

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería de Biosistemas

Diseño y evaluación de un modelo hidráulico a escala para captación de energía undimotriz en la costa del Pacífico de Costa Rica

Proyecto de Graduación presentado como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas

Alonso David Mata Quesada

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

San José, Costa Rica

2023

Hoja de aprobación

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad de Costa Rica como requisito para optar al grado y título de la Licenciatura en Ingeniería Agrícola y de Biosistemas.



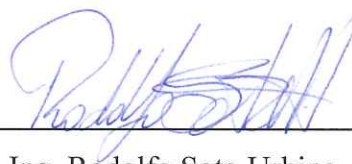
Alonso David Mata Quesada
Estudiante



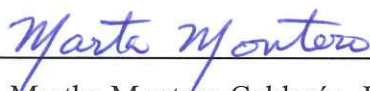
Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph.D.
Director



Ing. Felipe Calleja Apéstegui, Ph.D.
Asesor del proyecto



Ing. Rodolfo Soto Urbina, Mag.
Asesor del proyecto



Ing. Martha Montero Calderón, Ph.D.
Presidente tribunal examinador



Ing. Pedro Casanova Treto, D.Sc.
Miembro tribunal examinador

A mi padre, madre y abuela

Agradecimientos

Agradezco especialmente a mi padre, Pedro, quien ha hecho un esfuerzo inimaginable por darme las condiciones necesarias para poder llegar a este momento cumbre de mi vida, y por darme su amor y apoyo diario. A mi abuelita, Olga, por toda su atención, cuidado y amor, y por estar siempre pendiente de que tuviera todo lo necesario para seguir. A mi madre, Rosemary, mi pilar y mi luz, quien siempre ha estado conmigo y es imprescindible en cada aspecto de mi vida. A mi hermano, tía y tíos; Fabián, Martha, Luis Alejandro y Franklin, quienes me apoyaron y motivaron a seguir adelante. A mis sobrinos, Gabriel y Julián, quienes tantas veces me recuerdan la importancia de disfrutar lo simple. A mis mejores amigos y amigas, incondicionales e imprescindibles; Andrés Pacheco, Luis Arrieta, Ignacio Gómez, Julián Rodríguez, Diego Rivera, Angélica Zamora, Ana Sandí, Gabriel Alfaro, Jimena Santamaría y Carolina Carvajal.

Además, quiero agradecer al profesor Georges Govaere por darme la oportunidad y confianza de realizar este proyecto en un laboratorio tan importante como lo es el iMARES, y por todos sus aportes para esta investigación. A Diego Cornejo y Ronald Víquez, del iMARES, por brindarme apoyo durante cada etapa del proyecto. A Eduardo y Esteban, del taller de Ingeniería Mecánica, quienes me ayudaron durante un largo tiempo con la parte constructiva del modelo. También quiero agradecer a los profesores Felipe Calleja y Rodolfo Soto, por sus consejos para hacer un mejor proyecto.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad de Costa Rica, institución que guardaré en mi corazón con mucho cariño, por todas las facilidades brindadas para estudiar, porque allí aprendí mucho más que ingeniería, crecí como persona y conocí a muchas de las personas más importantes de mi vida.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación está financiada por un ente externo ya que forma parte de una serie de proyectos internacionales para desarrollar en el Instituto de Investigación en Ingeniería [INII]. Este es el proyecto 731C0505 y su nombre es "LABORATORY TESTING AND KNOWLEDGE TRANSFER FOR THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE STRATEGIES FOR MARINE ENERGY HARVESTING" PRUEBAS DE LABORATORIO Y TRANSFERENCIA DE 26 CONOCIMIENTO PARA EL DESARROLLO DE ESTRATEGIAS SOSTENIBLES PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA MARINA (SUSME) ERANET17/ERY-0222.

RESUMEN

Los combustibles fósiles son un recurso finito y representan una de las principales causas de generación gases de efecto invernadero, por lo que seguir dependiendo de estos para la producción de energía no es recomendable. La energía undimotriz es renovable y, en Costa Rica, es un recurso aprovechable gracias al amplio territorio marítimo y características climáticas. En esta investigación se identifica un tipo de dispositivo que se adapte a las condiciones de oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica, realizando una revisión bibliográfica y analizando bases de datos de oleaje, donde se encuentra que, en la zona de estudio, las velocidades horizontales de las olas son predominantes, y estas velocidades se mantienen muy constantes aun cuando aumenta la profundidad. Una vez identificado el tipo de dispositivo que se considera más conveniente, se diseña un modelo a escala para ser construido y probado preliminarmente, de forma que puedan identificarse cambios a realizar antes de las pruebas finales. En las pruebas preliminares se identifican comportamientos no deseados en el funcionamiento del modelo, por lo que se decide aumentar la rigidez del mismo y cambiar el objeto flotador. Una vez finalizada la construcción del modelo, este es sometido a pruebas en un tanque generador de olas, donde se evalúa bajo distintos escenarios de oleaje regular e irregular para luego medir su potencial energético. En estas pruebas se encontró que el dispositivo capta más energía bajo el efecto de oleajes con combinaciones de período y altura mayores, aunque en general, las eficiencias obtenidas, se consideran bajas. Las pruebas de oleaje irregular demostraron que, su eficiencia, a pesar de considerarse baja, es mayor que la mostrada durante las pruebas de oleaje regular, por lo que esto resalta un punto importante de la investigación, siendo oleajes irregulares a los que el dispositivo sería sometido en un escenario real.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. <i>Objetivos</i>	3
1.1.1. <i>Objetivo general</i>	3
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. <i>Fundamentos teóricos</i>	4
2.1.1. <i>Mecánica de ondas</i>	4
2.1.1.1. <i>Teoría lineal de ondas</i>	5
2.1.1.2. <i>Dispersión del oleaje</i>	7
2.1.1.3. <i>Componentes de velocidad de las partículas de agua</i>	8
2.1.1.4. <i>Desplazamiento de las partículas de agua</i>	9
2.1.2. <i>Estadística de ondas</i>	9
2.1.3. <i>Modelos espectrales de un estado de mar</i>	11
2.1.3.1. <i>Espectro JONSWAP</i>	12
2.1.4. <i>Energía del oleaje</i>	13
2.1.5. <i>Ambiente marino y sus recursos energéticos</i>	13
2.1.6. <i>Energía de amplitud de marea</i>	14
2.1.7. <i>Energía de corrientes de marea</i>	14
2.1.8. <i>Energía de corrientes oceánicas</i>	14
2.1.9. <i>Conversión de energía térmica oceánica</i>	14
2.1.10. <i>Gradientes de salinidad</i>	15
2.1.11. <i>Energía Undimotriz</i>	15
2.1.12. <i>Dispositivos para captación de energía undimotriz</i>	15
2.1.12.1. <i>Columnas de agua oscilante</i>	17
2.1.12.2. <i>Cuerpos oscilantes</i>	17
2.1.12.3. <i>Estructuras de desbordamiento</i>	20
2.1.13. <i>Introducción al modelado físico</i>	21
2.1.13.1. <i>Semejanza geométrica</i>	21
2.1.13.2. <i>Semejanza cinemática</i>	21
2.1.13.3. <i>Semejanza dinámica</i>	21
2.2. <i>Antecedentes</i>	22

2.2.2. Energía undimotriz en el mundo	22
3. METODOLOGÍA	27
3.1. Identificación del dispositivo adecuado	27
3.3. Diseño y construcción del dispositivo elegido	28
3.4. Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del dispositivo	29
4. RESULTADOS	31
4.1. Descripción del oleaje en la costa del Pacífico de Costa Rica.....	31
4.2. Selección del tipo de dispositivo para captación de energía undimotriz.....	35
4.3. Diseño del dispositivo para captación de energía undimotriz.....	36
4.4. Cambios realizados en el diseño dispositivo para captación de energía undimotriz....	44
4.5. Pruebas de oleaje regular	49
4.6. Pruebas de oleaje irregular	50
4.7. Determinación de la constante k_r de la liga utilizada.....	51
4.8. Comportamiento general de movimiento del flap en oleaje regular	51
4.9. Determinación del estiramiento x_l de la liga	55
4.10. Determinación del potencial energético aprovechado por el flap en oleaje regular	56
4.11. Comportamiento general de movimiento del flap bajo oleaje irregular	58
4.12. Determinación del potencial energético aprovechado por el flap en oleaje irregular .	59
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	61
5.1. Conclusiones	61
5.2. Recomendaciones	62
6. REFERENCIAS	63
APÉNDICES	67
Apéndice A. Construcción del modelo de dispositivo para captación de energía undimotriz..	67

Índice de figuras

Figura 1 Parámetros que definen el oleaje. NMM: nivel medio. H: altura de onda. T: período de onda. η : desplazamiento de la superficie libre, a: amplitud de onda, t: tiempo.	4
Figura 2 Velocidades horizontales y verticales de una ola.....	8
Figura 3 Trayectoria de las partículas de agua.....	9
Figura 4 Registro temporal de oleaje.....	10
Figura 5 Clasificación de los dispositivos para captación de energía undimotriz.....	16
Figura 6 Columna de agua oscilante.....	17
Figura 7 Cuerpo oscilante de movimiento vertical.....	18
Figura 8 Dispositivo vertical de dos cuerpos oscilantes.....	18
Figura 9 Cuerpo oscilante con movimiento de “cabeceo”.....	19
Figura 10 Cuerpo oscilante tipo flap.....	20
Figura 11 Estructura de desbordamiento.....	20
Figura 12 Dispositivo PowerBuoy.....	22
Figura 13 Dispositivo Wavepiston.....	23
Figura 14 Dispositivo diseñado por la empresa Jupiter Hydro.....	24
Figura 15 Dispositivo WaveRoller.....	25
Figura 16 Dispositivo Weptos.....	25
Figura 17 Esquema de la metodología para el objetivo 1.....	27
Figura 18 Esquema de la metodología para el objetivo 2.....	28
Figura 19 Esquema de la metodología para el objetivo 3.....	29
Figura 20 Espectro de energía tipo 2.....	31
Figura 21 Función de distribución acumulada de períodos pico en la costa del Pacífico de Costa Rica.....	32
Figura 22 Altura significativa de ola de espectros de oleaje en la costa del Pacífico de Costa Rica.....	32
Figura 23 Velocidades horizontales experimentadas en $x=0$	34
Figura 24 Velocidades verticales experimentadas en $x=L/4$	34
Figura 25 Dibujo inicial de vista superior de ejemplo de mecanismo a evitar.....	36
Figura 26 Dibujo inicial de vista superior de mecanismo deseado.....	37
Figura 27 Dimensiones del flap en m.....	38
Figura 28 Estructura de soporte para el modelo.....	39
Figura 29 Diseño de platinas idénticas soldadas a tubo vertical.....	40
Figura 30 Diseño de collarines y tubo para transmisión de movimiento rotacional.....	41
Figura 31 Tubos horizontales unidos mediante tee roscada.....	42
Figura 32 Configuración de la articulación.....	42
Figura 33 Diseño de estructura final.....	43
Figura 34 Parte trasera del punto de sostén entre el tubo y el flap.....	43
Figura 35 Configuración del marco del flap.....	44
Figura 36 Composición inicial del flap.....	45
Figura 37 Cambios realizados al marco del flap.....	46
Figura 38 Soldadura de angulares largos en medio del flap.....	46

Figura 39	<i>Angulares pequeños soldados en la parte superior del flap</i>	47
Figura 40	<i>Flap con los cambios de rigidez y flotabilidad realizados</i>	48
Figura 41	<i>Configuración de ligas para funcionamiento adecuado del flap</i>	49
Figura 42	<i>Variación de distancia para $T_P=3,82$ s y $H_{m0}=11,5$ cm según repetición</i>	52
Figura 43	<i>Distancias alcanzadas por el flap bajo distintos tipos de oleaje.</i>	54
Figura 44	<i>Determinación de estiramiento x_l de la liga</i>	56
Figura 45	<i>Distancia recorrida por el flap en las distintas repeticiones de oleaje irregular.</i>	58
Figura 46	<i>Agujeros en platina de hierro negro</i>	67
Figura 47	<i>Soldadura entre tubo de hierro galvanizado y lámina de hierro negro</i>	68
Figura 48	<i>Eliminación de la rosca en las uniones que serán utilizadas como collarines</i>	69
Figura 49	<i>Soldadura entre tubo y collarín</i>	70
Figura 50	<i>Agujeros en collarines</i>	71
Figura 51	<i>Rosca en collarines para entrada de tornillos</i>	71

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Combinaciones de altura y períodos de oleaje seleccionado</i>	50
Tabla 2 <i>Parámetros para oleaje irregular tipo “JONSWAP”</i>	50
Tabla 3 <i>Distancia promedio recorrida por el flap en cada repetición de oleaje regular.</i>	53
Tabla 4 <i>Promedio de potencial energético aprovechado para cada oleaje regular (escala prototipo).</i>	57
Tabla 5 <i>Distancia promedio recorrida por el flap en cada repetición de oleaje irregular</i>	58
Tabla 6 <i>Promedio de potencial energético aprovechado para cada oleaje irregular (escala prototipo).</i>	59

Lista de variables

C: celeridad de onda (m/s)

F: fuerza (N)

H: altura de ola (m)

\bar{H} : altura de ola media (m)

H_{rms} : altura de ola cuadrática media (m)

$H_{1/2}$: altura de ola un medio (m)

$H_{1/3}$, H_s : altura de ola un tercio o significativo (m)

H_{m0} : altura de ola asociada al momento de orden cero en un espectro (m)

J_r : energía total para oleaje regular por unidad de ancho (W)

J_{ir} : energía total para oleaje irregular por unidad de ancho (W)

L: longitud (m)

L_o : longitud de onda (m)

N: número de olas individuales

S: densidad energética espectral (m^2/s)

T: período de ola (s)

\bar{T} : período de ola medio (s)

$T_{1/2}$: período de ola un medio (s)

$T_{1/3}$: período de ola un tercio (s)

T_p : período pico (s)

U_{10} : velocidad del viento a 10 m sobre la superficie (m/s)

W: trabajo mecánico (J)

d: distancia (m)

f : frecuencia cíclica (Hz)

f_p : frecuencia pico del espectro (Hz)

g : gravedad (m/s^2)

h : profundidad (m)

k : número de onda (1/m)

k_r : constante de la liga (N/m)

p : presión (Pa)

t : tiempo (s)

x : distancia a la que se ubica un punto de la onda (m)

x_f : fetch (m)

x_l : estiramiento de la liga (m)

u : velocidad horizontal (m/s)

w : velocidad vertical (m/s)

ω : frecuencia angular (1/s)

ε : peralte de onda (m/s)

δ : altura relativa de onda

μ : profundidad relativa (m)

ρ : densidad (kg/m^3)

ϕ : función potencial

ϕ_{PM} : factor de forma de Pierson-Moskowitz

ϕ_J : factor de forma del espectro JONSWAP

σ_A : ancho de base del espectro antes de la frecuencia pico

σ_B : ancho de base después de la frecuencia pico

α : factor de escala asociado a la energía total del espectro

η : desplazamiento de superficie libre (m)

ζ : desplazamiento horizontal de las partículas de agua (m)

ξ : desplazamiento vertical de las partículas de agua (m)

γ : factor de forma pico del espectro

λ : factor de escala

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles son un recurso finito, por lo que no se puede seguir dependiendo de estos para la producción de energía, debido a que la población mundial sigue creciendo, y con ella, el consumo de energía total (MacKay, 2016). Además, el consumo de combustibles fósiles para la producción de energía es una de las principales causas de generación de gases de efecto invernadero, lo que contribuye significativamente al cambio climático (Moomaw y Yamba, 2011). La concentración de CO₂ en la atmósfera continúa creciendo conforme pasan los años, por lo que es pertinente tomar medidas que ayuden a disminuir significativamente las emisiones de este gas (MacKay, 2016). Todas estas razones incentivan a buscar alternativas energéticas renovables que permitan suplir la demanda requerida y, además, brinden seguridad energética.

Existen seis tipos de energía renovable identificados por el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC): bioenergía, energía marina, energía geotérmica, energía hidroeléctrica, energía eólica y energía solar, siendo estas tres últimas las más utilizadas globalmente (Moomaw y Yamba, 2011). La energía marina es la menos utilizada de las anteriormente mencionadas, y proviene de seis distintas fuentes: olas (también conocida como energía undimotriz), cambios de nivel de agua por marea (actualmente la más utilizada), corrientes de marea, corrientes oceánicas, gradientes de salinidad y conversión de energía térmica oceánica (Lewis y Estefen, 2012).

Según Lewis y Estefen (2012), a excepción de la energía obtenida a partir de cambios de nivel de agua por marea, todas las tecnologías para energía marina están en etapas de investigación y desarrollo, como prototipo comercial, o en etapa de demostración. Mientras que lo reportado por la Agencia Internacional de Energía [IEA, por sus siglas en inglés] (2020), indica que la generación de electricidad a partir de fuentes marinas creció en un 13% para el 2019, pero esta sigue estando en procesos de desarrollo.

No obstante, los autores Lewis y Estefen (2012) y la IEA (2020) también mencionan que la alta densidad energética que presentan las distintas fuentes de energía marina, hace que esta tenga el potencial para aportar una contribución significativa al suministro de energía global y, por tanto, a la mitigación del cambio climático. Incluso, se estima mediante su potencial teórico, que la energía aportada por el océano supera con creces la demanda energética requerida actual por la humanidad. Es por esto que, globalmente, se han empezado a desarrollar programas que ayuden a mejorar la comprensión de los ambientes marinos de alta energía, y políticas que aceleren el proceso de implementación de las tecnologías para dichos ambientes (Shields, 2014).

Debido a lo anterior, es necesario el desarrollo de dispositivos tecnológicos que permitan convertir la energía del oleaje en energía aprovechable. No obstante, se requiere que estos dispositivos se ajusten a las condiciones ambientales del lugar donde se deseen implementar, tomando en cuenta las variaciones del oleaje según la época del año, la profundidad del agua y la distancia desde la costa (Nerzic y Mazé, 2012).

Los dispositivos utilizados para captar energía undimotriz pueden clasificarse de acuerdo a la conversión hidro-mecánica utilizada por las máquinas. Entre estos, se distinguen varios tipos de aparatos que funcionan bajo tres distintos principios de conversión (Falcão, 2009):

- Dispositivos de rebosamiento (funcionan con turbinas hidráulicas)
- Columna de agua oscilante (OWC, por sus siglas en inglés) (funciona con turbinas de aire)
- Cuerpos oscilantes sobre o bajo la superficie (funcionan con motores hidráulicos, turbinas hidráulicas o un generador eléctrico lineal)

La información en cuanto al desarrollo de dispositivos que aprovechen la energía undimotriz en Costa Rica es escasa. Sin embargo, se han realizado estudios para determinar las características del oleaje en Costa Rica y, también, el potencial teórico y técnico del oleaje, que corresponden al potencial energético que podría generarse a partir de las olas.

