, utilizar un material diferente de la boya (por ejemplo, PVC), cambiar el sistema de restauración de la cuerda por un sistema retráctil y añadir un eje de rotación vertical para que el dispositivo se alinee a la dirección de la ola incidente.

Finalmente, en relación con el transporte de sedimentos hacia la costa, se necesitan más análisis para comprender estos efectos bajo campos de olas espectrales y con configuraciones de boyas más grandes, que están más allá del alcance de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Rehman, A., M.M. Alam, I. Ozturk, R. Alvarado, M. Murshed, C. Işık, and H. Ma, *Globalization and renewable energy use: how are they contributing to upsurge the CO2 emissions? A global perspective*. Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(4): p. 9699-9712.
2. SDG, T., *The Energy Progress Report*. IEA: Paris, France, 2021.
3. IEA. *Renewable power generation by technology in the Net Zero Scenario, 2010-2030*. 2023 [cited 2023; Available from: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-power-generation-by-technology-in-the-net-zero-scenario-2010-2030>].
4. IEA. *Renewable Electricity*. 2022 [cited 2023; Available from: <https://www.iea.org/reports/renewable-electricity>].
5. Tawn, R. and J. Browell, *A review of very short-term wind and solar power forecasting*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **153**: p. 111758.
6. Pelc, R. and R.M. Fujita, *Renewable energy from the ocean*. Marine Policy, 2002. **26**(6): p. 471-479.
7. Falnes, J., *A review of wave-energy extraction*. Marine structures, 2007. **20**(4): p. 185-201.
8. Taveira-Pinto, F., G. Iglesias, P. Rosa-Santos, and Z.D. Deng, *Preface to special topic: marine renewable energy*. 2015, AIP Publishing LLC. p. 061601.
9. IRENA, *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*, I.R.E. Agency, Editor. 2023, International Renewable Energy Agency: Abu Dhab. p. 36.
10. Neill, S.P. and M.R. Hashemi, *Fundamentals of ocean renewable energy: generating electricity from the sea*. 2018: Academic Press.

11. Rehman, S., L.M. Alhems, M.M. Alam, L. Wang, and Z. Toor, *A review of energy extraction from wind and ocean: Technologies, merits, efficiencies, and cost*. Ocean Engineering, 2023. **267**: p. 113192.
12. Aghabalayev, F. and M. Ahmad, *Does innovation in ocean energy generations-related technologies in G7 countries reduce carbon dioxide emissions? Role of international collaboration in green technology development and commercial and monetary policies*. Environmental Science and Pollution Research, 2023. **30**(6): p. 14545-14564.
13. Jebaraj, S. and S. Iniyar, *A review of energy models*. Renewable and sustainable energy reviews, 2006. **10**(4): p. 281-311.
14. Zheng, C.W., Q. Wang, and C.Y. Li, *An overview of medium-to long-term predictions of global wave energy resources*. Renewable and sustainable energy reviews, 2017. **79**: p. 1492-1502.
15. Ransley, E., D. Greaves, A. Raby, D. Simmonds, and M. Hann, *Survivability of wave energy converters using CFD*. Renewable Energy, 2017. **109**: p. 235-247.
16. Falnes, J. and J. Løvseth, *Ocean wave energy*. Energy policy, 1991. **19**(8): p. 768-775.
17. Aderinto, T. and H. Li, *Ocean wave energy converters: Status and challenges*. Energies, 2018. **11**(5): p. 1250.
18. Ahmad, T. and D. Zhang, *A critical review of comparative global historical energy consumption and future demand: The story told so far*. Energy Reports, 2020. **6**: p. 1973-1991.
19. Kober, T., H.-W. Schiffer, M. Densing, and E. Panos, *Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019*. Energy Strategy Reviews, 2020. **31**: p. 100523.