Brito (2013) realizó un estudio para determinar el potencial técnico del oleaje, en Costa Rica, en el Mar Caribe y el Océano Pacífico. En este estudio se reporta un potencial técnico de 17,6 TWh/año, lo que supera la energía obtenida a partir de todas las fuentes renovables en conjunto en Costa Rica durante el 2020, siendo la producción energética en el país de 11,02 TWh (Centro Nacional de Control de Energía [CENCE] e Instituto Costarricense de Electricidad [ICE], 2021). Esto dimensiona la cantidad de energía que está siendo subutilizada en el país, y destaca la importancia de aprovechar esta energía con el fin de aumentar la matriz eléctrica del país.

Específicamente para la costa del Pacífico, Zumbado (2021), determinó el potencial de energía para la costa Pacífico norte de Costa Rica. En esta, se obtuvieron valores de 7,5 kW/m a 12,5 kW/m, para un promedio de 8,5 kW/m, siendo la unidad de metros correspondiente al frente de ola.

La energía undimotriz presenta pocos cambios estacionales, esto porque el oleaje en Costa Rica es muy constante, lo que representa una ventaja sobre el resto de fuentes de energía utilizadas en el país, que varían considerablemente según los cambios en el clima (Brito, 2013). Además de esto, el territorio marítimo de Costa Rica abarca el 91,4% del territorio total (Centro Nacional de Información Geoambiental [CENIGA], 2020), por lo que se evidencia que es un recurso en potencia que podría contribuir significativamente a la matriz energética nacional. Incluso, se estima que el potencial energético extraíble de esta fuente es igual al de la energía hidroeléctrica, eólica y geotérmica combinadas (Govaere et. al., 2020).

Integrando los estudios sobre las características y el potencial del oleaje en Costa Rica, pueden desarrollarse investigaciones en torno al diseño y la construcción de dispositivos que aprovechen la energía undimotriz. Esto es de gran importancia, ya que, a pesar de que actualmente en el país no se esté aprovechando esta fuente de energía, es probable que en un futuro cercano se empiece a incursionar en este tipo de tecnologías (Garza, 2020), lo que hace necesario que existan investigaciones que aporten información en el avance de las aplicaciones de esta energía con un alto potencial en Costa Rica.

Al estar este tipo de tecnologías, en su mayoría, en etapas de desarrollo, permiten que la investigación relacionada a estos dispositivos, sus distintas configuraciones y principios de funcionamiento, se siga diversificando y ampliando para buscar alternativas que funcionen adecuadamente según el oleaje al que deben adaptarse. Es por eso que en esta investigación se buscará diseñar y construir un dispositivo que se ajuste a las condiciones del oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica.

Con respecto al alcance de esta investigación, se realizó específicamente el diseño del dispositivo tipo “flap” y la estructura encargada de darle el movimiento deseado, es decir, no se realizaron análisis estructurales relacionados a la estructura que sostiene al dispositivo, esta solamente fue construida e implementada en el laboratorio según las condiciones existentes en el lugar de trabajo, de forma que el dispositivo se mantenga fijo en la posición deseada. Además, no realizaron estudios de propagación del oleaje; esos estudios ya fueron realizados por Zumbado (2021), Govaere et al. (2020), Brito (2013) y Corrales (2019). Tampoco se realizaron simulaciones computacionales para el diseño de este dispositivo, ya que este fue un trabajo experimental de laboratorio, lo que permite obtener resultados más fiables de acuerdo a las condiciones sometidas. Los programas computacionales para modelar este tipo de fenómenos presentan algunas limitaciones, como su incapacidad para modelar oscilaciones de ola de gran amplitud (Falcão, 2009). Además, estos simplifican los escenarios con el fin de poder realizar la simulación, por lo que muchas veces no se realiza una buena predicción del comportamiento real.

Se describió, de manera general, el oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica, de forma que pudieron identificarse sus características más importantes, tales como altura, período y velocidades experimentadas, para así determinar las cualidades principales que debe tener un dispositivo para captación de energía undimotriz en esta zona. Una vez identificadas estas características, se diseñó y construyó el dispositivo, tomando en cuenta la disponibilidad de materiales y equipos, para finalmente evaluar el modelo bajo diversas condiciones de oleaje típicas identificadas en la costa del Pacífico de Costa Rica.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar el desempeño hidráulico de un modelo físico para captar energía undimotriz para las condiciones de la costa de Pacífico de Costa Rica.

1.1.2. Objetivos específicos

1. Identificar una tipología de dispositivo que se ajuste adecuadamente al oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica para la captación de energía undimotriz.
2. Realizar el diseño preliminar y la construcción de un modelo físico para captación de energía undimotriz para ensayar en un tanque de oleaje con condiciones controladas.
3. Evaluar el funcionamiento del modelo físico para captación de energía undimotriz bajo diversas condiciones de oleaje.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fundamentos teóricos

2.1.1. Mecánica de ondas

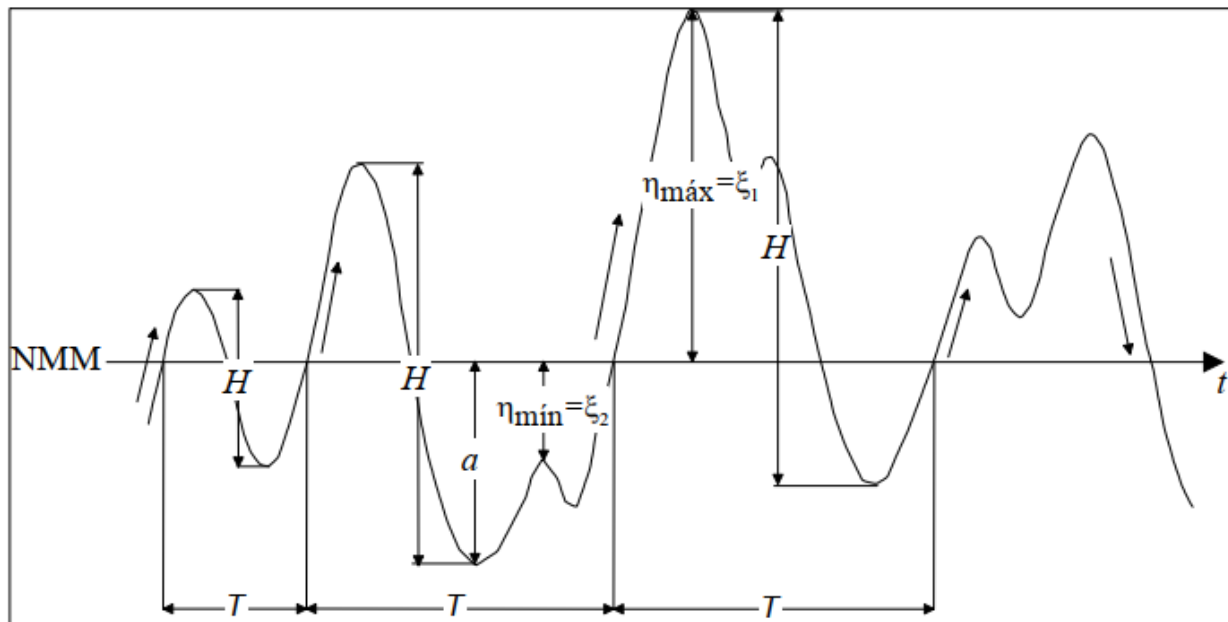
Las olas viajan durante varios días desde su formación, por lo que predecir la energía incidente sobre la costa es una tarea que puede realizarse con gran precisión. Esto gracias a que los programas actuales para simular la propagación de olas son muy exactos, y se cuenta con un período de tiempo de 5 a 10 días para realizar la predicción del oleaje (Govaere et al., 2020). La altura y el período de las olas depende de la cantidad de energía transferida, la cual es una función de la velocidad del viento, período de tiempo de incidencia del viento y la longitud del océano sobre el cual sopla el viento (Lewis y Estefen, 2012).

El oleaje es un fenómeno determinado por la acción de fuerzas naturales en la superficie libre del agua, siendo estas fuerzas las que condicionan el tipo de oleaje que se manifestará (Silva, 2005).

Si se considera un estado de mar ideal, es decir, conformado por ondas sinusoidales perfectas, con valles y crestas de idéntica forma, un período único y un movimiento orbital progresivo, es posible definir sus características generales más importantes (Silva, 2005). En la Figura 1 se muestran los parámetros más importantes de las ondas.

Figura 1

Parámetros que definen el oleaje. NMM: nivel medio. H: altura de onda. T: período de onda. η : desplazamiento de la superficie libre, a: amplitud de onda, t: tiempo.



Nota. Tomado de Silva, 2005

De acuerdo a la Figura 1, pueden definirse los siguientes conceptos (Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas [G.I.O.C.], 2000):

- Cresta: Parte más alta de una onda.
- Valle: Parte más baja de una onda
- Nivel medio (NMM): Nivel de referencia del fluido.
- Longitud de onda (L_o): Distancia horizontal entre dos crestas adyacentes.
- Altura de onda (H): Distancia vertical entre la cresta y el valle de una onda.
- Período de onda (T): Tiempo necesario para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto.
- Desplazamiento de la superficie libre (η): Desplazamiento vertical máximo o mínimo de la superficie del fluido con respecto a un nivel medio de referencia.
- Amplitud (a): Distancia vertical total entre una cresta o valle y el nivel medio.

A partir de las definiciones anteriores, es posible introducir otros parámetros de importancia para el tema, tales como (G.I.O.C., 2000):

- Número de onda:
$$k = \frac{2\pi}{L} \quad [1]$$

- Frecuencia angular:
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad [2]$$

- Frecuencia cíclica:
$$f = \frac{1}{T} \quad [3]$$

Además de estos parámetros, es importante definir otros parámetros adimensionales que permiten caracterizar la teoría lineal de ondas mediante algunas magnitudes como la altura de onda (H), profundidad (h) y longitud de onda (L_o). Los parámetros mencionados se definen a continuación (G.I.O.C., 2000):

- Peralte de onda:
$$\varepsilon = kH \text{ o } \frac{H}{L_o} \quad [4]$$

- Altura relativa de onda:
$$\delta = \frac{H}{h} \quad [5]$$

- Profundidad relativa:
$$\mu = \frac{h}{L_o} \quad [6]$$

2.1.1.1. Teoría lineal de ondas

También conocida como teoría de Airy, esta presenta una aproximación razonable de las características de las olas para un amplio rango de los parámetros de las mismas. Esta teoría es útil siempre que se cumplan las hipótesis de partida (López y Tinoco, 2014):

1. El agua es homogénea e incompresible; lo que implica que la densidad es constante,
2. La tensión superficial puede ser despreciada.
3. El efecto de Coriolis debido a la rotación de la tierra puede ser despreciado.
4. La presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante.
5. El agua de mar carece de viscosidad.
6. El flujo es irrotacional, no existe interacción del oleaje con ningún otro movimiento marino.

Según López y Tinoco (2014), de la primera hipótesis se extrae la conclusión de que las líneas de corriente de un fluido incompresible son paralelas. Esto se justifica a partir de la ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad [7]$$

donde ρ es la densidad y \vec{u} el vector de la velocidad.

Ahora, si el fluido es incompresible, la densidad es constante, y por lo tanto su derivada es cero, entonces la ecuación anterior se puede escribir como (López y Tinoco, 2014):

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad [8]$$

Esto quiere decir que la diferencia de la velocidad es nula, o lo que es lo mismo, que las líneas de flujo son paralelas, pero no significa que tengan que ser rectas (López y Tinoco, 2014).

La hipótesis de que el flujo es irrotacional implica que el campo correspondiente deriva de un potencial de velocidades, es decir, que puede escribirse para la velocidad horizontal (u) y vertical (w) las siguientes ecuaciones (López y Tinoco, 2014):

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} \quad w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} \quad [9]$$

Las ecuaciones previas implican que si se conoce el potencial $\phi(x, z, t)$ en todo el ámbito de estudio, se pueden conocer también las velocidades de las partículas (López y Tinoco, 2014).

La formulación de la teoría lineal se desarrolla comúnmente en términos de la función potencial ϕ . Esta corresponde con una perturbación de primer orden, $\phi = \varepsilon \phi_1$, en la que las condiciones de frontera tienen que cumplirse en $z = 0$, obteniéndose así que (López y Tinoco, 2014):

- El fondo es impermeable, no hay movimiento de agua a través de este, por lo tanto:

$$w = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -h \quad [10]$$

siendo h la profundidad máxima.

- El agua siempre está contenida dentro de su superficie, de forma que las partículas se mueven a la misma velocidad con que cambia de forma la superficie del mar.

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = w \quad \text{en } z = y \quad [11]$$

- En la superficie, la presión (p) se obtiene a través de la ecuación de Bernoulli como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz \quad [12]$$

- Se supone que la pendiente de la ola es pequeña ($H/L < 1$) y que la profundidad del agua es mucho mayor que la altura de ola ($h/H \gg 1$).

Las soluciones a este problema son asumidas como constantes en el tiempo y se obtienen por separación de variables, como se muestra a continuación (López y Tinoco, 2014):

$$\phi(t, x, z) = -\frac{Hg}{2 \cdot \omega} \cdot \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh(k \cdot h)} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad [13]$$

La correspondiente elevación de la superficie es:

$$y(t, x) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad [14]$$

donde la frecuencia $\omega(k)$ está determinada por la relación de dispersión:

$$\omega^2(k) = gk \tanh(kh); \text{ para } k = \frac{2\pi}{L} \quad [15]$$

2.1.1.2. Dispersión del oleaje

La velocidad con la que se propaga una onda es denominada celeridad y puede obtenerse mediante la siguiente ecuación:

$$C = \frac{L}{T} \quad [16]$$

La dispersión del oleaje es esencial para entender algunos comportamientos como el agrupamiento del oleaje y sus consecuencias. La ecuación de dispersión del oleaje relaciona la celeridad con la profundidad y la longitud de onda.

La ecuación se puede expresar en función de la celeridad, relacionando, a su vez, la longitud y el período, como se muestra a continuación:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_o}\right) \quad [17]$$

Observando la ecuación 17, puede notarse que entre más grande sea el período de una ola, más rápido viajará esta. La dispersión del oleaje conlleva el hecho de que las olas se separan en su proceso de propagación hacia la costa y estas se agrupan según sus períodos (López y Tinoco, 2014). Incluso, es conocido que las olas de mayor magnitud no se dan de forma individual, sino que suelen aparecer en “paquetes” de olas que poseen mayor energía (Silva, 2005).

De acuerdo al número de onda, k , la frecuencia angular ω , y la ecuación de dispersión, la longitud de onda puede escribirse como (López y Tinoco, 2014):

$$L_o = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_o}\right) = \frac{gt}{\omega} \tanh(kh) \quad [18]$$

Según la ecuación 18 se puede determinar que la longitud de onda es menor conforme aumenta la profundidad (López y Tinoco, 2014).

2.1.1.3. Componentes de velocidad de las partículas de agua

El conocimiento de la cinemática de las partículas de agua en una ola presenta gran utilidad, ya que puede utilizarse para calcular distintas variables, como las fuerzas que influyen sobre los cuerpos con los que interactúa. En una onda existen velocidades horizontales y verticales, las cuales tienen diferentes magnitudes según su posición en la onda (crestas, valles, nodos) en la que se encuentren (Dean y Dalrymple, 1991).

Las velocidades horizontales y verticales de las partículas están dadas por las ecuaciones 19 y 20 respectivamente.

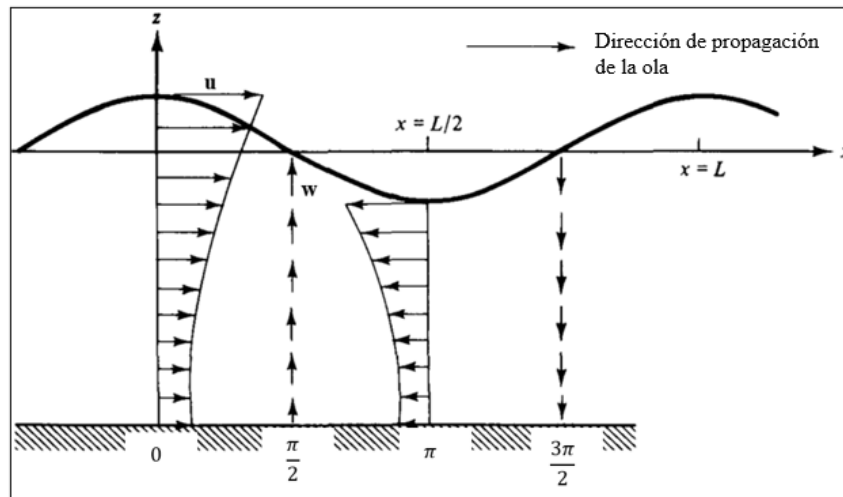
$$u = -\frac{H g k}{2\omega} \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad [19]$$

$$w = -\frac{H g k}{2\omega} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh kh} \cdot \sin(kx - \omega t) \quad [20]$$

La Figura 2 muestra de manera gráfica la forma en que se dan las velocidades horizontales y verticales en una ola, dándose velocidades horizontales, u , más altas en las crestas y los valles, mientras que las velocidades verticales, w , son predominantes cuando la ola interseca con el nivel medio. Además, se muestra que las velocidades horizontales y verticales se encuentran desfasadas $\frac{\pi}{2}$.

Figura 2

Velocidades horizontales y verticales de una ola.



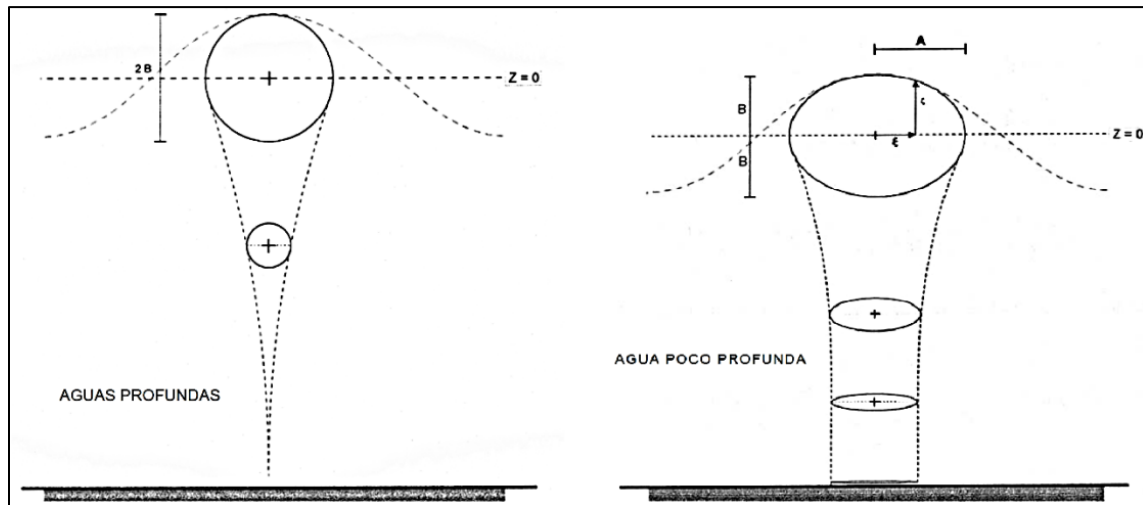
Nota. Tomado de Dean y Dalrymple, 1991.

2.1.1.4. Desplazamiento de las partículas de agua

Como explican Tinoco y López (2014) en su investigación, las olas están constituidas por partículas individuales de agua que se mueven de manera orbital. Estos movimientos son de igual tamaño a la altura de ola en la superficie del agua en aguas profundas, pero el tamaño de estos movimientos orbitales disminuye exponencialmente al aumentar la profundidad. Además, cuanto más se acerquen estas partículas a la costa y disminuye la profundidad del agua, más cambia su movimiento; siendo este más circular en aguas profundas, y elipsoidal cuando se acerca a la costa y disminuye la profundidad, debido a que el movimiento es más horizontal, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3

Trayectoria de las partículas de agua.



Nota. Tomado de López y Tinoco, 2014.

Este comportamiento puede demostrarse matemáticamente al sustituir las ecuaciones de desplazamiento horizontal y vertical de las partículas de agua, que se obtienen al integrar las ecuaciones de velocidad (ec. 9), respecto al tiempo. Por lo que se obtiene siguiente ecuación:

$$\frac{\zeta^2}{A^2} + \frac{\xi^2}{B^2} = 1 \quad [21]$$

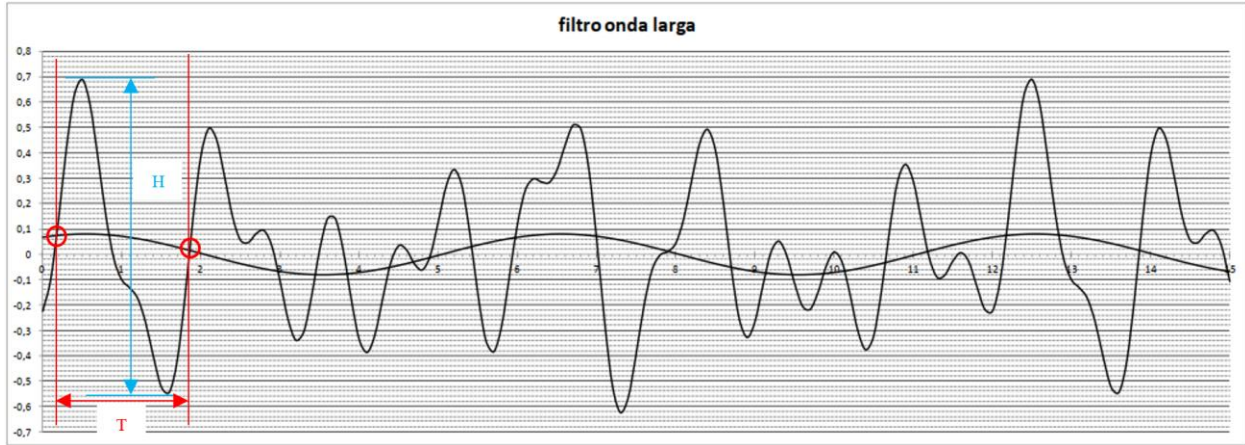
donde ζ y ξ son el desplazamiento horizontal y vertical respectivamente, $A = \frac{H \cosh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)}$ y $B = \frac{H \sinh(k(z+d))}{2 \sinh(kd)}$, ecuación que representa una elipse, y en aguas profundas $A = B = \frac{H}{2}$, indicando que el movimiento en estas zonas es circular (López y Tinoco, 2014).

2.1.2. Estadística de ondas

Cuando se desea representar el oleaje y analizarlo, es necesario un registro temporal como el que se muestra en la Figura 4.

Figura 4

Registro temporal de oleaje



En la figura anterior se puede apreciar que existen períodos y alturas de ola muy variados, por lo que es necesario utilizar algún método para definir los períodos y altura de cada una de las olas que se aprecian. El método de pasos ascendentes por cero es recomendable para realizar esta tarea, y consiste en definir una ola como el espacio entre cada dos puntos que ascienden el nivel medio definido, de forma que la distancia entre el punto más alto de elevación y el punto más bajo será la altura de ola, mientras que su período será el tiempo transcurrido entre cada paso ascendente (Silva, 2015). Mediante este criterio es posible caracterizar el registro temporal en un conjunto de N alturas de ola y períodos que permiten realizar un análisis estadístico.

De esta forma, los parámetros estadísticos más importantes para definir un estado de mar a partir de un registro temporal son (Silva, 2015):

La altura media y período medio:

$$\bar{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad [24]$$

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N T_i \quad [25]$$

donde N corresponde al número de olas individuales, H_i es la altura de ola y T_i es el período de ola.

La altura cuadrática media, H_{rms} , que según algunos autores mejor representa la energía de un estado de mar se define como (Tinoco y López, 2014):

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2} \quad [26]$$

La altura de ola un medio, que corresponde al promedio del 50% de olas más altas, expresada por:

$$H_{1/2} = \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad [27]$$

La altura de ola significativa o un tercio, correspondiente al promedio del tercio de olas más altas, definida por la ecuación:

$$H_{1/3} = H_s = \frac{3}{N} \sum_{i=1}^N H_i \quad [28]$$

Existen además otros parámetros estadísticos importantes de mencionar (Silva, 2005):

- H_{m0} , que corresponde a la altura de ola asociada al momento de orden cero en un espectro, la cual es aproximadamente igual a la altura de ola significativa, H_s .
- El período de ola un medio ($T_{1/2}$) es el promedio de los períodos asociados al 50% de las olas más altas.
- El período de ola un tercio ($T_{1/3}$) es el promedio de los períodos asociados al 33% de las olas más altas.
- El período pico de ola (T_p) es el período asociado a las olas de mayor energía en un espectro.

2.1.3. Modelos espectrales de un estado de mar

Mediante el análisis de muchos espectros de oleaje se ha encontrado que estos presentan características semejantes que pueden relacionarse por medio del empleo de parámetros físicos, tales como velocidad y duración del viento, fetch (distancia sin obstrucciones sobre la cual el viento sopla a través de la superficie del agua) y la profundidad sobre la cual se propaga el oleaje (Silva, 2005). Gracias a estas relaciones se puede generar numéricamente un espectro de oleaje esperado para algunas condiciones dadas (Govaere, 1997).

Las formas de un espectro para cada estado de mar varían significativamente según la influencia de muchos factores. Sin embargo, la forma de este no es aleatoria, debido a que existen muchas propiedades físicas del oleaje que están representadas en él, por lo que un espectro de oleaje puede ser generado sintéticamente mediante los parámetros que caracterizan su desarrollo (Silva, 2005).

El mar no aprovecha la energía del viento de manera infinita, ya que si esto fuera así, el oleaje crecería de manera indefinida. Esto indica que hay un nivel máximo para la densidad de energía espectral, conocido como estado de saturación, que se da gracias a que ocurre un balance entre la energía aportada por el viento y las pérdidas por disipación (Silva, 2005).

Para encontrar este estado de saturación, Phillips (1958) determinó que el espectro puede ser definido mediante la frecuencia, gravedad, velocidad del viento y el fetch. No obstante, para tomar en cuenta el efecto de saturación en el espectro de energía, hizo que su modelo dependiera de dos parámetros; la velocidad al cortante del viento y el fetch, que es el área donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie del mar (Govaere, 1997).

Este modelo se representa mediante la siguiente ecuación:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} 2(\pi)^{-4} \quad [29]$$

donde g es la gravedad, α depende del viento y el fetch y f es la frecuencia.

2.1.3.1. Espectro JONSWAP

En 1973, Hasselman et. al. propusieron el espectro JONSWAP, que fue generado para estados de mar formados por el viento, con fetch limitado y para una profundidad de agua indefinida.

Este espectro está definido por la siguiente fórmula:

$$S_J(f) = S_P(f) \Phi_{PM} \left(\frac{f}{f_p} \right) \phi_J(f, f_p, \gamma, \sigma) \quad [30]$$

Donde:

$S_P(f)$ es la ecuación de Phillips dada por la ecuación 2.29

$\Phi_{PM} \left(\frac{f}{f_p} \right)$ es la función de forma de Pierson-Moskowitz

$$\Phi_{PM} \left(\frac{f}{f_p} \right) = e^{-\left(\frac{5}{4}\right) \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \quad [31]$$

ϕ_J es el factor de forma del espectro JONSWAP

$$\phi_J = \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad [32]$$

donde

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_A & f_p \leq f \\ \sigma_B & f_p > f \end{pmatrix} \quad [33]$$

Sustituyendo las ecuaciones 30, 31 y 32 se obtiene

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} (2\pi)^{-4} e^{-\left(\frac{5}{4}\right) \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}} \gamma e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]} \quad [34]$$

Los valores medios de los parámetros que se utilizan para generar el espectro JONSWAP son los siguientes:

γ , conocido como el factor de forma pico del espectro, cuyo valor normalmente es 3,3.

σ , que representa el ancho de base del espectro antes (σ_A) y después (σ_B) de la frecuencia pico. Los valores más habituales son 0,07 y 0,09 respectivamente.

α , que es conocido como el factor de escala y está asociado a la energía total del espectro. Este parámetro está asociado directamente con el fetch y la velocidad del viento, como se muestra en las siguientes expresiones:

$$\alpha = 0,076(\bar{x}_f)^{-0,33} \quad [35]$$

Igualmente, se ha observado que la frecuencia pico del espectro está relacionada también con el fetch y la velocidad del viento, tal que:

$$f_p = 3,5 \left(\frac{g}{U_{10}} \right) (\bar{x}_f)^{-0,33} \quad [36]$$

donde

$$\bar{x}_f = \frac{gx}{U_{10}^2} \quad [37]$$

$x_f = \text{fetch}$

U_{10} = velocidad del viento a 10 m sobre la superficie.

2.1.4. Energía del oleaje

Según Waters (2008), para oleaje regular, la energía total por unidad de ancho del frente de ola, se puede representar como

$$J_r = \frac{\rho g^2}{32\pi} T H_s^2 \quad [38]$$

mientras que, según Zumbado (2021), para oleaje irregular en aguas profundas se utiliza

$$J_{ir} = \frac{\rho g^2}{64\pi} (0,95T_p) H_s^2 \quad [39]$$

y al multiplicar por la anchura del frente de ola se obtiene la energía total.

2.1.5. Ambiente marino y sus recursos energéticos

Los recursos energéticos marinos dependen de las características locales del ambiente marino en cuestión, es decir; viento, mareas, corrientes, olas, temperatura, biomasa, entre otras. Esto quiere decir que las condiciones marinas que se observan, por ejemplo, en la zona del Pacífico, no serán las mismas identificadas en el Caribe (Nerzic y Mazé, 2012).

Estos factores cambian con el tiempo y el espacio, especialmente en zonas donde las corrientes son muy fuertes. Debido a estas variantes en sus características y comportamiento, es esencial estudiarlas con detalle para poder evaluar el potencial energético real y la viabilidad para desarrollar un proyecto para extraer energía marina. Además, es importante tomar en cuenta que las características de la zona también definirán el tipo de dispositivo más adecuado para la captación de energía en ese lugar, puesto que ellas afectarán la estructura implementada. El fondo marino también se debe tomar en cuenta para determinar los posibles tipos de cimientos a utilizar. (Nerzic y Mazé, 2012).

Existe una gran cantidad de factores biológicos (flora y fauna marina) que deben ser considerados para llevar un proyecto de energía marina a la realidad, teniendo siempre en consideración las formas en que el proyecto puede afectar el balance ecológico del biosistema en el que se está trabajando y las interacciones que este tendrá con las estructuras implementadas (Nerzic y Mazé, 2012).

Los recursos energéticos renovables en el océano provienen de seis fuentes distintas; olas, mareas, corrientes de marea, corrientes oceánicas, conversión de energía térmica oceánica y gradientes de salinidad (Lewis y Estefen, 2012).

2.1.6. Energía de amplitud de marea

Las mareas son cambios regulares y predecibles en la altura del océano, y son impulsados por fuerzas gravitacionales y rotacionales entre la Tierra, la Luna y el Sol, combinadas con fuerzas centrífugas e inerciales. El momento y la magnitud de las mareas varía según la posición global, la forma del fondo del mar, la geometría de la costa y la aceleración de Coriolis (Lewis y Estefen, 2012). Por lo tanto, el potencial energético de este recurso es directamente proporcional a la diferencia de altura entre las aguas costeras e interiores (Nerzic y Mazé, 2012).

2.1.7. Energía de corrientes de marea

Las corrientes de marea son generadas por movimientos horizontales en el agua cerca de la costa, modificados por la batimetría, costas cercanas y otro tipo de constricciones, como islas. Las corrientes de marea fluyen como resultado de los incrementos y descensos de marea, y aunque estos pueden cambiar ligeramente por cambios en el tiempo atmosférico, su magnitud y tiempos de llegada suelen ser altamente predecibles y son prácticamente invariables por cambios climáticos (Lewis y Estefen, 2012).

Según el método de flujo de energía, ampliamente utilizado, el potencial energético de este recurso es directamente proporcional al cubo de la velocidad de la corriente (Lewis y Estefen, 2012). En general, se sostiene que las mejores zonas para el aprovechamiento energético de este recurso son las que poseen velocidades de corriente mayores a 2 m/s durante mareas bajas y altas, lo que equivale a un potencial energético promedio de 1,5 kW/m² por cada ciclo de marea (Nerzic y Mazé, 2012).

2.1.8. Energía de corrientes oceánicas

Además de las corrientes de marea generadas cerca de la costa, también existen corrientes oceánicas que se generan en el mar abierto. Estas corrientes fluyen de manera continua en la misma dirección y tienen poca variabilidad (Lewis y Estefen, 2012).

2.1.9. Conversión de energía térmica oceánica

Aproximadamente el 15% de la energía solar que incide sobre el océano es retenida como energía térmica, con la absorción concentrada en las capas más superficiales y decreciendo conforme aumenta la profundidad debido a la baja conductividad térmica del agua. La temperatura de la

superficie del agua en zonas tropicales puede exceder los 25°C, mientras que al descender 1 km puede llegar hasta los 5 °C. Para poder operar una planta de conversión de energía térmica oceánica es necesario que la diferencia de temperatura mínima entre el agua a 1 km de profundidad y la superficie del mar sea de 20 °C (Nerzic y Mazé, 2012).

A pesar de que es una fuente constantemente disponible para contribuir a la red eléctrica, su densidad energética es muy baja comparada con la energía generada por las olas y corrientes de marea (Lewis y Estefen, 2012).

2.1.10. Gradientes de salinidad

Al mezclar agua dulce y agua de mar se genera energía en forma de calor. El potencial químico de esta reacción se puede aprovechar mediante una membrana semipermeable, captando esta energía como presión, en lugar de calor, y convirtiéndola posteriormente en otras formas de energía útiles (Lewis y Estefen, 2012).

Las desembocaduras de los ríos son muy adecuadas para este propósito, debido a los grandes volúmenes de agua dulce y agua salada que se encuentran, por lo que en estas se podría generar potencia osmótica (nombre que se le da a la energía aprovechada de los gradientes de salinidad) (Lewis y Estefen, 2012).

2.1.11. Energía Undimotriz

La energía undimotriz es energía que ha sido transferida del viento al mar. Cuando el viento sopla sobre la superficie del mar, la interacción generada transfiere energía del viento al mar, formando así las olas. La energía, ahora contenida por las olas, es almacenada en forma de energía potencial (en la masa de agua desplazada del nivel medio del mar) y energía cinética (en el movimiento de las partículas de agua) (Lewis y Estefen, 2012).

Tomando en cuenta que los océanos cubren el 71% de la superficie terrestre y que las olas pueden propagarse por largas distancias con muy pocas pérdidas de energía, una cantidad considerable de potencia alcanza las costas casi continuamente, permitiendo su aprovechamiento en estas zonas. Esta característica, le permite tener un potencial global virtualmente ilimitado, que ha sido estimado en 32 000 TWh/año (Iglesias y Greaves, 2018), siendo este valor mayor que la producción de energía total registrada en el 2020, con un valor de 26597 TWh (Enerdata, 2021).

Los dispositivos para captar energía undimotriz podrían incluso generar impactos positivos sobre las costas, al amortiguar la alta cantidad de energía que puede llegar a algunas zonas vulnerables e incluso mitigar la erosión de costas sin dejar de aprovechar la energía del oleaje (Iglesias y Greaves, 2018).

2.1.12. Dispositivos para captación de energía undimotriz

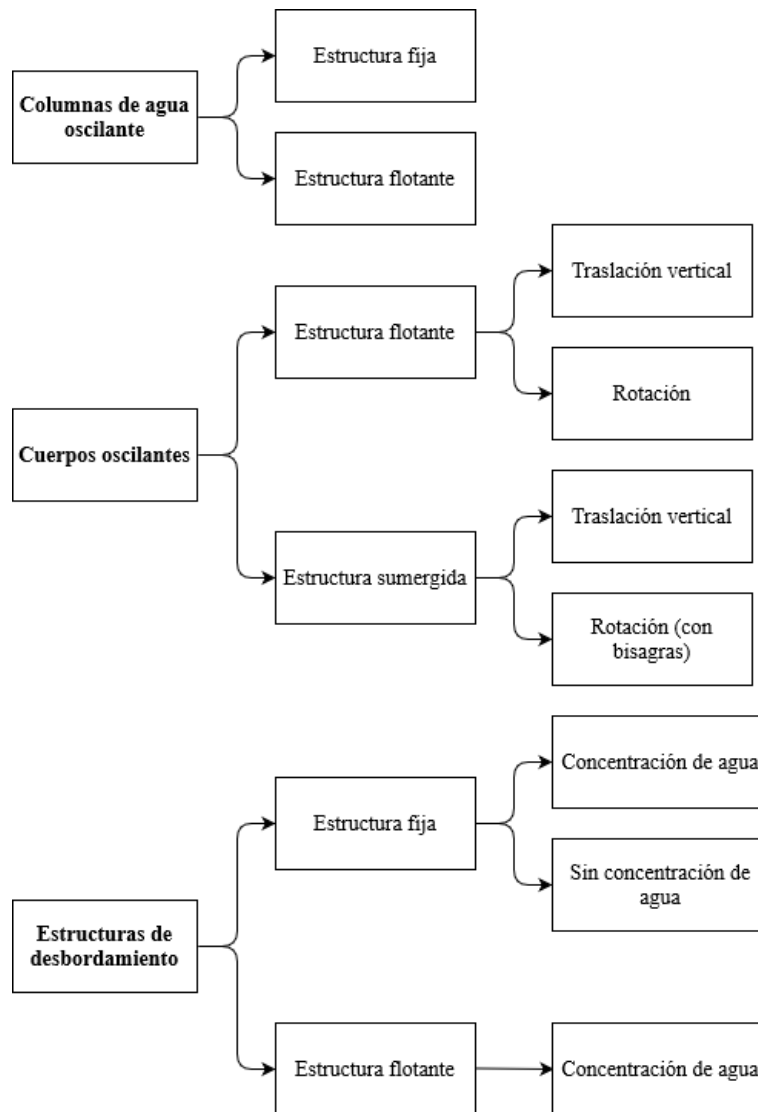
Los dispositivos para captar energía marina suelen estar diseñados para implementarse en ambientes altamente energéticos, sin embargo, estos son los más complicados de estudiar, debido a que suelen ser ambientes muy hostiles, lo que ha causado que históricamente los científicos y las

industrias marinas hayan evitado estos lugares. Sin embargo, recientemente, varios programas de investigación han sido implementados para expandir y mejorar el conocimiento que se tiene sobre estos ambientes marinos, permitiendo el desarrollo de tecnologías para la captación de energía undimotriz. Los dispositivos que requieren poco mantenimiento son los más favorables en este tipo de lugares, debido a los riesgos y alto costo económico que conlleva trabajar en ellos (Shields, 2014).