20. IEA, *Global Energy Review 2019, The latest trends in energy and emissions in 2019*. 2019, International Energy Agency.
21. Gielen, D., F. Boshell, D. Saygin, M.D. Bazilian, N. Wagner, and R. Gorini, *The role of renewable energy in the global energy transformation*. Energy strategy reviews, 2019. **24**: p. 38-50.
22. Gunn, K. and C. Stock-Williams, *Quantifying the global wave power resource*. Renewable Energy, 2012. **44**: p. 296-304.
23. Clément, A., P. McCullen, A. Falcão, A. Fiorentino, F. Gardner, K. Hammarlund, G. Lemonis, T. Lewis, K. Nielsen, and S. Petroncini, *Wave energy in Europe: current status and perspectives*. Renewable and sustainable energy reviews, 2002. **6**(5): p. 405-431.
24. Polinder, H. and M. Scuotto. *Wave energy converters and their impact on power systems*. in *2005 International conference on future power systems*. 2005. IEEE.
25. Henriques, J., L. Gato, A.d.O. Falcao, E. Robles, and F.-X. Faÿ, *Latching control of a floating oscillating-water-column wave energy converter*. Renewable Energy, 2016. **90**: p. 229-241.
26. Esmaeilzadeh, S. and M.-R.J.O.E. Alam, *Shape optimization of wave energy converters for broadband directional incident waves*. Ocean Engineering, 2019. **174**: p. 186-200.
27. Garcia-Teruel, A., D.J.R. Forehand, and S.E. Reviews, *A review of geometry optimisation of wave energy converters*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **139**: p. 110593.
28. Trapani, K., D.L. Millar, and H.C.J.R.e. Smith, *Novel offshore application of photovoltaics in comparison to conventional marine renewable energy technologies*. Renewable energy, 2013. **50**: p. 879-888.

29. Dalton, G.J., R. Alcorn, and T. Lewis, *Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy convertor in Ireland, Portugal and North America*. Renewable Energy, 2010. **35**(2): p. 443-455.
30. Centre, E.T.E.M.E. *Press release: council takes ownership of pelamis device*. 2017 [cited 2021 July, 1]; Available from: <http://www.emec.org.uk/press-release-council-takes-ownership-of-pelamis-device/>.
31. Centre, E.E.M.E. *Aquamarine Power*. 2023 [cited 2023; Available from: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/aquamarine-power/>].
32. Energy, C.C. *CETO 5 – Perth (WA)*. 2023 [cited 2023; Available from: <https://www.carnegiece.com/portfolio/ceto-5-perth-wa/>].
33. Hoefel, F. and S. Elgar, *Wave-induced sediment transport and sandbar migration*. Science, 2003. **299**(5614): p. 1885-1887.
34. Astariz, S., G. Iglesias, and S.E. Reviews, *The economics of wave energy: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **45**: p. 397-408.
35. Teixeira-Duarte, F., D. Clemente, G. Giannini, P. Rosa-Santos, and F. Taveira-Pinto, *Review on layout optimization strategies of offshore parks for wave energy converters*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **163**: p. 112513.
36. Karan, H., R.C. Thomson, and G.P. Harrison, *Full life cycle assessment of two surge wave energy converters*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2020. **234**(4): p. 548-561.
37. Nasrollahi, S., A. Kazemi, M.-H. Jahangir, and S. Aryaee, *Selecting suitable wave energy technology for sustainable development, an MCDM approach*. Renewable Energy, 2023. **202**: p. 756-772.
38. Foteinis, S., *Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022. **162**: p. 112448.

39. Ortega-García, M., *Independent wave capture module that converts ocean waves into electrical energy*, W.I.P.O. (WIPO), Editor. 2013.
40. Garcia-Santiago, E., *Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante*, in *Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Instituto de ingeniería*. 2014, UNAM.
41. Garcia-Santiago, E., *Potencial de la energía undimotriz en costas mexicanas y usos potenciales*, in *Instituto de Ingeniería, Campus C.U.* 2019, UNAM.
42. Izquierdo, S., E. Santiago, E. Mendoza, R. Silva, and J. Gonzalez-Escriva, *Caracterización del oleaje en Puerto Morelos (México) para la instalación del WEC-MICO*, in *XIII jornadas españolas de ingeniería de puertos y costas*. 2015.
43. Santana Guzmán, M., *Caracterización de la energía del oleaje en Yucatán*. 2021, Tesis (MC)--Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad
44. Guzmán, M.S., *CARACTERIZACIÓN DE LA ENERGÍA DEL OLAJE EN YUCATÁN*. 2021, INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL.
45. Díez, P.F., *Energía de las Olas*. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética, Universidad de Cantabria, 2005.
46. Dhanak, M.R. and N.I. Xiros, *Springer handbook of ocean engineering*. 2016: Springer.
47. Brooke, J., *Wave Energy Conversion*. 2003: Elsevier Science.
48. Cornett, A.M. *A global wave energy resource assessment*. in *The Eighteenth international offshore and polar engineering conference*. 2008. OnePetro.
49. Airy, G.B., *Tides and waves*. 1845: B. Fellowes.
50. Stokes, G.G., *On the theory of oscillatory waves*. Trans. Cam. Philos. Soc., 1847. **8**: p. 441-455.

51. González, C., J.A.C. Pérez, R.C. Santos, A.C. Gil, and M.-A.A.C. González, *Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables*. 2009: Pearson Prentice Hall:.
52. Antonio, F.d.O., *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. **14**(3): p. 899-918.
53. Pecher, A. and J.P. Kofoed, *Handbook of ocean wave energy*. 2017: Springer Nature.
54. Energy, C.C. *CETO Technology*. 2016 [cited 2023; Available from: <https://www.carnegiece.com/ceto-technology/>].
55. Tethys. *Oyster 800 at EMEC*. 2023 [cited 2023]; Available from: <https://tethys.pnnl.gov/project-sites/oyster-800-emec>.
56. Australian Renewable Energy Agency, A. *Oceanlinx 1MW Commercial Wave Energy Demonstrator*. 2021 [cited 2023; Available from: <https://arena.gov.au/projects/oceanlinx-1mw-commercial-wave-energy-demonstrator/>].
57. Falcão, A.F.d.O., *Modelling and control of oscillating-body wave energy converters with hydraulic power take-off and gas accumulator*. Ocean engineering, 2007. **34**(14-15): p. 2021-2032.
58. Faltinsen, O., *Sea loads on ships and offshore structures*. Vol. 1. 1993: Cambridge university press.
59. Wendt, J.F., *Computational fluid dynamics: an introduction*. 2008: Springer Science & Business Media.
60. Andersson, B., R. Andersson, L. Håkansson, M. Mortensen, R. Sudiyo, and B. Van Wachem, *Computational fluid dynamics for engineers*. 2011: Cambridge university press.

61. Xu, R., H. Wang, Z. Xi, W. Wang, and M. Xu, *Recent progress on wave energy marine buoys*. Journal of Marine Science and Engineering, 2022. **10**(5): p. 566.
62. Falnes, J. and A. Kurniawan, *Ocean waves and oscillating systems: linear interactions including wave-energy extraction*. Vol. 8. 2020: Cambridge university press.
63. Greenshields, C.J.J.O.F.L., version, *OpenFOAM user guide*. 2015. **3**(1): p. 47.
64. Windt, C., J. Davidson, J.V. Ringwood, and S.E. Reviews, *High-fidelity numerical modelling of ocean wave energy systems: A review of computational fluid dynamics-based numerical wave tanks*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **93**: p. 610-630.
65. Giorgi, G., M. Penalba, and J. Ringwood, *Nonlinear hydrodynamic models for heaving buoy wave energy converters*, in *Asian Wave and Tidal Energy Conference*. 2016.
66. Windt, C., J. Davidson, B. Akram, and J.V. Ringwood. *Performance assessment of the overset grid method for numerical wave tank experiments in the OpenFOAM environment*. in *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2018. American Society of Mechanical Engineers.
67. Davidson, J., M. Karimov, A. Szelechman, C. Windt, and J. Ringwood. *Dynamic mesh motion in OpenFOAM for wave energy converter simulation*. in *14th OpenFOAM Workshop*. 2019.
68. Windt, C., J. Davidson, D.D. Chandar, N. Faedo, and J.V. Ringwood, *Evaluation of the overset grid method for control studies of wave energy converters in OpenFOAM numerical wave tanks*. Journal of Ocean Engineering and Marine Energy, 2020. **6**(1): p. 55-70.
69. Windt, C., J. Davidson, D. Chandar, and J. Ringwood, *On the importance of advanced mesh motion methods for WEC experiments in CFD-based numerical*