La clasificación más utilizada para categorizar los dispositivos de captación de energía undimotriz fue propuesta por Falcão (2009) y se muestra en la Figura 5.

Figura 5

Clasificación de los dispositivos para captación de energía undimotriz.



Nota. Tomado de Falcão, 2009 (Modificado).

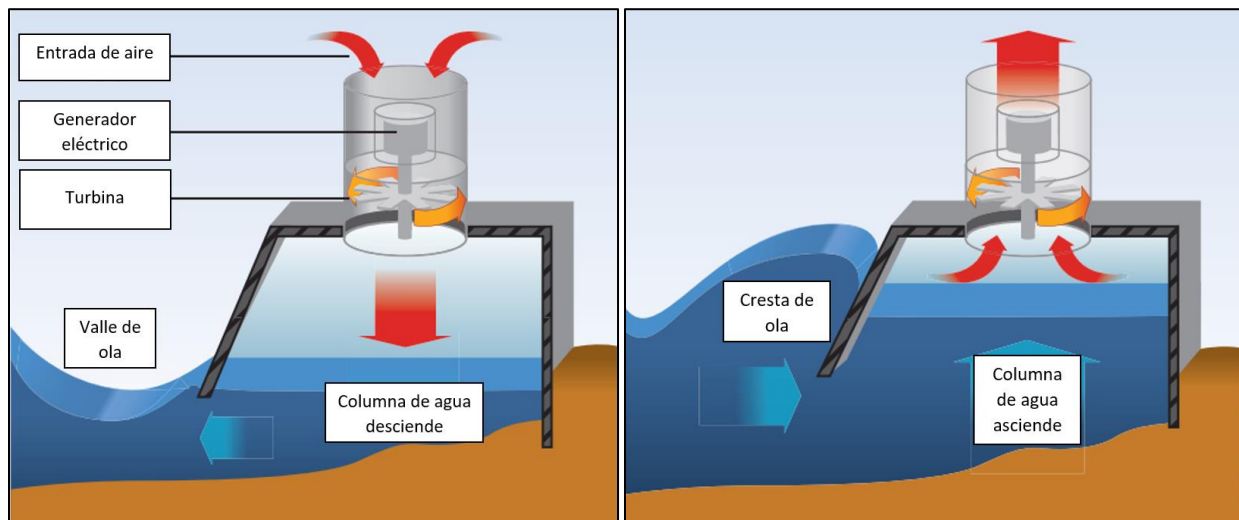
2.1.12.1. Columnas de agua oscilante

Las columnas de aguas oscilantes se clasifican en estructuras fijas y flotantes. Las estructuras fijas se ubican en la costa o cerca de la costa y se fijan al fondo del mar o a una pared rocosa. Los cuerpos flotantes están amarrados al fondo del mar, lo que les permite aprovechar la oscilación del agua (Falcão, 2009).

Estos cuerpos consisten en una estructura de concreto o acero, parcialmente sumergida, la cual está abierta por debajo de la superficie del agua, y atrapa aire sobre el nivel de la superficie del agua (ver Figura 6). Este aire atrapado es impulsado hacia una turbina conectada a un generador eléctrico gracias al movimiento oscilante del agua que provocan las olas y que incide por debajo de la estructura. Conforme el nivel del agua baja dentro de la estructura, se produce una presión negativa que genera una succión de aire y también activa la turbina (Falcão, 2009).

Figura 6

Columna de agua oscilante.



Nota. Tomado de Lewis y Estefen, 2012. (Modificado).

2.1.12.2. Cuerpos oscilantes

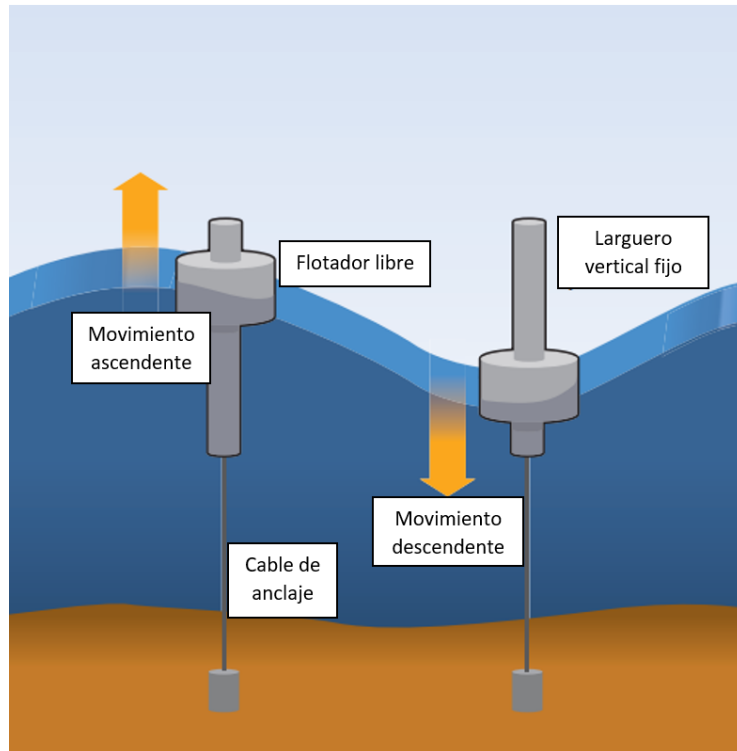
En este tipo de tecnología se busca que la energía de las olas propicie el movimiento de uno o más cuerpos oscilantes. Existen varios tipos de dispositivos en esta categoría, tanto superficiales, como sumergidos completamente, y se distinguen principalmente por su movimiento de reacción ante la ola (Aubry et al., 2012).

El tipo de cuerpo oscilante más simple está compuesto por una boya que se mueve verticalmente respecto a un punto de referencia fijo en el fondo del mar o en una estructura (Figura 7). Sin embargo, estos no son tan eficientes debido a las grandes distancias existentes entre el fondo marino y su superficie, donde está la boya. Es por esto que se desarrollaron dispositivos de dos cuerpos, más complejos, donde estos oscilan de manera diferente entre sí (como lo hace un pistón),

lo que permite captar la energía a partir del movimiento relativo entre ellos, como se muestra en la Figura 8 (Falcão, 2009).

Figura 7

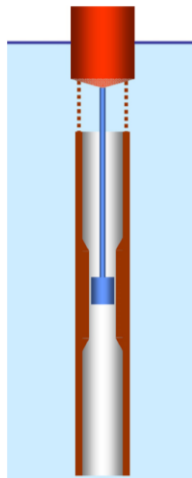
Cuerpo oscilante de movimiento vertical.



Nota. Tomado de Lewis y Estefen, 2012. (Modificado).

Figura 8

Dispositivo vertical de dos cuerpos oscilantes.

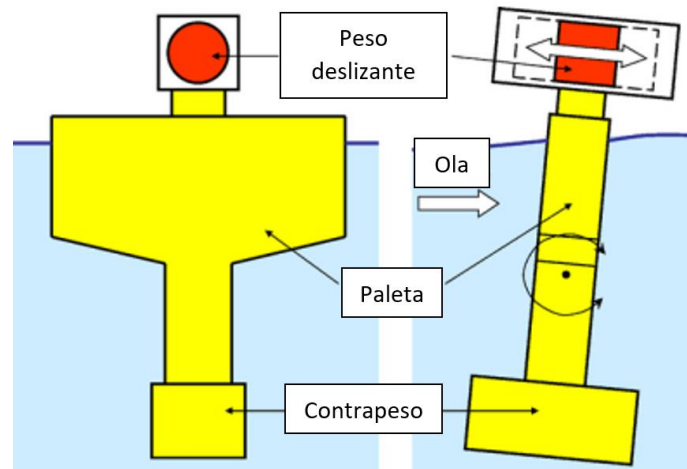


Nota. Tomado de Falcão, 2009.

Otro tipo de estos cuerpos, es el de dispositivos de “cabeceo”, en donde las olas hacen que el cuerpo tenga un movimiento oscilante de rotación en dirección vertical, como se muestra en la Figura 9. Estos oscilan en torno a su centro de gravedad, con ayuda de un peso deslizante y un contrapeso en sus extremos para favorecer el movimiento del cuerpo (Falcão, 2009).

Figura 9

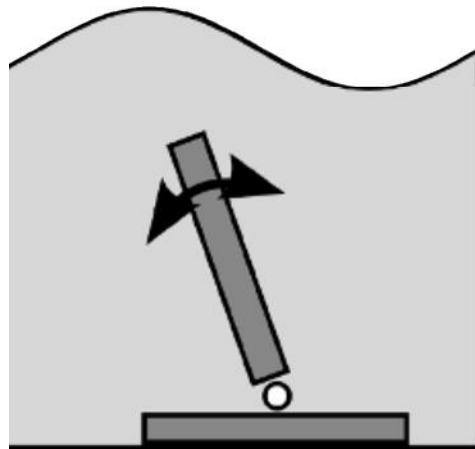
Cuerpo oscilante con movimiento de “cabeceo”.



Nota. Tomado de Falcão, 2009. (Modificado).

Los cuerpos de estructura sumergida se fijan, comúnmente, con bisagras en el fondo del mar (Figura 10). Dentro de estos dispositivos destacan los de tipo “flap”, que explotan el movimiento horizontal del agua, el cual es mayor cerca de la costa, por lo que estos dispositivos están diseñados para operar a profundidades de entre los 10 m y 20 m. Estos dispositivos consisten de un panel que oscila al ser golpeado por las olas, y su movimiento es transformado de energía mecánica en energía eléctrica mediante el uso de un pistón conectado a una turbina y un generador eléctrico. (Aubry et al., 2012).

Figura 10
Cuerpo oscilante tipo flap.

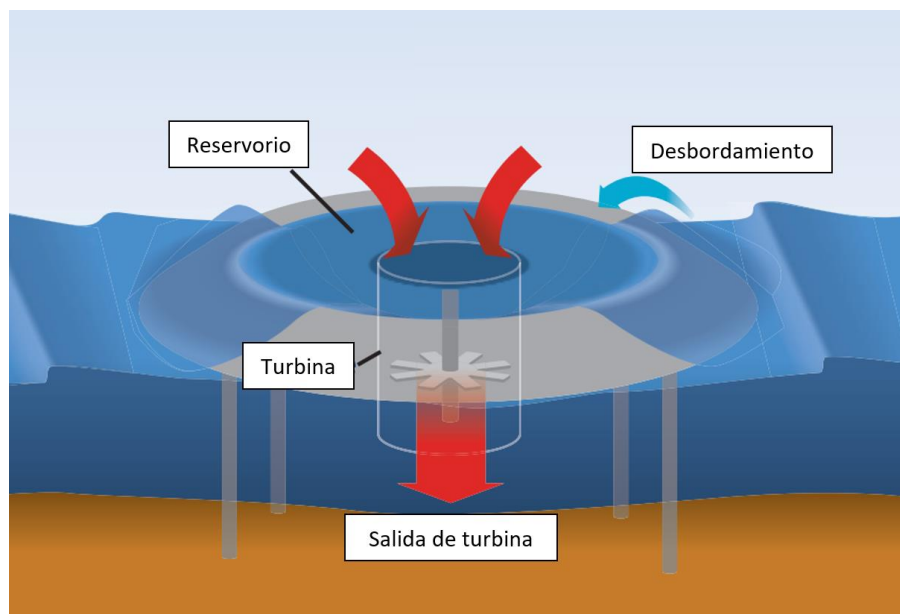


Nota. Tomado de Aubry et al., 2012.

2.1.12.3. Estructuras de desbordamiento

Estas estructuras se encargan de canalizar y concentrar las olas con el fin de aumentar su altura y luego dejarlas romper sobre una pendiente, para así llenar una cuenca que tiene un nivel superficial mayor al nivel del mar (ver Figura 11). Posteriormente, el agua en la cuenca cae de nuevo al mar por una abertura en la parte inferior, donde se encuentran turbinas conectadas a generadores eléctricos (Aubry et al., 2012).

Figura 11
Estructura de desbordamiento.



Nota. Tomado de Lewis y Estefen, 2012. (Modificado).

2.1.13. Introducción al modelado físico

Para relacionar de manera correcta el comportamiento hidráulico de un prototipo (estructura real a escala 1:1) con el de su reproducción o modelo a una escala menor, es necesario que exista una semejanza geométrica, cinemática y/o dinámica entre ellos. De esta forma se asegura que los resultados obtenidos en las pruebas experimentales sean confiables para determinar su comportamiento en condiciones reales (Echávez, 1996).

Es importante tener en cuenta como se deben escalar ciertos parámetros dentro del diseño de un modelo, y estos dependerán del escenario presentado. En los problemas de superficie libre, como el que será presentado en esta investigación, el número de Froude será el que determine los criterios de semejanza, por lo que las escalas utilizadas serán con base en este. A continuación, se presentan los principales parámetros para esta investigación y sus respectivas formas de escalarse según el criterio de semejanza impuesto por el número de Froude (Echávez, 1996):

$$L_{prototipo} = L_{modelo} \cdot \lambda \quad [40]$$

$$T_{prototipo} = T_{modelo} \cdot \sqrt{\lambda} \quad [41]$$

$$F_{prototipo} = F_{modelo} \cdot \lambda^3 \cdot \gamma \quad [42]$$

donde λ es el factor de escala utilizado, γ es el peso específico del agua de mar, F es la fuerza, L es longitud y T es el período.

2.1.13.1. Semejanza geométrica

Existe semejanza geométrica entre el dispositivo modelo y el prototipo si la división de longitudes homólogas es la misma. De esta forma se asegura una relación de distancias, anchos, etc. constante (Echávez, 1996).

2.1.13.2. Semejanza cinemática

La semejanza cinemática existe si los componentes de la velocidad en todos los puntos correspondientes son semejantes geoméricamente (Echávez, 1996).

2.1.13.3. Semejanza dinámica

Si los polígonos de fuerza aplicados por un fluido sobre el modelo y el prototipo son geoméricamente semejantes, existe semejanza dinámica. Para garantizar la semejanza dinámica se deben mantener constantes los cocientes de las fuerzas en el modelo y el prototipo. Esto se logra expresando los cocientes en función de las variables del problema (velocidad, distancia, densidad, etc.). Además, es importante mantener el mismo número de Froude (Echávez, 1996).

2.2. Antecedentes

2.2.2. Energía undimotriz en el mundo

En el 2021 fue instalado por la empresa Enel Green Power, en Chile, el PB3 PowerBuoy, siendo este el primer convertidor de energía undimotriz en Latinoamérica y el quinto en todo el mundo. El dispositivo está ubicado en la costa de Las Cruces, Valparaíso. El sistema instalado tiene 14 m de largo, pesa 10 ton y se encuentra anclado flotando a una profundidad de 35 m (Aragón, 2021). Para este dispositivo de cuerpo oscilante, la energía eléctrica convertida es almacenada en un sistema de baterías de 50 kWh. El objetivo principal de la instalación de este dispositivo es recolectar información para explotar el desarrollo de la energía marina en Chile, así como su impacto social y ambiental en condiciones oceánicas reales y desafiantes (Enel, 2019).

Figura 12

Dispositivo PowerBuoy.



Nota. Tomado de Enel, 2019

En China, en el año 2020, se empezó a desarrollar un proyecto de un parque para la extracción de energía undimotriz en el archipiélago de Wanshan. Este proyecto pretende instalar convertidores de 1 MW, y cuenta con una inversión de 21 millones de dólares aproximadamente (International Energy Agency [IEA] y Ocean Energy Systems [OES], 2021).

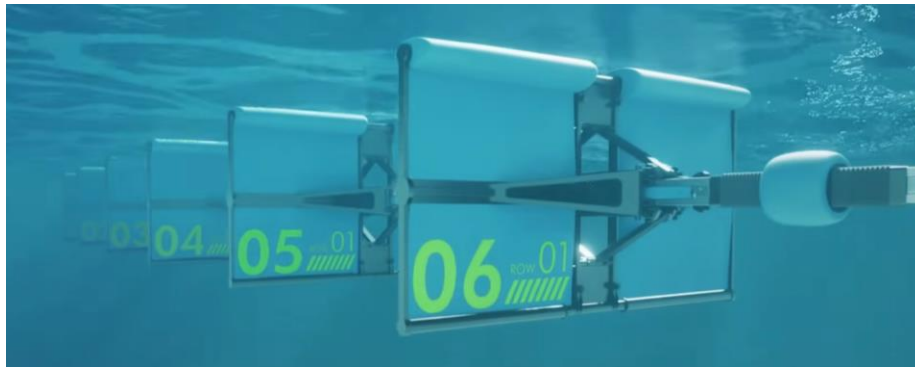
Además, también en China, para resolver la escasez de energía y la baja resistencia de las cajas de acuicultura contra el viento y el mar, el Instituto de Conversión de Energía Eléctrica de Guanzhou (GIEC) construyó una jaula para acuicultura llamada “Penghu” que obtiene su energía a partir de las olas (IEA y OES, 2021).

En España, la empresa danesa Wavepiston desarrolló un sistema a gran escala de captación de energía undimotriz, conformado por varios cuerpos oscilantes que flotan. Este sistema

demostrativo a escala completa cuenta con 24 captadores de energía, que constituyen 200 m de largo y 8 m de ancho, y un generador de turbina (IEA y OES, 2021). El propósito de este prototipo es demostrar el funcionamiento de este sistema, convirtiendo energía eléctrica conectado a la red y prepararse para los primeros proyectos comerciales. Se espera que el sistema tenga una potencia pico de 200 kW, siendo capaz de producir 547 000 kWh al año (Wavepiston, 2023).

Figura 13

Dispositivo Wavepiston.



Nota. Tomado de Wavepiston, 2023.

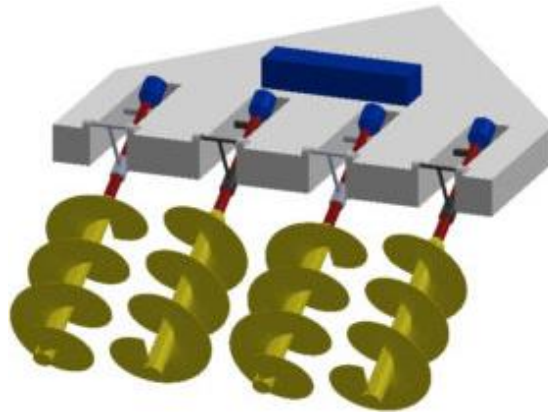
También en España, en la localidad de Motrico, se encuentra un dispositivo de tipo columna de agua oscilante en la primera instalación de energía undimotriz multiturbina en el mundo. Esta planta se conectó por primera vez a la red eléctrica en el 2011, y, al año 2020, ha inyectado más de 2 GWh de energía undimotriz, lo que la convierte en una referencia mundial para la viabilidad y el éxito de la energía undimotriz (IEA y OES, 2021).