- wave tanks, in *VIII International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*, CIMNE, Editor. 2019, MARINE. p. 145-156.
70. Ltd, O. *Numerical schemes*. 2021 [cited 2021 July, 7]; Available from: <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/6-solving/6.2-numerical-schemes>.
 71. Marion, M. and R. Temam, *Navier-Stokes equations: Theory and approximation*. Handbook of numerical analysis, 1998. **6**: p. 503-689.
 72. Hirt, C.W. and B.D. Nichols, *Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries*. Journal of computational physics, 1981. **39**(1): p. 201-225.
 73. Devolder, B., P. Schmitt, P. Rauwoens, B. Elsaesser, and P. Troch. *A review of the implicit motion solver algorithm in OpenFOAM® to simulate a heaving buoy*. in *NUTTS conference*. 2015.
 74. Holzmann, T., *Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®*. Loeben, Germany: Holzmann CFD, 2016.
 75. McCormick, M.E., *Ocean engineering mechanics: with applications*. 2009: Cambridge University Press.
 76. Chow, J.H., E.J.I.J.o.N.A. Ng, and O. Engineering, *Strongly coupled partitioned six degree-of-freedom rigid body motion solver with Aitken's dynamic under-relaxation*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2016. **8**(4): p. 320-329.
 77. CASCADE, O. *SALOME, The Open Source Integration Platform for Numerical Simulation 2005-2021* [cited 2021 July, 7]; Available from: <https://www.salome-platform.org/>.
 78. Jacobsen, N.G.J.D., The Netherlands, *waves2foam manual*. 2017. **570**.

79. Budar, K. and J. Falnes, *A resonant point absorber of ocean-wave power*. Nature, 1975. **256**(5517): p. 478-479.
80. Evans, D.V., *A theory for wave-power absorption by oscillating bodies*. Journal of Fluid Mechanics, 1976. **77**(1): p. 1-25.
81. Babarit, A., *Ocean wave energy conversion: resource, technologies and performance*. 2017: Elsevier.
82. Babarit, A., *A database of capture width ratio of wave energy converters*. Renewable Energy, 2015. **80**: p. 610-628.
83. Abanades, J., D. Greaves, and G. Iglesias, *Wave farm impact on the beach profile: A case study*. Coastal Engineering, 2014. **86**: p. 36-44.
84. Loukili, M., D. Dutykh, S. Pincemin, K. Kotrasova, and N. Abcha, *Theoretical Investigation Applied to Scattering Water Waves by Rectangular Submerged Obstacles/and Submarine Trenches*. Geosciences, 2022. **12**(10): p. 379.
85. Seelig, W.N. and J.P. Ahrens, *Estimation of wave reflection and energy dissipation coefficients for beaches, revetments, and breakwaters*. 1981, Coastal Engineering Research Center Fort Belvoir VA.
86. Mansard, E.P. and E. Funke, *The measurement of incident and reflected spectra using a least squares method*, in *Coastal Engineering 1980*. 1980. p. 154-172.
87. Fernández-Mora, A., D. Calvete, A. Falqués, and H.E. de Swart, *Onshore sandbar migration in the surf zone: New insights into the wave-induced sediment transport mechanisms*. Geophysical research letters, 2015. **42**(8): p. 2869-2877.
88. Berni, C., E. Barthélemy, and H. Michallet, *Surf zone cross-shore boundary layer velocity asymmetry and skewness: An experimental study on a mobile bed*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2013. **118**(4): p. 2188-2200.