En México, se está trabajando en un prototipo para la captación de energía undimotriz, el cual se encuentra en etapa de pruebas de laboratorio. Esta primera versión del dispositivo tiene actuadores mecánicos en los cuales las olas mueven un mecanismo rotacional que, a su vez, activa un generador eléctrico (IEA y OES, 2021).

En Canadá, la empresa Jupiter Hydro diseñó un sistema que consta de varias turbinas colocadas a un ángulo de 30° respecto a la dirección del flujo de agua y permite captar cerca de un 50% de la potencia disponible (Jupiter Hydro, 2022). La empresa continúa planeando el desarrollo de su proyecto en la Bahía de Fundy, que consta de dos fases: la prueba de un prototipo de 1 MW no conectado a la red y otro prototipo de 2 MW para demostración (IEA y OES, 2021).

Figura 14

Dispositivo diseñado por la empresa Jupiter Hydro.



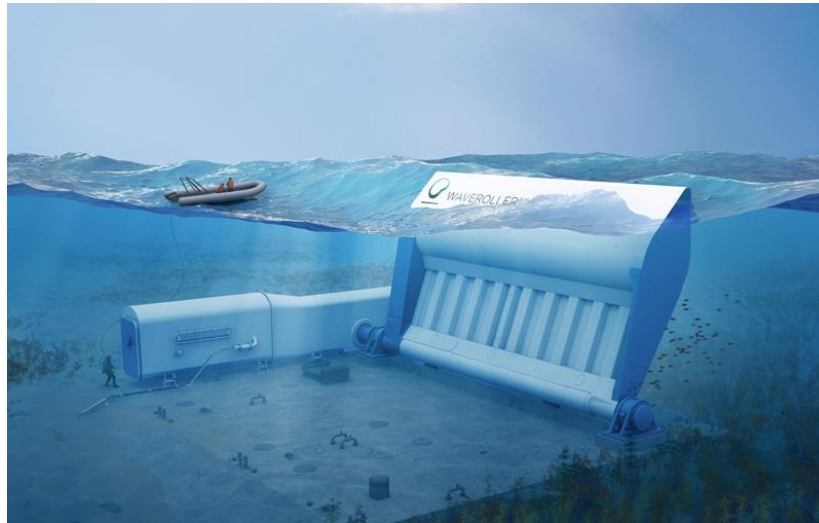
Nota. Tomado de Jupiter Hydro, 2022.

La empresa Aquamarine Power Ltd., en conjunto con la Universidad de la Reina en Belfast, desarrolló un dispositivo para captar energía undimotriz de tipo flap conocido como “Oyster”. Este dispositivo, como se ha explicado anteriormente para los flaps, aprovecha el movimiento horizontal del agua. El Oyster consiste de un panel fijado a una base que está anclada al fondo del mar. Este panel oscila al entrar en contacto con las olas, lo que genera presión sobre un fluido (agua) con la ayuda de unos pistones. El fluido alimenta una turbina hidroeléctrica, localizada en una estación en tierra, mediante un conducto hidráulico genera presión sobre un fluido (agua) con la ayuda de unos pistones. Esta agua alimenta a una turbina hidroeléctrica, donde se transforma la energía mecánica en eléctrica. Este dispositivo tiene dimensiones de 26 m de ancho por 16 m de alto, para un peso total de 194 toneladas. La potencia nominal registrada por este flap es de 315 kW (Aubry et al., 2012).

Existe otro dispositivo, conocido como “WaveRoller”, diseñado por la empresa AW-Energy que tiene el mismo principio de funcionamiento explicado anteriormente para el Oyster. Este puede ubicarse a distancias cercanas a la costa, de entre 0.3 y 2 km, y se ubica a profundidades de entre 8 y 20 m, donde el oleaje es más fuerte (WaveRoller, 2021). El WaveRoller completó su montaje e instalación final en el 2019 en Peniche, Portugal. Este dispositivo fue conectado satisfactoriamente a la red eléctrica y empezó su producción energética a mediados de noviembre del 2019. Se estima que su potencia es de entre 350 kW y 1000 kW. (IEA y OES, 2021).

Figura 15

Dispositivo WaveRoller.

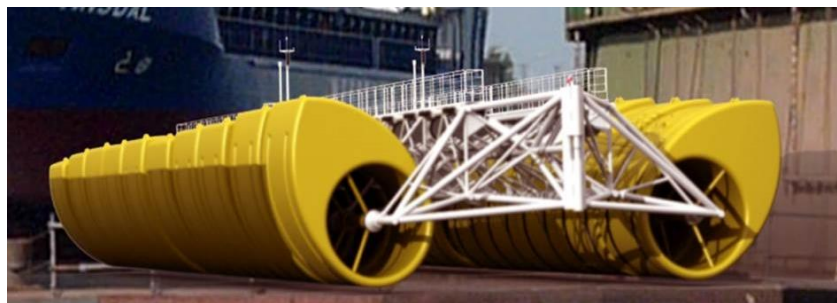


Nota. Tomado de WaveRoller, 2021.

En Dinamarca, el dispositivo llamado “Weptos” consta de una estructura con varios cuerpos en forma de V que absorben la energía del oleaje a través de una línea de rotores conectados a un generador eléctrico. Este tiene una potencia actual de 1 MW, pero se desea incrementar esta potencia y construir una versión de 4 MW. Este dispositivo ya pasó su etapa de pruebas a escala real y actualmente se encuentra en la preparación del negocio para su operación comercial (Weptos, 2022).

Figura 16

Dispositivo Weptos



Nota. Tomado de Weptos, 2022

Todos los tipos y ejemplos de dispositivos mencionados en la presente sección constituyen un grupo de ideas y conceptos que serán implementados más adelante durante la identificación del dispositivo que se considere más apto para las condiciones de oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica. Además, parte del diseño del dispositivo será realizado tomando como base distintos sistemas estudiados en esta sección, abarcando tanto las formas en las que operan estos sistemas, (piezas y partes móviles, estructuras de sostén, forma del cuerpo, etc.), como su dimensionamiento.

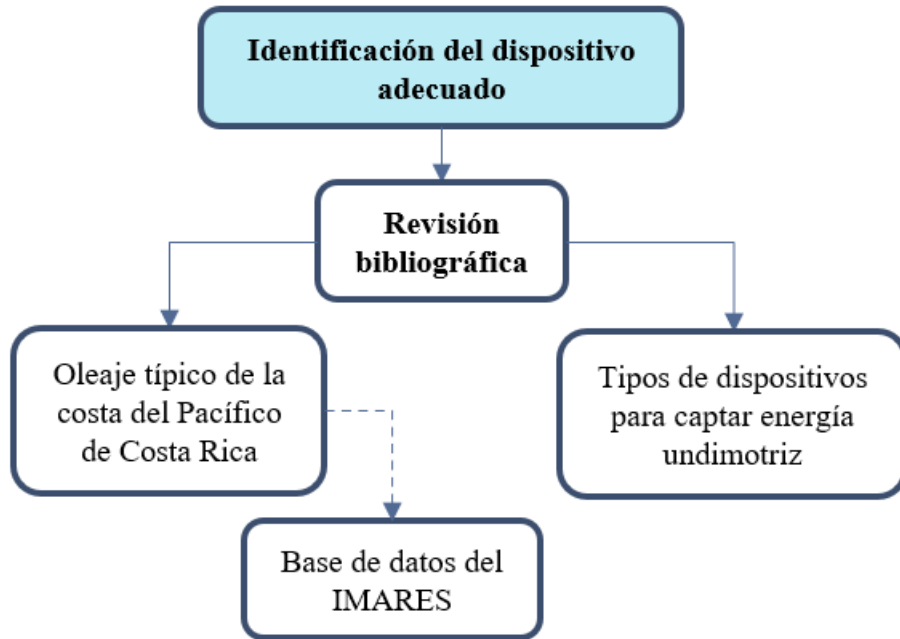
Además de todas las consideraciones tomadas para el diseño, la bibliografía presentada en esta sección resalta la importancia de la investigación en la energía marítima y el gran potencial que esta tiene con distintas formas de aprovechar el recurso marítimo.

3. METODOLOGÍA

3.1. Identificación del dispositivo adecuado

Figura 17

Esquema de la metodología para el objetivo 1.



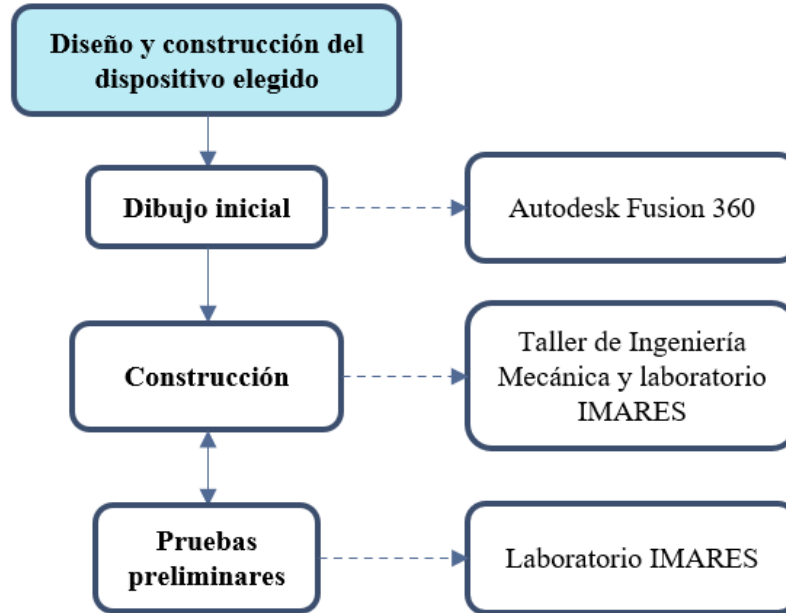
Para identificar el dispositivo que se considere más apto para la costa del Pacífico de Costa Rica, se realizó una revisión bibliográfica sobre el oleaje típico de Costa Rica y de la base de datos del IMARES, donde se analizaron 35 014 datos de oleaje, tomando en cuenta solamente los parámetros de altura significativa (H_{m0}) y período pico (T_p), registrados desde junio del 2015 hasta noviembre del 2021. A estos datos se les determinó sus períodos y alturas promedio, y el porcentaje de datos que superaban los 14 s y 1m de altura mediante una función de distribución acumulada. Estos datos fueron registrados en la zona de Cabo Blanco mediante sensores ubicados a una distancia aproximada de 2 km de la costa y una profundidad de aproximadamente 16 m.

Además, se estudiaron los diversos tipos de dispositivos para captar energía undimotriz existentes, tanto en etapas iniciales como finales, que aprovechan de mejor manera las características más relevantes encontradas del oleaje. Al tomarse en cuenta los datos sobre oleaje típico medio y los dispositivos más relevantes, se buscó que el dispositivo elegido se adapte adecuadamente a las condiciones del oleaje más comunes en la costa del Pacífico de Costa Rica, que fueron simuladas en el laboratorio de la Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES).

3.3. Diseño y construcción del dispositivo elegido

Figura 18

Esquema de la metodología para el objetivo 2.



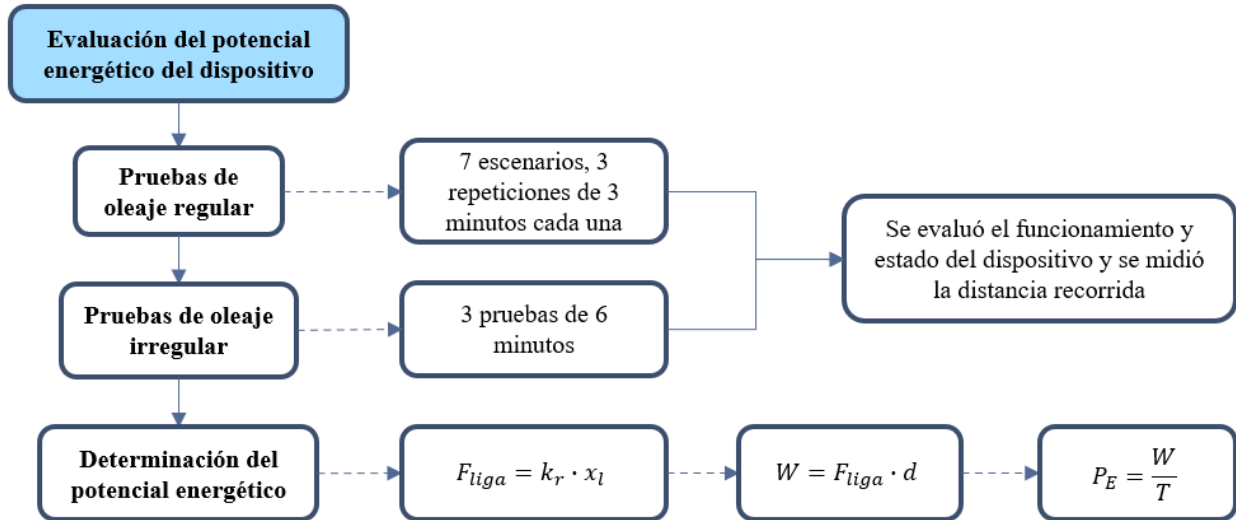
Basándose en la bibliografía consultada y los diseños de dispositivos ya planteados por otros autores, como los mencionados en el marco teórico y mostrados por Aubry et. al. (2012) y WaveRoller (2021), se realizó un dibujo inicial del dispositivo por construir. Este dibujo fue realizado en el programa Autodesk Fusion 360 para tenerlo como referencia al momento de su construcción. Para realizar el diseño de manera apropiada, este fue construido según los criterios de semejanza dinámica, geométrica y cinemática expuestos por Echávez (1996), lo que asegura que las pruebas realizadas en el modelo sean representativas del comportamiento que tendría a escala real 1:1.

La construcción del dispositivo fue realizada mediante soldadura, armado y corte de piezas y otras operaciones mecánicas conforme fue requerido por el diseño, en el taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica y los laboratorios del IMARES. El dispositivo fue probado y modificado de acuerdo a su comportamiento observado durante las pruebas preliminares y según se determinó conveniente.

3.4. Evaluación del potencial de aprovechamiento energético del dispositivo

Figura 19

Esquema de la metodología para el objetivo 3.



Las mediciones fueron realizadas en el laboratorio del IMARES utilizando el tanque de oleaje multidireccional y multi-pala, que tiene dimensiones de 11,5 m de ancho por 23 m de largo y una profundidad de 1,40 m. El generador de oleaje utiliza el software AwaSys para la generación de oleaje que incluye la absorción activa del oleaje reflejado y fue diseñado para reproducir las condiciones de oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica, ya sean condiciones normales o de tormenta. En este se observó el comportamiento integral del oleaje y el dispositivo para captación de energía undimotriz.

Inicialmente se seleccionaron 7 escenarios oleaje regular, es decir, con período y altura de ola constante, que fueron determinados una vez que se caracterizó el oleaje de la zona especificada, y se realizaron 3 repeticiones con una duración de 3 minutos para cada oleaje seleccionado. El comportamiento del flap durante estas pruebas fue analizado cada 10 s, debido a que, al ser oleaje regular, el movimiento del flap es muy constante, por lo que no se consideró necesario analizar cada movimiento del mismo. Durante todas las pruebas realizadas se evaluó mediante observación que el dispositivo no presente fallas (roturas, agujeros, dobladuras) y no se vuelque, es decir, que se mantenga estable y funcione adecuadamente según el movimiento esperado. En caso de que no cumpla con el comportamiento esperado, se realizarán modificaciones según convenga para corregir su funcionamiento.

Posteriormente, se seleccionó un oleaje irregular, típico de la costa del Pacífico de Costa Rica y se repitió 3 veces. Para esta prueba, se reprodujo un oleaje de tipo doble pico espectral (tipo 2), según lo planteado por Corrales (2019). Una vez seleccionado este estado de mar, se evaluó mediante observación si el dispositivo presentaba roturas, agujeros, dobladuras o alguna otra falla.

Para medir las distancias recorridas por el flap y realizar una lectura adecuada de estas, se grabaron videos de las pruebas utilizando una cámara de 48 MP de un celular Xiaomi Redmi Note 10,

colocada directamente en frente del dispositivo y desde donde se observa de manera adecuada la cinta métrica, de forma que posteriormente se analizaron los fotogramas de manera más precisa en una computadora.

Para evaluar la cantidad de energía y potencial energético aprovechado por el dispositivo, se colocó una liga de caucho (que tiene un comportamiento análogo al de un resorte), de 80 cm de largo, en el modelo, a la que se le determinó su valor de constante k_r utilizando un peso conocido y midiendo cuál es el estiramiento de la liga bajo la acción de dicho peso. Una vez que la constante k_r es conocida, se midió cuál es su valor de estiramiento x_l , para conocer la fuerza que realiza cada ola sobre este, como lo muestra la ecuación 43.

$$F_{liga} = k_r \cdot x_l \quad [43]$$

Una vez que se determina la fuerza que ejerce la ola sobre el flap, se utilizó la ecuación de trabajo mecánico (ecuación 44), que tiene sus unidades en Joules, para determinar la cantidad de energía que el flap absorbe al moverse una distancia d a causa de las olas.

$$W = F_{liga} \cdot d \quad [44]$$

Finalmente, se divide la energía calculada con la ecuación anterior entre el período de tiempo T en que se absorbió, para así determinar el potencial energético del modelo en unidades de Watts, como muestra la ecuación 45.

$$P_E = \frac{W}{T} \quad [45]$$

4. RESULTADOS

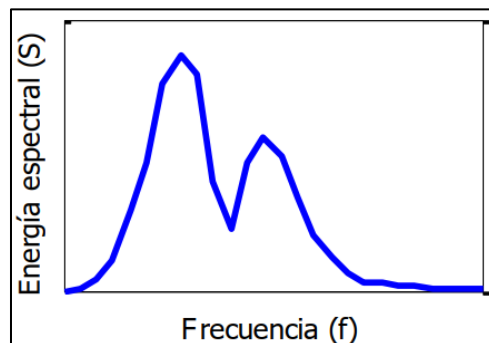
4.1. Descripción del oleaje en la costa del Pacífico de Costa Rica

Las olas que llegan a la costa del Pacífico de Costa Rica son originadas en la zona este de Nueva Zelanda y viajan más de 10 000 km a través del océano Pacífico, manteniendo siempre la misma dirección de llegada. Durante este viaje, las olas sufren una transferencia de energía desde sus frecuencias originales a las más pequeñas, aumentando el rango de frecuencias en las que una tormenta específica se distribuye (Govaere et al., 2020).

A causa de estas transferencias de energía y aumento de rango de frecuencias, es posible encontrar distintas formas en que los espectros de energía del oleaje se distribuyen. Corrales (2019) clasificó las distintas formas encontradas en espectros de oleaje en 7 tipos distintos de modelos, y encontró que el tipo 2, mostrado en la Figura 20, es el más común en la costa del Pacífico de Costa Rica, encontrándose en un 32,6% del total de espectros analizados. Este modelo, de doble pico espectral, indica que la mayor cantidad de energía se concentra en el primer pico, asociado a menores frecuencias, mientras que el segundo pico, asociado a frecuencias más altas, posee una menor magnitud de energía.

Figura 20

Espectro de energía tipo 2.

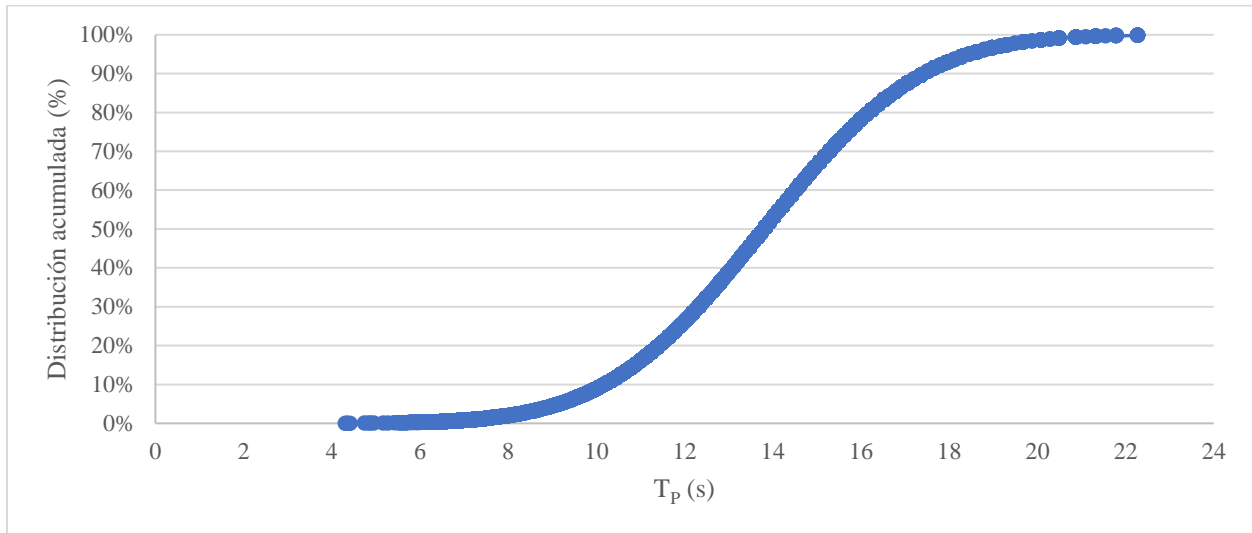


Nota. Tomado de Corrales, 2019.

Analizando los parámetros espectrales del oleaje registrado por el IMARES en el período de 2015 a 2021, mostrados gráficamente en la Figura 21 mediante una función de distribución acumulada, se determina que, en la zona de Cabo Blanco, más del 50% de los períodos registrados superan los 14 s, mientras que solamente un 10% de la totalidad de datos analizados son menores a los 10 s. Estos valores muestran que los escenarios presentados en esta zona, son principalmente de períodos altos, según ha clasificado Omar Lizano (2003) a los períodos mayores a los 14 s en su investigación “Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica”.

Figura 21

Función de distribución acumulada de períodos pico en la costa del Pacífico de Costa Rica

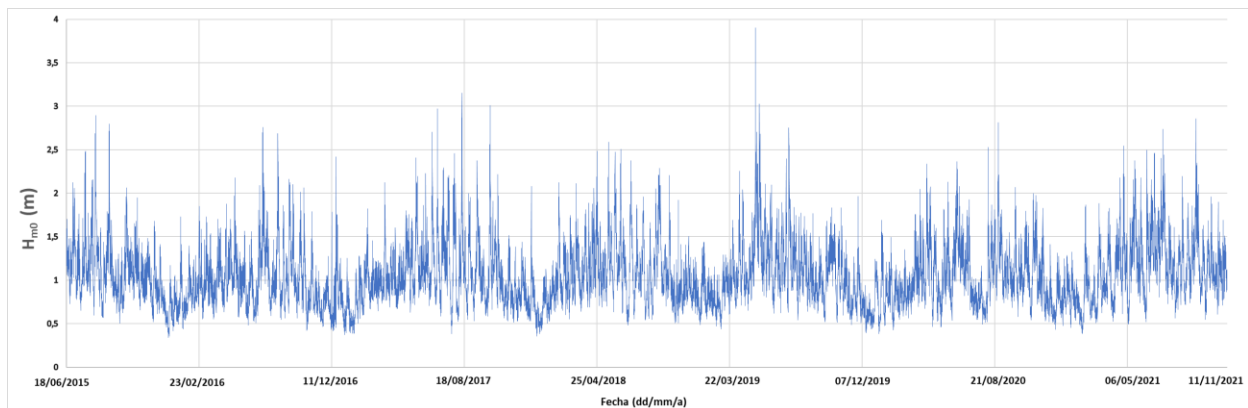


En el registro anterior se encuentra un promedio de período pico, definido como el período de onda asociado a las olas de mayor energía, de 13,8 s. No obstante, en condiciones de tormenta, se alcanzan períodos de hasta 20 s, aunque en menor cantidad. Estos datos evidencian la presencia de olas de períodos muy largos en la costa del Pacífico de Costa Rica.

La altura del oleaje se comporta de manera homogénea; presentando alturas de ola de aproximadamente 2 m en épocas de alta energía, y de 1 m en las de baja energía (Govaere et. al., 2020), como lo muestra la Figura 22. Aproximadamente un 50% de los datos analizados superan alturas de ola de 1 m, y, promediando la totalidad de los datos registrados, se obtiene una altura de ola del momento de orden cero (aproximadamente igual a la altura de ola significativa) H_{m0} , de 1,1 m, por lo que es en torno a estos valores que se seleccionarán los escenarios para la realización de pruebas en el dispositivo.

Figura 22

Altura significativa de ola de espectros de oleaje en la costa del Pacífico de Costa Rica.



A causa del comportamiento homogéneo en la altura del oleaje, se presenta un escenario favorable para el desarrollo de tecnologías de captación de energía undimotriz, presentando condiciones relativamente predecibles. Sin embargo, es preciso tomar en cuenta las excepciones que pueden ocurrir, como los eventos presentados en la Figura 22, donde se alcanzan alturas de hasta 3 m, siendo estas alturas potencialmente peligrosas para el dispositivo, que podría llegar a fallar bajo estas circunstancias si se mantiene en funcionamiento.

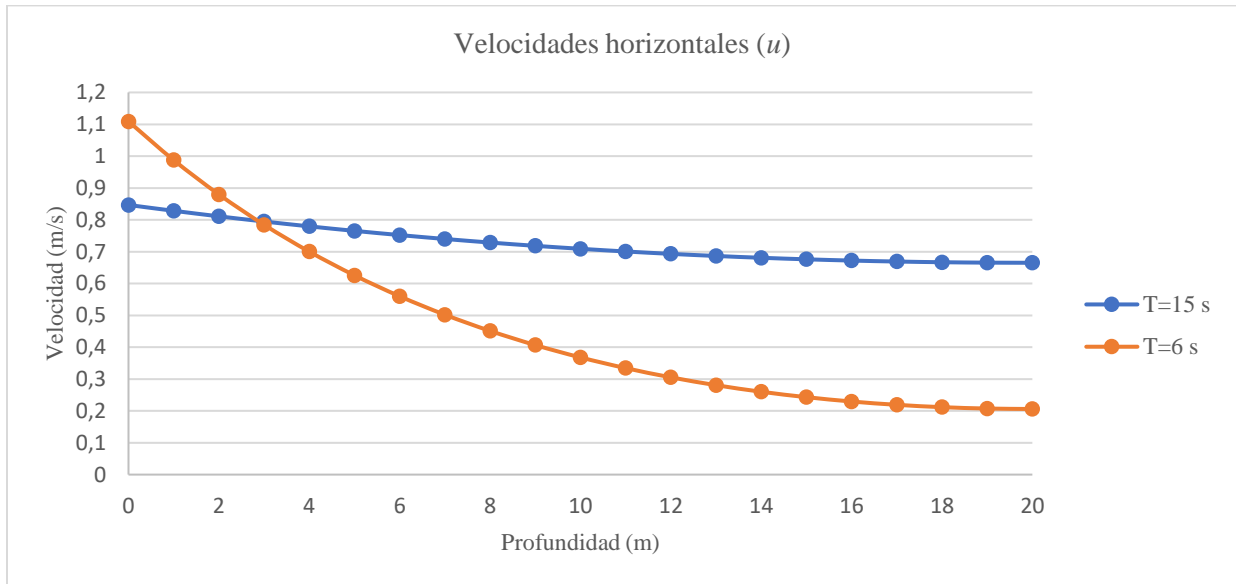
Aunque es importante considerar dichos eventos excepcionales para inhabilitar de manera preventiva el dispositivo, estos ocurrieron solamente 4 veces durante el período de estudio de 6 años, lo que indica que el dispositivo estaría fuera de funcionamiento durante períodos muy cortos de tiempo y no de manera constante. Esto, además, permite prevenir oportunamente la destrucción de equipos causada por condiciones marítimas hostiles.

Según lo mencionado, utilizando la información recolectada y registrada en la base de datos del IMARES, en la costa del pacífico de Costa Rica el oleaje predominante presenta períodos altos, lo que implica que la velocidad y fuerzas generadas por el oleaje se dan principalmente de manera horizontal (velocidad u) y no tanto vertical (velocidad w), según lo explicado en la sección “Desplazamiento de las partículas de agua” del marco teórico. Adicionalmente a esta característica, la velocidad horizontal de las partículas de agua es muy uniforme a lo largo de toda la columna de agua, situación que no se presenta en zonas con oleajes de períodos más bajos, donde las velocidades disminuyen considerablemente conforme aumenta la profundidad.

Para mostrar los comportamientos antes mencionados, se presenta la Figura 23 y la Figura 24, en las que se generaron gráficas con valores de velocidad obtenidos a partir de las ecuaciones 19 y 20. Para esta representación, se utilizaron como comparación dos períodos, uno de 15 s y otro de 6 s, ambos con una altura de ola de 2 m y profundidad de 20 m, ya que es a esta profundidad, aproximadamente, donde suelen colocarse los dispositivos para captación de energía undimotriz según Aubry et. al. (2012). Las velocidades horizontales y verticales son las encontradas en las posiciones $x=0$ y $x=L/4$ de la onda respectivamente, posición donde cada una de estas predomina (ver Figura 2).

Figura 23

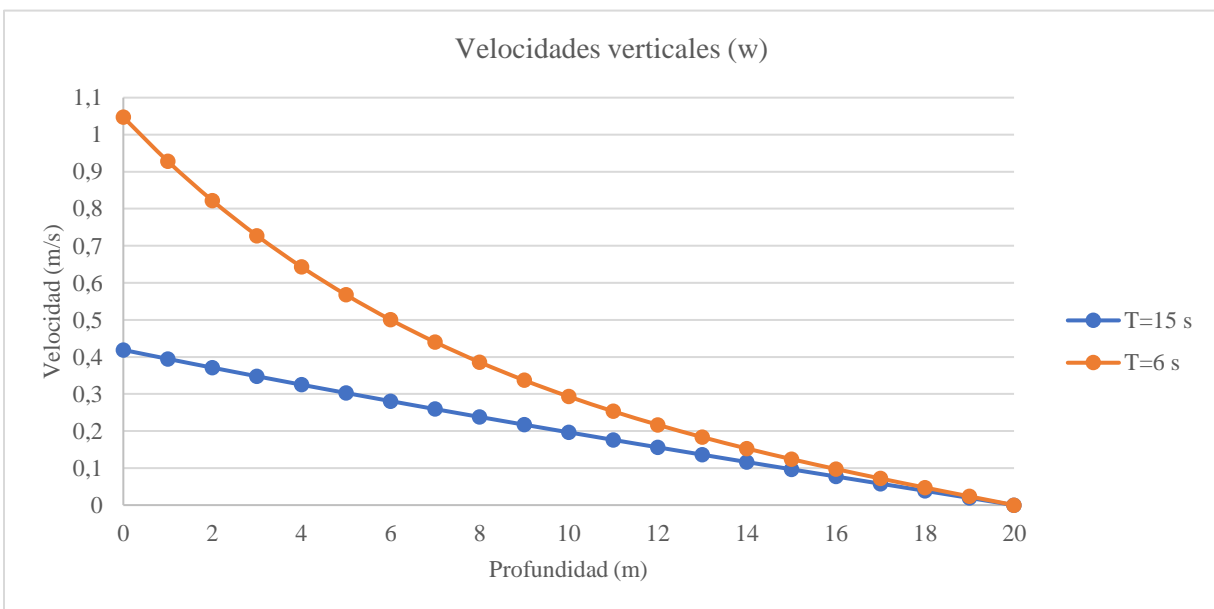
Velocidades horizontales experimentadas en $x=0$



Como se observa en la figura anterior, las velocidades para el período de 15 s mantienen valores cercanos entre sí en toda la profundidad, presentando una diferencia entre el valor más alto y el más bajo de apenas 0,18 m/s, y un promedio total de velocidades de 0,74 m/s. Por el contrario, las velocidades correspondientes al período de 6 s presentan una diferencia mayor entre el valor más alto y el más bajo, siendo esta de 0,90 m/s para un promedio total de velocidades 0,54 m/s.

Figura 24

Velocidades verticales experimentadas en $x=L/4$



En la figura previa se muestra la gráfica correspondiente a las velocidades verticales para cada uno de los períodos antes mencionados. En esta se demuestra que las velocidades verticales son más altas para el oleaje de menor período, presentando este último un promedio total de velocidades de 0,48 m/s, mientras que el período mayor presenta una velocidad promedio de 0,25 m/s.

4.2. Selección del tipo de dispositivo para captación de energía undimotriz

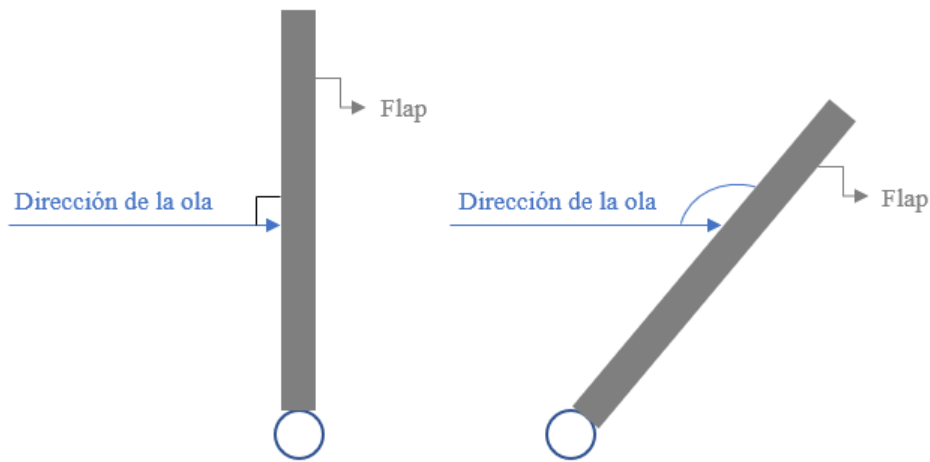
Según lo comentado en la sección anterior, y tomando como base lo estudiado en las secciones 2.1.12 y 2.2 del marco teórico, los dispositivos para generar energía undimotriz de tipo cuerpo oscilante vertical o columna de agua oscilante, que aprovechan la oscilación vertical del agua, no resultan tan favorables para las condiciones presentadas en la costa del Pacífico, como sí lo hacen en otras zonas donde predominan los períodos bajos, como el Atlántico. Tomando en cuenta esta particularidad, se plantea diseñar un dispositivo que aproveche principalmente las fuerzas horizontales de las olas. Dicho esto, entre los distintos dispositivos que se han estudiado y analizado en la bibliografía, los dispositivos de tipo flap, como el concepto mostrado en la Figura 10, aprovechan el movimiento horizontal del agua de muy buena manera, por lo que el diseño del dispositivo será realizado basado en este tipo de sistema.

Además de la característica previamente mencionada, se debe tomar en cuenta que los oleajes con períodos largos también presentan velocidades muy constantes en toda la columna de agua, por lo que conviene diseñar un dispositivo que abarque la mayor cantidad posible de esta longitud. No obstante, es de gran relevancia asegurarse de que el dispositivo no tenga contacto con el fondo, para evitar fricción.

Es importante, además, aprovechar al máximo la fuerza que la ola va a ejercer sobre el flap, y esta se da cuando este se encuentra perpendicular a la dirección de propagación de la ola. Debido a esto, se desea diseñar un mecanismo que mantenga el flap en posición perpendicular a la dirección de propagación de la ola en todo momento. Esto, a su vez, quiere decir que se evitará construir un mecanismo que, al moverse más allá de su posición de reposo, genere un ángulo mayor a 90° respecto a la línea de dirección de propagación de la ola, como el que se muestra en la Figura 25.

Figura 25

Dibujo inicial de vista superior de ejemplo de mecanismo a evitar



4.3. Diseño del dispositivo para captación de energía undimotriz

En el capítulo anterior se discutieron las características más importantes del oleaje de la costa del Pacífico de Costa Rica y cómo estas pueden ser aprovechadas a través de un equipo para generación de energía undimotriz de tipo flap. A partir de estas características, se plantearon ideas de diseño para el modelo que crean sinergia con el comportamiento del oleaje.

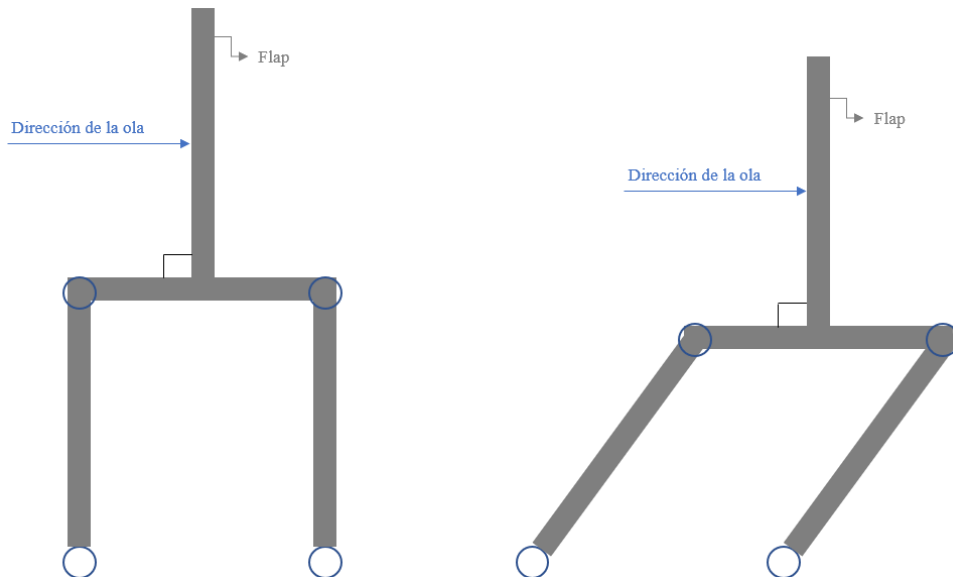
Primeramente, se desea aprovechar el movimiento horizontal, por lo que el dispositivo debe tener una estructura que le permita moverse en ese sentido y limite su movimiento vertical con la menor cantidad de pérdida de energía por fricción posible. Además de esto, se quiere que el flap, que es el área de contacto directo con la ola, abarque la mayor cantidad de longitud posible de la columna de agua, por lo que debe definirse una profundidad y alturas de ola aproximadas a las que se harán las pruebas.