89. Brinkkemper, J., *Modeling the cross-shore evolution of asymmetry and skewness of surface gravity waves propagating over a natural intertidal sandbar*. 2013.
90. Gao, J.-l., J. Lyu, J.-h. Wang, J. Zhang, Q. Liu, J. Zang, and T. Zou, *Study on Transient Gap Resonance with Consideration of the Motion of Floating Body*. China Ocean Engineering, 2022. **36**(6): p. 994-1006.
91. Gao, J., Z. He, X. Huang, Q. Liu, J. Zang, and G. Wang, *Effects of free heave motion on wave resonance inside a narrow gap between two boxes under wave actions*. Ocean Engineering, 2021. **224**: p. 108753.
92. Qu, S., S. Liu, M.C. Ong, X. Wang, and S. Sun, *Numerical simulation of free-surface waves past semi-submerged two-dimensional rectangular prisms with different aspect ratios and rounding chamfer radii*. Ocean Engineering, 2023. **269**: p. 113604.
93. Palm, J., C. Eskilsson, G.M. Paredes, and L. Bergdahl, *Coupled mooring analysis for floating wave energy converters using CFD: Formulation and validation*. International Journal of Marine Energy, 2016. **16**: p. 83-99.
94. Wang, K., X. Ma, W. Bai, Z. Lin, and Y. Li, *Numerical simulation of water entry of a symmetric/asymmetric wedge into waves using OpenFOAM*. Ocean Engineering, 2021. **227**: p. 108923.
95. Loh, T.T., D. Pizer, D. Simmonds, A. Kyte, and D. Greaves, *Simulation and analysis of wave-structure interactions for a semi-immersed horizontal cylinder*. Ocean Engineering, 2018. **147**: p. 676-689.
96. Diaz-Maya, M., M. Ulloa, and R. Silva, *Assessing wave energy converters in the gulf of Mexico using a multi-criteria approach*. Frontiers in Energy Research, 2022. **10**: p. 929625.
97. Dai, J., C.M. Wang, T. Utsunomiya, and W. Duan, *Review of recent research and developments on floating breakwaters*. Ocean Engineering, 2018. **158**: p. 132-151.

98. Hu, Z.Z., D. Greaves, and A. Raby, *Numerical wave tank study of extreme waves and wave-structure interaction using OpenFoam®*. Ocean Engineering, 2016. **126**: p. 329-342.
99. Elgar, S., R. Guza, and M. Freilich, *Eulerian measurements of horizontal accelerations in shoaling gravity waves*. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1988. **93**(C8): p. 9261-9269.
100. Al Shami, E., R. Zhang, and X. Wang, *Point absorber wave energy harvesters: A review of recent developments*. Energies, 2018. **12**(1): p. 47.
101. Loukili, M., D. Dutykh, C. Nadjib, D. Ning, and K. Kotrasova, *Analytical and Numerical Investigations Applied to Study the Reflections and Transmissions of a Rectangular Breakwater Placed at the Bottom of a Wave Tank*. Geosciences, 2021. **11**(10): p. 430.
102. Ozkop, E. and I.H. Altas, *Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **67**: p. 106-115.

ANEXOS

Anexo A. Mapa de distribución global de la potencia media anual del oleaje

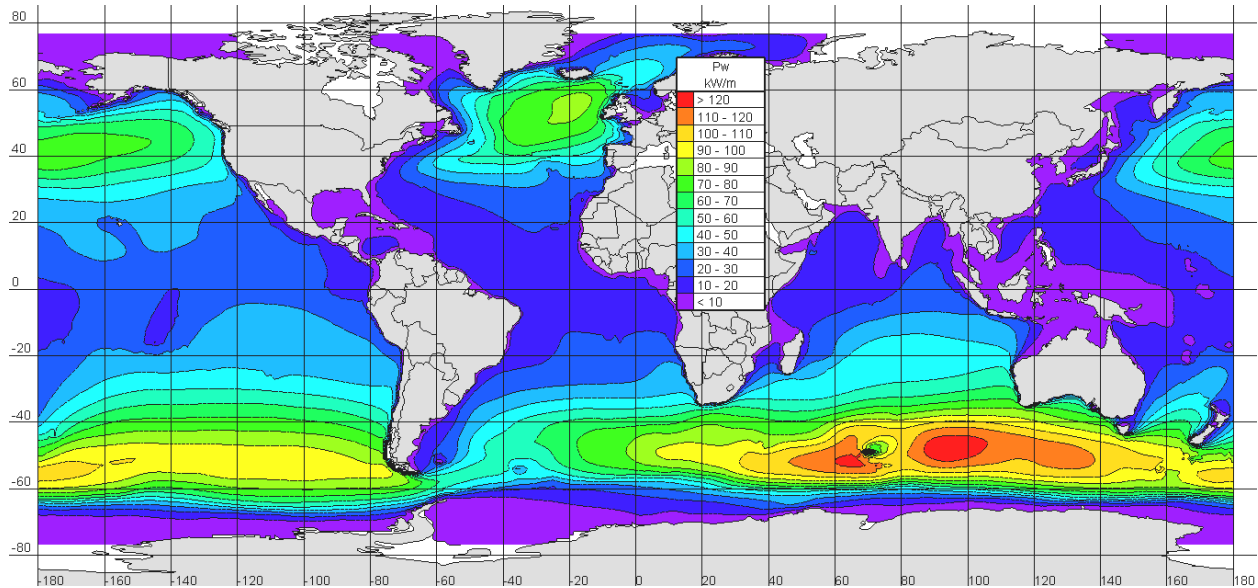


Figura 34. Distribución global de la potencia media anual del oleaje [48].

Anexo B. Captura del programa ParaView durante el análisis de simulación.

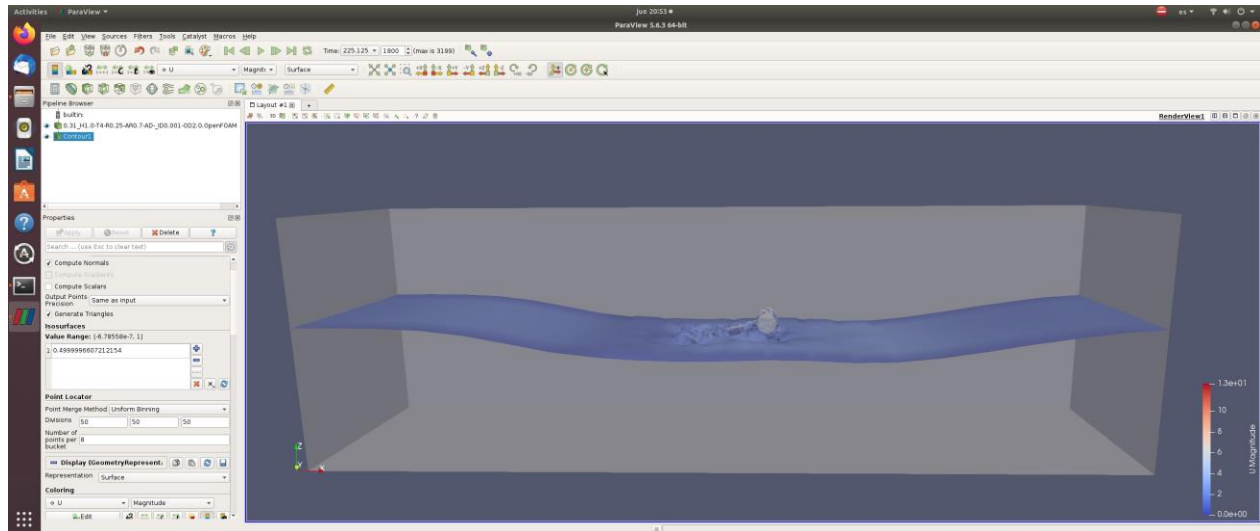


Figura 35. Captura de pantalla durante el análisis de simulación en OpenFOAM y visualización en ParaView.

Anexo C. Archivos de ejemplo de la simulación para boya en oleaje regular ($R = 0.25 m$, $T = 4 s$ y $H = 1 m$).