Adicionalmente, se desea que la ola siempre impacte al flap de manera perpendicular, y nunca genere un ángulo mayor a 90° entre la dirección de propagación de la ola y el área de impacto de la misma. Por esto, se parte de un dibujo inicial que sirve para tener una idea general de cómo debe ser y moverse la estructura a diseñar.

Como se muestra en la Figura 26, el modelo debe tener dos tubos paralelos que transmitan la rotación a un tubo horizontal en posición perpendicular a los dos anteriores. Este tubo en posición perpendicular debe estar unido a los tubos paralelos mediante articulaciones mecánicas que le permitan rotar con respecto a los otros, es decir, no puede estar soldado o completamente fijo a estos, ya que, si es así, no tendría el movimiento deseado. Además de esto, es importante que la articulación mecánica mantenga el tubo perpendicular fijo verticalmente, permitiendo únicamente el movimiento rotacional. Al tener esta composición, es posible mantener el flap siempre en una posición perpendicular respecto a la dirección de propagación de la ola.

Figura 26

Dibujo inicial de vista superior de mecanismo deseado



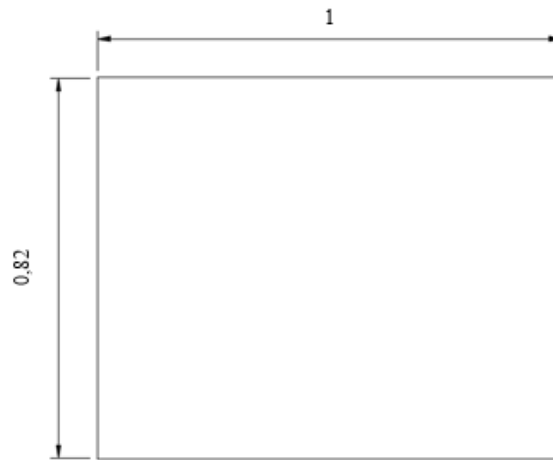
Otra consideración importante es que, al ser una estructura considerablemente grande, y hecha a partir de metal, será complicada de trasladar, por lo que se desea hacerla desarmable. Esto permitirá ir movilizandando partes individuales y armarlas en el lugar donde se harán las pruebas, evitando así el traslado de una sola estructura grande y pesada, que además podría caerse y romperse o bien, deformarse.

Para escalar las dimensiones del modelo y el oleaje, se utilizó una escala 1:20, debido a que esta permite adaptar adecuadamente las dimensiones a escala prototipo de los sistemas estudiados en la revisión bibliográfica a las dimensiones del tanque de oleaje, además de que este último puede escalar a este valor los factores de período y altura de ola típicos de la costa del Pacífico correctamente, sin generar rebases de agua sobre el nivel máximo. Debido a que el tanque generador de olas tiene una profundidad de 1,40 m, es necesario definir una profundidad y altura de ola que no sobrepase este nivel, por lo que se decide elegir una profundidad de 1 m, que equivale a 20 m en la realidad, y una altura de ola máxima de 2,3 m, que, una vez escalada, es equivalente a 11,5 cm en el tanque.

Tomando en cuenta que el flap no puede tener fricción con el suelo, se plantea dejar 5 cm libres entre la parte baja del flap y el fondo del tanque, de forma que haya suficiente espacio en caso de que exista un movimiento vertical inesperado que provoque contacto con el suelo. Además, al pasar por el valle de la ola, el nivel del agua disminuye, por lo que esto también se debe tomar en cuenta para que el flap no quede descubierto en ningún momento. Con estas consideraciones, se decide diseñar el flap con unas medidas de 0,82 m de largo por 1 m de ancho, como se muestra en la Figura 27.

Figura 27

Dimensiones del flap en m



Las dimensiones fueron elegidas tomando en cuenta la escala prototipo 1:20, lo que indica que son factibles para una eventual construcción de este. Las dimensiones, a escala prototipo, son de 20 m de ancho por 16,4 m de alto, lo que se considera factible según la bibliografía consultada respecto a otro tipo de dispositivos con principios de funcionamiento similares, como las investigaciones desarrolladas por Aubry et. al. (2012) y Aderinto y Li (2019).

Una vez que se definen las dimensiones del flap, se procede a diseñar el resto de la estructura que le permitirá moverse de la manera deseada y lo sostendrá a una altura adecuada. Para este proceso se toma en cuenta también la disponibilidad de materiales con los que se cuenta para construir, de manera que no se tengan que hacer gastos excesivos en piezas, y, por el contrario, se utilicen materiales ya existentes en el laboratorio del IMARES, de los cuales se puede hacer uso.

Para iniciar con el diseño, debe contarse con un tipo de estructura de soporte que pueda sostener a todo el modelo de manera fija, por lo que se decide hacer uso de una estructura ya existente en el laboratorio, mostrada en la Figura 28. Esta estructura cuenta con dos platinas en dirección al suelo, cada una con 4 agujeros para tornillos de $\frac{1}{2}$ "', de forma que el modelo será fijado a estas platinas.

Figura 28

Estructura de soporte para el modelo



Para el diseño del modelo, se utiliza el software Fusion 360, que permite realizar estructuras en 3D. La construcción del modelo fue realizada utilizando materiales que, en su mayoría, ya se encontraban en el laboratorio del IMARES o en el taller de Ingeniería Mecánica, donde se llevó a cabo la construcción del dispositivo. Las únicas partes que tuvieron que ser compradas fueron 3 uniones de tipo tee roscada y 4 uniones simples. Todos los tubos y uniones utilizadas son de hierro galvanizado, con diámetros de 1½”, las demás dimensiones y materiales serán especificadas conforme se detalle la confección del dispositivo.

Para hacer que el modelo se acople a las platinas de la estructura de la Figura 28, se decide diseñar dos platinas idénticas, de 13 cm de largo por 13,5 cm de ancho, ambas soldadas a un tubo vertical de 42 cm (ver Figura 29), que funcionará como el eje de rotación principal del modelo. Además de esto, el tubo vertical de 60 cm permitirá modificar la altura del modelo en caso de que sea necesario.

Para la confección de estas platinas se utilizaron restos de una lámina de hierro negro, que fue cortada y agujereada para que sus orificios fueran concéntricos con los de las platinas de la estructura de soporte.

Figura 29

Diseño de platinas idénticas soldadas a tubo vertical



Como se mencionó anteriormente, esta estructura sirve como eje principal de rotación del modelo y también para ajustar la altura de este, por lo que fue necesario implementar una pieza que habilitara estas dos funciones. Para la rotación, fue necesario implementar un collarín que estuviera soldado a un tubo de 58 cm de largo y 1½” de diámetro, colocado de forma horizontal y que permita la transmisión del movimiento rotacional. Además, para limitar el movimiento vertical y, a la vez, ajustar su altura óptima, se colocaron dos collarines móviles adicionales en cada tubo, que cuentan con tornillos que, al socarse, permiten fijar su posición para mantener el modelo en la altura deseada. Estos dos collarines fueron colocados por encima y debajo del collarín soldado al tubo, haciendo que este último quede fijo en una posición, como lo muestra la Figura 30.

Para cumplir la función de estos collarines, se utilizaron 2 uniones de tipo tee roscada y 4 uniones simples de ½”, ambas de hierro galvanizado a las que se les removió la rosca, de forma que estas pueden moverse y rotar libremente en el tubo vertical. A los collarines que funcionan como limitadores de movimiento vertical, se les realizaron dos agujeros con rosca con un diámetro de 10 mm, distanciados a 90°, haciendo posible la adición de tornillos que pueden ser ajustados para fijar la posición. Se toma la decisión de hacer dos agujeros en cada collarín para que la fuerza que estos realizan esté mejor distribuida y no cause deformaciones en el tubo vertical.

Figura 30

Diseño de collarines y tubo para transmisión de movimiento rotacional



El siguiente tubo fue colocado en posición perpendicular a los dos tubos paralelos mostrados previamente, como lo muestra la Figura 31. Este debe estar unido a ambos tubos mediante un tipo de articulación que le permita rotar libremente con respecto a estos, por lo que se utilizó un tornillo y tuercas de acero inoxidable de 1/2" que lo fijen verticalmente. Es importante que las tuercas no estén muy ajustadas, de forma que permitan el movimiento rotacional libre de los tubos y no lo limiten al agregar fricción. Además, se le agregan arandelas de acero inoxidable que permitan una distribución más uniforme de las fuerzas a las que están siendo sometidos los tubos, ayudando a que estos últimos no se deformen y causen deterioros en el sistema. En la Figura 32 se muestra la configuración de tornillos, tuercas y arandelas deseada para el movimiento adecuado.

Además, en este último tubo debe colocarse otro tubo final de forma perpendicular que sostenga al flap, por lo que, tomando esto en cuenta, y la cualidad de ser desarmable que se desea implementar, se decide colocar una unión de tipo tee roscada de 1 1/2" en el medio, como lo muestra la Figura 31. Debido a esto, el tubo se cortó en partes iguales, y a cada una de estas partes se les realizó una rosca, que se acopla a la unión de tipo tee, en uno de sus extremos, de forma que puedan unirse mediante esta rosca a la unión, que también sirve para soldar el tubo final que sostendrá al flap.

Figura 31

Tubos horizontales unidos mediante tee roscada



Figura 32

Configuración de la articulación



El tubo final de 60 cm de longitud, soldado a la tee roscada y encargado de sostener el flap, tiene dos agujeros por los que pasarán dos tornillos de acero inoxidable de 20 cm de largo y ½” de diámetro, que funcionan como puntos de sostén del flap, los cuales tienen tuercas que ayudan a mantenerlo fijo en una sola posición, como lo muestra la Figura 33.

Figura 33

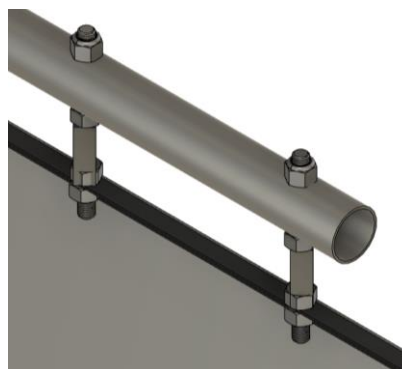
Diseño de estructura final



Al estar hecho el flap a partir de una lámina de acero inoxidable de 1 mm, este se considera flexible, y esta es una característica no deseada para el modelo, debido a que se puede deformar fácilmente y causar pérdidas energéticas en el sistema. Para evitar esto, y darle un punto de donde pueda sostenerse al tubo horizontal mostrado previamente, se decide confeccionar un marco a todo su alrededor a partir de platinas y un angular de hierro negro, siendo este último el que se ubica en la parte alta y trasera del flap, permitiendo el sostén de este, como lo muestra la Figura 34.

Figura 34

Parte trasera del punto de sostén entre el tubo y el flap



El marco realizado con platinas de hierro negro es fijado mediante tornillos de 3 mm de acero inoxidable, por lo que fue necesario hacerle agujeros de 3 mm tanto a la lámina de acero inoxidable, como a las platinas. Además, se le colocó una platina a cada lado del borde del flap, es decir, una por delante y otra por detrás de la lámina de acero inoxidable, brindando así una mayor rigidez para todo el sistema. La única excepción se encuentra en la parte alta del flap, donde se colocó un angular en la parte trasera, para poder fijar los tubos de sostén en este (ver Figura 34), y una platina por delante. La configuración final del marco del flap puede apreciarse en la Figura 35.

Figura 35

Configuración del marco del flap



Una vez terminado el flap, todas las piezas se movilizaron al laboratorio del IMARES. En este, se pintaron las platinas del flap con los tornillos colocados para evitar la oxidación una vez que estuviera en contacto con el agua. Además de esto, se le colocaron flotadores al flap, ya que, al ser una estructura considerablemente pesada, con un peso de 12,1 kg, es necesario contrarrestar esta fuerza en el agua, dándole flotabilidad y haciendo el dispositivo lo más neutral posible, evitando que este roce el fondo y le genere más peso a la estructura que lo sostiene, aumentando las pérdidas de energía por fricción.

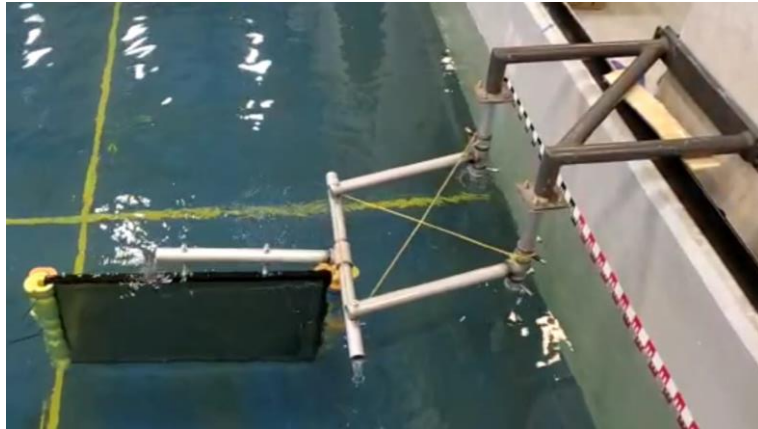
4.4. Cambios realizados en el diseño dispositivo para captación de energía undimotriz

Para probar inicialmente este modelo, se utilizó un oleaje con altura de 2 m y un período de 16 s, es decir, 10 cm y 3,5 s respectivamente una vez escalados estos valores. Dichos valores fueron seleccionados debido a que corresponde a un escenario que se presenta en la costa del Pacífico durante épocas de alta energía, como se mencionó en la sección 4.1. Además, se le colocó una liga

de caucho amarilla, apreciada en la Figura 36 en medio de los tubos paralelos, que funciona como resorte, ayudándole a volver a su posición de reposo una vez que alcanza su distancia máxima.

Figura 36

Composición inicial del flap



En estas pruebas se observó que el flap no funcionaba según lo esperado. Este se movía, muy lentamente, en dirección opuesta a la dirección de propagación de la ola, que es la dirección opuesta a la deseada para el movimiento del dispositivo. Aunado a esto, se observó que el flap tenía un movimiento de “cabeceo” bastante significativo en su parte alta, donde este se une mediante tornillos al tubo que lo sostiene, indicando que los tornillos utilizados de $\frac{1}{2}$ ” estaban siendo flexibles y evitaban que la estructura se moviera de manera uniforme.

Todos estos comportamientos observados eran un indicativo de que el flap necesitaba una mayor rigidez en su estructura, desde el punto de sostén, en el tubo que le sostiene, hasta su parte más baja, ya que era en esta donde se generaba el mayor momento que causaba el movimiento de cabeceo en la parte alta. El objetivo principal de darle una mayor rigidez es el de hacer que toda la estructura se mueva uniformemente, es decir, moviéndose al mismo tiempo tanto la parte alta del flap, como su parte baja, sin movimientos de cabeceo que alteren su funcionamiento adecuado.

Para brindarle más rigidez, primeramente, se decide cambiarle el marco de platinas por un marco de angulares fijados solamente en la parte trasera del flap (Figura 37), ya que estos últimos presentan una mayor inercia que las platinas. La razón por la que se decide colocar los angulares solamente de un lado, y no por ambos, como estaba constituido anteriormente el flap, es para disminuir el peso de la estructura y porque se considera que los angulares son lo suficientemente rígidos para brindar el comportamiento deseado con esta configuración. Además de esto, en las esquinas se sueldan angulares pequeños para que todo el marco quede unido y sin espacios libres donde la lámina de acero inoxidable quede descubierta y pueda doblarse.

Figura 37

Cambios realizados al marco del flap



Seguidamente, se decidió soldar angulares en el medio de la estructura de su parte trasera, de forma que estos estuvieran unidos desde los tornillos y angular de la parte alta, hasta el angular de la parte baja, como lo muestra la Figura 38.

Figura 38

Soldadura de angulares largos en medio del flap



Adicionalmente, para darle aún una mayor rigidez, se le soldó un pequeño angular desde la parte superior del angular de arriba, abarcando el tornillo, hasta una tuerca que limita su posición vertical con el tubo de sostén, como muestra la Figura 39. Se espera que, con estos cambios, la rigidez del modelo aumente considerablemente desde su parte alta, donde se encuentra el tubo que lo sostiene, hasta la parte baja, buscando eliminar así el movimiento de cabeceo observado en las pruebas preliminares, que causaba un movimiento indeseado para el dispositivo.

Figura 39

Angulares pequeños soldados en la parte superior del flap



Una vez realizados estos cambios con el propósito de aumentar la rigidez del flap, se arma de nuevo la estructura en el tanque de pruebas, y, una vez en este, se le colocan dos tensores desde su parte baja hasta el tubo perpendicular al tubo de sostén, como lo muestra la Figura 40. Esto con el propósito de que la parte baja tenga aún menos posibilidad de moverse con mayor fuerza que la parte alta y así el movimiento sea más uniforme.

Además, se decide cambiarle los flotadores que tenía anteriormente por un prisma rectangular de estereofón colocado en medio de los dos angulares largos soldados anteriormente. La razón de este cambio es la facilidad de colocación y que éste puede colocarse en el centro de gravedad del flap, dándole una mayor estabilidad.

Para determinar la flotabilidad F_{BF} del modelo por sí solo, que tiene un peso de 12,1 kg, equivalente a 118,6 N, se aplica la siguiente ecuación:

$$F_{BF} = \rho_{agua} \cdot g \cdot \frac{m}{\rho_{acero}} = 1000 \cdot 9,8 \cdot \frac{12,1 \frac{kg}{m^3}}{8050 \frac{kg}{m^3}} = 14,73 \text{ N} \quad [46]$$

Una vez determinada la flotabilidad del dispositivo, procede a calcularse el volumen de estereofón necesario para que el modelo flote en el agua, tomando en cuenta las fuerzas de flotación del flap (F_{BF}) y el estereofón (F_{BE}) y la fuerza de gravedad aportada por el flap (F_{PF}), tomando como despreciable el peso del estereofón, como lo muestra el siguiente cálculo.

$$F_{BE} + F_{BF} = F_{PF} \quad [47]$$

$$\rho_{agua} \cdot g \cdot V_{estereofón} + 14,73 \text{ N} = 118,6 \text{ N} \quad [48]$$

$$V_{\text{estereofón}} = \frac{118,6 \text{ N} - 14,73 \text{ N}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2} = 0,0106 \text{ m}^3 \quad [49]$$

Una vez determinado el volumen de estereofón necesario para que el dispositivo flote en el agua, se determinan las dimensiones necesarias que debe tener el prisma para cumplir con dicho volumen y, a la vez, ajustarse al espacio disponible para su colocación en el flap. Se cortó un prisma rectangular de estereofón con dimensiones de 0,28 m de ancho, 0,78 m de alto y un grosor de 0,049 cm, obteniendo así el volumen requerido para obtener la flotabilidad adecuada para el dispositivo.

Para fijar este flotador se utilizó silicón frío y un cordón que lo sostenía desde la parte alta del flap hasta la parte baja, como medida de seguridad. Estos cambios se muestran en la Figura 40.