- Archivo: *waveProperties*

```

/*-----
*\
|=====|
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: v1912
| \ \ / A n d | Website: www.openfoam.com
| \ \ / M a n i p u l a t i o n |
|-----
*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       waveProperties;
}
// *****
//
inlet
{
    alpha          alpha.water;
    waveModel      StokesI;
    nPaddle        1;
    waveHeight     1;
    waveAngle      0.0;
    rampTime       4.0;
    activeAbsorption yes;
    wavePeriod     4.0;
}
outlet
{
    alpha          alpha.water;
    waveModel      shallowWaterAbsorption;
    nPaddle        1;
}
// *****
//

```

- Archivo: dynamicMeshDict

```

/*-----*- C++ -*-----
*\
|=====|
| \ \ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox
| \ \ / O p e r a t i o n | Version: plus
| \ \ / A n d | Web: www.OpenFOAM.com
| \ \ / M a n i p u l a t i o n |
|-----*\
*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       motionProperties;
}
// * * * * *
//
dynamicFvMesh      dynamicMotionSolverFvMesh;
motionSolverLibs   ("libsixDoFRigidBodyMotion.so");
motionSolver       sixDoFRigidBodyMotion;
sixDoFRigidBodyMotionCoeffs
{
    patches          (Buoy);
    innerDistance    0.001;
    outerDistance    2.0;
    centreOfMass     (0.913319 0 0.244723); //
    //Total mass
    // mass          #calc "$mass1 + $mass2"; //masa total
    //moment of inertia about the centre of mass */
    // dimensions
    R                0.25; //Radio de la Boya
    d                0.15; // distancia del CG al brazo a
    L1               1.0; //Longitud de la boya
    L2               2.0; //Longitud de los brazos (2*Lb)
    pi               3.141592654;
    rArm             0.03; //radio del brazo de la boya
    rhoB             181.4366351; //kg/m3 -Densidad del material
    mass1            #calc "$rhoB*$pi*$R*$R*$L1"; //
    mass2            #calc "$rhoB*$pi*$rArm*$rArm*($L2-$R)"; //kg cada brazo --
    Restar la masa que entra en el la boya
    VolB            0.207659; //Volumen de la Boya
    // mass          #calc "$mass1 + 2*$mass2"; //masa total
    mass            #calc "$rhoB*$VolB";
    //moment of inertia about the centre of mass
    momentOfInertia #codeStream
    {
        codeInclude
        #{
            #include "diagTensor.H"
        #};
    }
}

```

```

code
  #{
    scalar sqrR = sqr($R);
    scalar sqrd = sqr($d);
    scalar sqrL1 = sqr($L1);
    scalar sqrL2 = sqr($L2);

    os <<
1*diagTensor($mass1*(3*sqrR+sqrL1)/12+(2/3)*$mass2*(sqrL2+sqrd),
$mass1*sqrR/2 +(2/3)*$mass2*sqrL2, $mass1*(3*sqrR + sqrL1)/12 +
2*$mass2*sqrd);
    #};
  };
report on;
accelerationRelaxation 0.7;
//accelerationDamping 0.75;
solver
{
  type Newmark;
}
constraints
{
  fixedPoint
  {
    sixDoFRigidBodyMotionConstraint point;
    centreOfRotation (0 0 0);
  }
fixedAxis
  {
    sixDoFRigidBodyMotionConstraint axis;
    axis (0 1 0);
  }
}
}
// *****
//

```

Anexo D. Código para la depuración de datos obtenidos en la simulación (*Phyton*).

```
import os
import itertools
files = folders = 0
print("Type path, e.g. : /home/termolab2016/OpenFOAM/termolab2016-
v1806/run/1_Grado-y")
dir_name = input("")
for _, dirnames, filenames in os.walk(dir_name):
    numfolders = len([f for f in os.listdir(dir_name) if
os.path.isdir(os.path.join(dir_name, f)) and f[0] != '.'])
    Name_All_folders = ([f for f in os.listdir(dir_name) if
os.path.isdir(os.path.join(dir_name, f)) and f[0] != '.'])
print ( "visible Folders number: ", numfolders)
dt = 0.125
Redondeo = 3 ####
Folder_Inicio = 0
TimeStep = 0
ContA = 0
TimeFolders = "["
for FN in range(numfolders):
    for FolderN in Name_All_folders:
        TimeStepDum = round(TimeStep,Redondeo)
        if TimeStepDum == int(TimeStepDum):
            TimeFolders += FolderN + "',''"
            ContA = ContA + 1
            TimeStep += dt
            FolderN += FolderN
        if FolderN == str(TimeStepDum):
            TimeFolders += FolderN + "',''"
            ContA = ContA + 1
            TimeStep += dt
            FolderN += FolderN
TimeFolders = TimeFolders[:len(TimeFolders)-2] + "]" + '\n'
print ('There are: ' ,ContA , ' time folders to read!' )
import os
FileToFrite = os.path.split(os.getcwd())[1] + "_TIME_FOLDER.csv"
with open(FileToFrite, 'w') as Newfile: #Create File
Header="Time,centreOfRotation_X,centreOfRotation_Y,centreOfRotation_Z,Orient_X
1,Orient_Y1,Orient_Z1,Orient_X2,Orient_Y2,Orient_Z2,Orient_X3,Orient_Y3,Orient
_Z3,Vel_X,Vel_Y,Vel_Z,Acc_X,Acc_Y,Acc_Z,AngMom_X,AngMom_Y,AngMom_Z,Torque_X,To
rque_Y,Torque_Z\n"
Newfile.write(Header)
countFor = 0
CountFile = 0
for countFor in range(0,ContA-1):
    countFor = countFor +1
    CountFile = CountFile + dt
    OpenTimeFile = round(CountFile,Redondeo)
    if OpenTimeFile == int(OpenTimeFile):
        OpenTimeFile = int(OpenTimeFile)
        file = open(str(dir_name) +
'/' +str(OpenTimeFile)+"/uniform/sixDoFRigidBodyMotionState", 'r'); #Read File
        print(str(file)+'\n')
        lines = file.readlines()
        file.close()
def main():
```

```

countCofR = 0
countOrient = 0
countVel = 0
countAcc = 0
countAngMom = 0
countTorque = 0
AV= str(OpenTimeFile) + "," #Agregar Time
for line in lines:
    line = line.strip()
    if line.find("centreOfRotation")!=-1:
        a = line.find("(")
        b = line.find(")")
        line1 = line.replace(" ", ",")
        countCofR += countCofR
        AV += str(line1[a+2:b-1]+",")
    if line.find("orientation")!=-1:
        c = line.find("(")
        d = line.find(")")
        line2 = line.replace(" ", ",")
        countOrient += countOrient
        AV += str(line2[c+2:d-1]+",")
    if line.find("velocity")!=-1:
        e = line.find("(")
        f = line.find(")")
        line3 = line.replace(" ", ",")
        countVel += countVel
        AV += str(line3[e+2:f-1]+",")
    if line.find("acceleration")!=-1:
        g = line.find("(")
        h = line.find(")")
        line4 = line.replace(" ", ",")
        countAcc+= countAcc
        AV += str(line4[g+2:h-1]+",")
    if line.find("angularMomentum")!=-1:
        i = line.find("(")
        j = line.find(")")
        line5 = line.replace(" ", ",")
        countAngMom += countAngMom
        AV += str(line5[i+2:j-1]+",")
    if line.find("torque")!=-1:
        k = line.find("(")
        l = line.find(")")
        line6 = line.replace(" ", ",")
        countTorque += countTorque
        AV += str(line6[k+2:l-1])
        AV += "\n"
# Save Results in File
Newfile.write(AV)
print("centreOfRotation: ",countCofR)
print("orientation: ",countOrient)
print("velocity: ",countVel)
print("acceleration: ",countAcc)
print("angularMomentum: ",countAngMom)
print("torque: ",countTorque)
print(AV)
print('Saved it in: ' , str(Newfile) +'\n')
main()

```

Anexo E. Imágenes del dispositivo CEO escala 1:20.



Figura 36. Dispositivo CEO en la etapa de modificaciones.



Figura 37. Dispositivo CEO en una prueba de campo (Telchac, Yucatán, México).