Figura 40

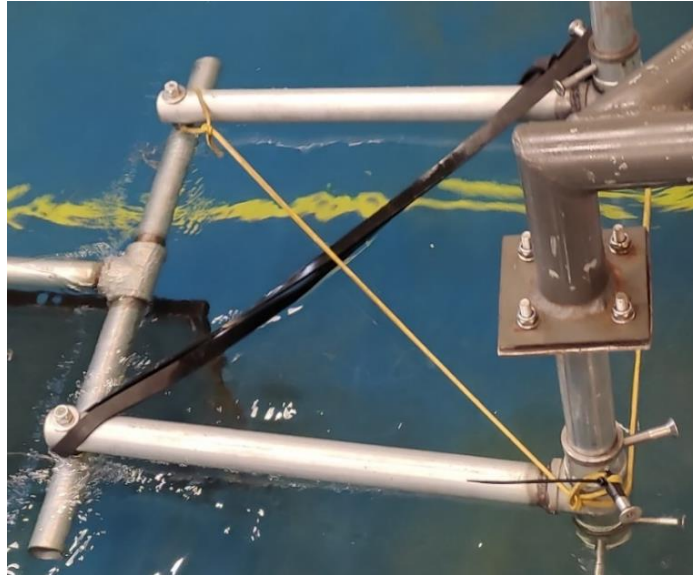
Flap con los cambios de rigidez y flotabilidad realizados



Para mejorar el movimiento del flap y facilitar las mediciones que serán realizadas después, se decide modificar la configuración de las ligas que se tenían anteriormente. Se coloca la liga amarilla de caucho que servirá para medir la fuerza que la ola inflige sobre el flap. También, se coloca una liga negra de caucho de mayor resistencia que sirve como tope para que el flap no se mueva mucho más allá de su posición de reposo por la acción de la ola reflejada en el movimiento de vuelta, como lo muestra la Figura 41.

Figura 41

Configuración de ligas para funcionamiento adecuado del flap



Finalmente, se engrasaron las partes del modelo que tenían movimiento de rotación respecto a otras y también se les colocó lubricante multiuso WD-40 para proteger la estructura y facilitar el movimiento de todo el dispositivo.

Una vez realizados estos cambios, decide ponerse en funcionamiento el flap, repitiendo el oleaje de 10 cm de altura y 3,5 s de período (escala modelo), para evaluar su movimiento y determinar si se encuentra en condiciones aptas para realizar las mediciones requeridas. Se observa que, con los cambios de rigidez realizados, el movimiento de cabeceo fue completamente eliminado y el flap se mueve en la dirección deseada, es decir, en la misma dirección de propagación de la ola. Además, se observa que, con la acción de la ola reflejada, el flap vuelve a su posición de reposo una vez que alcanza su desplazamiento máximo de ida. De igual manera, la liga negra cumple su función de tope al hacer que el flap no pueda moverse mucho más allá de su posición de reposo cuando este realiza su movimiento de vuelta.

4.5. Pruebas de oleaje regular

Según las características principales del oleaje en la costa del Pacífico de Costa Rica encontradas en la sección 4.1, tomando en cuenta promedios generales y porcentaje de veces que se alcanzan ciertos valores de alturas y períodos, se seleccionaron 7 combinaciones distintas de altura y períodos de oleaje, donde la primera combinación corresponde a un escenario extremo, por lo que solo se repetirá una vez, mientras que los otros escenarios serán repetidos 3 veces durante 3 minutos cada uno. Los escenarios son elegidos tomando como base los valores de altura y período de oleaje más comunes en la costa el Pacífico de Costa Rica, donde la mayor parte de períodos sobrepasan los 14 s, y el promedio de alturas presentado es de 1,1 m. Estas pruebas se realizan solamente durante 3 minutos debido a que, como se determinó durante la prueba preliminar con

oleaje regular para observar el comportamiento del flap, este se mueve de manera constante y presenta pocas variaciones en cuanto a distancia alcanzada.

Se define la menor altura como 1,0 m y el menor período como 14,0 s, tomando en cuenta que se desean aprovechar escenarios de alta energía, y el oleaje presentado en la costa del Pacífico de Costa Rica suele superar dichos valores. Además, se prueba con valores de altura y período de oleajes más altos, que de igual manera están presentes en la costa del Pacífico de Costa Rica, debido a que es en estas condiciones donde se encuentra un mayor potencial energético. También decide probarse un oleaje de 3 m de altura con período de 17,1 s, porque, aunque es un evento poco común, se tienen registros de olas de esta magnitud, y es importante probar este tipo de escenarios para conocer el límite del dispositivo.

En la Tabla 1 se muestran los distintos oleajes que fueron probados, con los valores de altura (H_{m0}) y período pico (T_P) a escala de prototipo (en las dos columnas de la izquierda) y su equivalencia en escala modelo (en las dos columnas de la derecha), ya que, en algunos casos, resulta más conveniente hacer referencia a la escala modelo, utilizada en el laboratorio, y en otros a la escala prototipo, principalmente para la parte de evaluación de potencial energético aprovechado.

Tabla 1

Combinaciones de altura y períodos de oleaje seleccionado

H_{m0} prototipo (m)	T_P prototipo (s)	H_{m0} modelo (m)	T_P modelo (s)
3,0	17,1	0,150	3,82
2,3	17,1	0,115	3,82
1,5	16,5	0,075	3,69
1,0	16,0	0,050	3,58
2,3	15,1	0,115	3,38
1,5	14,5	0,075	3,24
1,0	14,0	0,050	3,13

4.6. Pruebas de oleaje irregular

Para analizar el comportamiento del modelo bajo oleaje irregular, se utilizó un oleaje de tipo 2 (doble pico espectral), tipo JONSWAP, según lo investigado por Corrales (2019). Para la generación de este en el tanque de oleaje, se utilizaron los parámetros iniciales mostrados en la Tabla 2. Estos datos fueron obtenidos de la base de datos de oleaje del IMARES para la costa del Pacífico, y se consideran representativos del oleaje experimentado en esta zona.

Tabla 2

Parámetros para oleaje irregular tipo “JONSWAP”

Pico	H_{m0} prototipo (m)	T_P prototipo (s)	H_{m0} modelo (m)	T_P modelo (s)
1	0,96	18,3	0,048	4,09
2	1,42	13,0	0,071	2,90

Las pruebas realizadas con estos parámetros tienen una duración de 6 minutos cada una y se repitieron un total de 3 veces, permitiendo así determinar qué tan constante es el movimiento del flap y la generación de energía con oleajes cambiantes a lo largo del tiempo.

4.7. Determinación de la constante k_r de la liga utilizada

Para determinar la energía aprovechada por el modelo, es necesario contar con un mecanismo que permita medirla. Analizando esta situación, y las distintas formas y dispositivos que podrían utilizarse para realizar esta medición, tales como resortes, dinamómetros, ligas, etc. se decide optar por la liga, dado que, por su manejabilidad y comportamiento similar al de un resorte, suponía la opción más adecuada para este dispositivo. Como la liga funciona de manera análoga a un resorte, es necesario determinar la constante k_r de esta, por lo que debe medirse su longitud en estado de reposo y, posteriormente, medir su longitud cuando está estirada por la acción de un peso conocido.

Para realizar este cálculo, se utilizó un objeto de masa igual a 0,416 kg, lo que equivale a una fuerza $F = 4,07 \text{ N}$. Al medir cuánto se estira, se obtiene un resultado de $x_l = 0,266 \text{ m}$. Seguidamente, deben escalarse estos valores según corresponda para la fuerza y la longitud según el factor de escala utilizado, ya que, para calcular el potencial energético se utilizarán los valores a escala prototipo, siendo estos los valores que se obtendrían realmente si el prototipo fuera colocado en el mar. Para averiguar el valor escalado de k_r , se aplica la siguiente ecuación:

$$k_{\text{modelo}} = \frac{F \cdot \lambda^3}{x_l \cdot \lambda} = \frac{32560 \text{ N}}{5,32 \text{ m}} = 6120 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad [50]$$

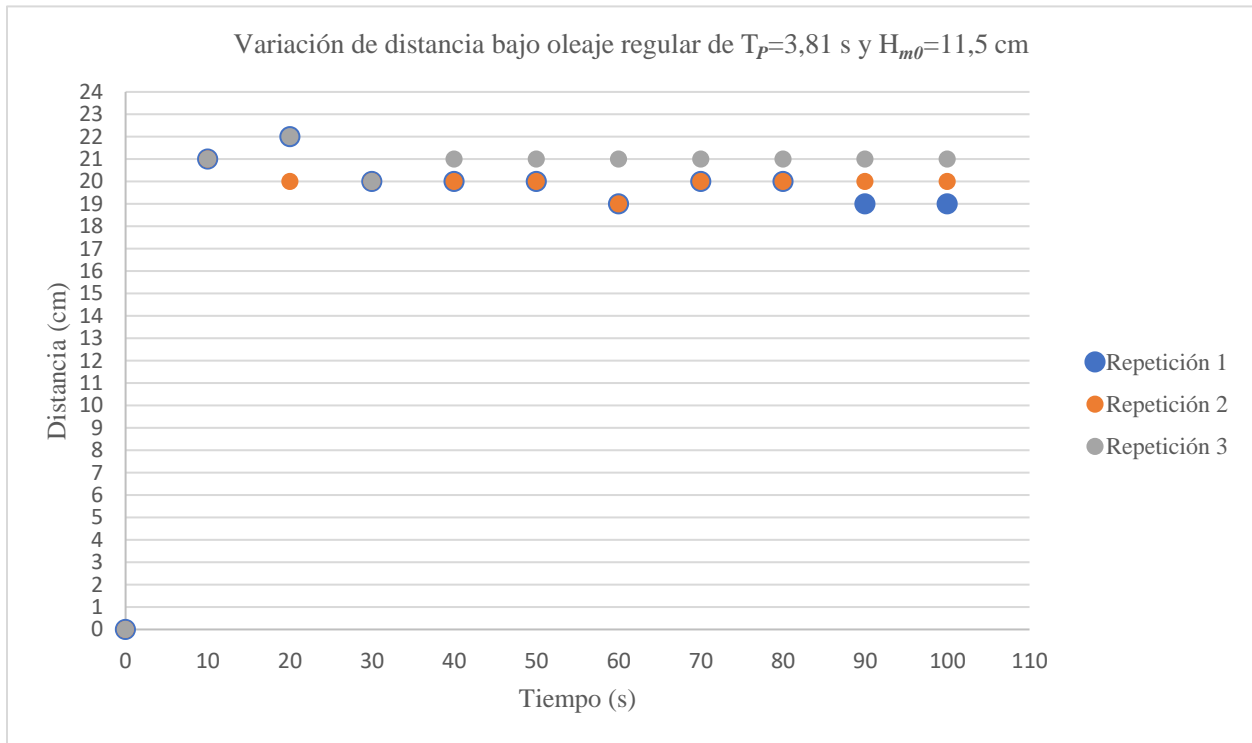
4.8. Comportamiento general de movimiento del flap en oleaje regular

Al realizarse la primera prueba, con una altura de ola de 0,15 m y un período de 3,82 s (escala modelo), el flap no se movió de manera óptima, esto porque no logró volver a su posición inicial de reposo y generar un movimiento oscilatorio constante, sino que quedó inmóvil en el punto más lejano al que podía llegar. Debido a esto, se considera que un oleaje de esta magnitud no es funcional para la generación de energía con este dispositivo en específico y puede causar daños en el modelo, por lo que se decide no realizar más pruebas con estas características de oleaje.

En las 3 repeticiones realizadas para cada una de las combinaciones de oleaje se observan distancias recorridas similares entre todos los períodos a lo largo del tiempo, como se observa en la Figura 42 a escala del modelo.

Figura 42

Variación de distancia para $T_p=3,82$ s y $H_{m0}=11,5$ cm según repetición



La figura anterior muestra de manera gráfica la mayor variación observada durante las pruebas en las distintas repeticiones, siendo esta de 2 cm entre las repeticiones 3 y 1 a los 20 s, y entre las repeticiones 3 y 1 a los 90 s y 100 s de iniciada la prueba. Para las otras mediciones de tiempo, las diferencias de distancia son menores a los 2 cm, por lo que se identifica un desplazamiento constante del modelo en las repeticiones realizadas.

La Figura 42 también demuestra que la distancia recorrida por el flap es poco variable a lo largo del tiempo para cada repetición. El único momento donde se observan valores un poco mayores es al inicio de la prueba, lo que es causado porque el agua está en calma antes de que esta inicie y no hay oscilaciones que limiten ese primer movimiento del flap.

En la Tabla 3 se muestran los valores de distancia promedio encontrados para cada movimiento del flap bajo la acción de oleaje regular en cada una de las 3 repeticiones realizadas. Además, se muestran los valores de desviación estándar asociados a cada distancia registrada para cada repetición.

Tabla 3*Distancia promedio recorrida por el flap en cada repetición de oleaje regular.*

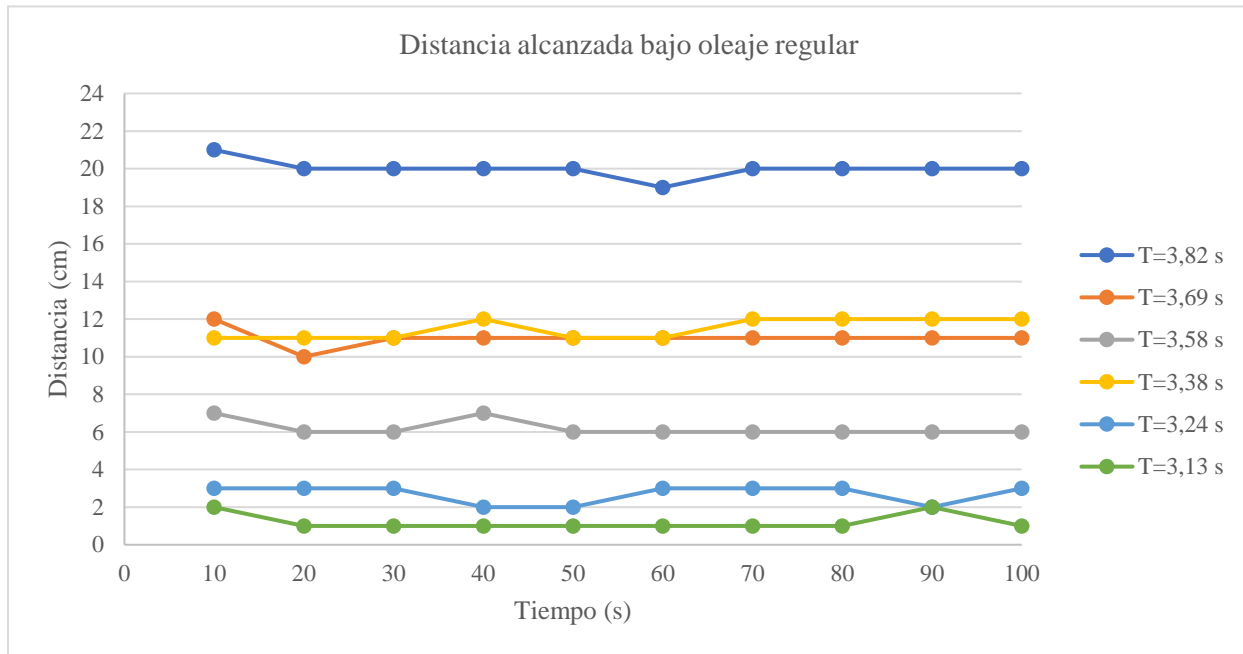
Período de ola (s)	Altura de ola (cm)	Distancia promedio repetición 1 (cm)	Desviación estándar promedio repetición 1 (cm)	Distancia promedio repetición 2 (cm)	Desviación estándar promedio repetición 2 (cm)	Distancia promedio repetición 3 (cm)	Desviación estándar promedio repetición 3 (cm)	Desviación estándar del promedio de las 3 repeticiones (cm)
3,82	11,5	20,0	0,943	20,0	0,471	21,0	0,471	0,577
3,69	7,5	11,0	0,471	11,0	0,471	11,0	0,000	0,000
3,58	5,0	6,10	0,568	6,20	0,422	6,40	0,516	0,153
3,38	11,5	11,3	0,823	11,5	0,527	12,1	0,568	0,416
3,24	7,5	2,60	0,516	2,70	0,483	2,90	0,738	0,153
3,13	5,0	1,70	0,483	1,20	0,422	1,40	0,516	0,252

En la Tabla 3 se puede observar que la similitud entre valores de distancia alcanzada por el flap se cumple para todos los valores de período y altura de ola experimentados. También se muestra que los valores de distancia promedio para cada uno de los períodos estudiados son muy cercanos entre sí, presentando desviaciones estándar muy cercanas al valor 0, lo que indica que todos los datos de distancia registrados son cercanos al promedio obtenido, por lo que se considera una desviación estándar baja. Además, se identificó que la mayor diferencia entre distancias promedio fue de 1 cm para el período de 3,82 s y mostrando una misma distancia promedio para las 3 repeticiones con un período de 3,69 s.

El flap recorre una mayor distancia bajo los efectos del oleaje con mayor período, aunque su altura de ola sea la misma, como lo demuestra también la Figura 43 al comparar los períodos de 3,82 s y 3,38 s, donde las mayores distancias alcanzadas por cada uno son 21 cm y 12,1 cm respectivamente. Este comportamiento también puede ser observado al comparar el período de 3,69 s con el de 3,24 s y el de 3,58 s con el de 3,13 s, presentando las parejas de períodos antes mencionadas la misma altura de ola (7,5 cm y 5,0 cm respectivamente), y demostrando que el flap presenta un mayor desplazamiento bajo los períodos mayores.

Figura 43

Distancias alcanzadas por el flap bajo distintos tipos de oleaje.



En la figura anterior se aprecia que las distancias más altas corresponden al período mayor, de 3,82 s con una altura de ola de 11,5 cm. Además, se aprecia que los tres períodos más altos están presentes en las 4 mayores distancias alcanzadas por el flap, lo que demuestra la importancia de períodos altos para el movimiento del dispositivo. A su vez, la combinación de período y altura más bajos resultó en el menor desplazamiento alcanzado por el flap.

A pesar de lo mencionado anteriormente, se debe resaltar la importancia que tiene la altura de ola sobre el movimiento del flap, puesto que, como lo demuestra la Figura 43 y la Tabla 3 es el período de 3,38 s con una altura de ola de 11,5 cm el que ocupa el segundo lugar en mayor desplazamiento del flap. Esto lo logra a pesar de ser apenas el cuarto período más alto, lo que pone en evidencia que la altura de ola también es un factor considerable para que el flap recorra mayores distancias.

La Tabla 3 y la Figura 43 resaltan que el movimiento del flap con los distintos tipos de oleaje se mantiene constante conforme avanza el tiempo. Las variaciones presentadas para una misma repetición se encuentran dentro de un rango de valores similares, presentando diferencias de 2 cm para los casos más altos, y presentan desviaciones estándar considerablemente bajas, siendo estas muy cercanas a 0 (0,943 cm es el valor más alto). Debido a que los valores son cercanos entre sí durante toda la duración de la prueba, se determina que conforme avanzó el tiempo no se detectó un aumento en las pérdidas de energía que causara un decrecimiento en la distancia recorrida por el modelo.

4.9. Determinación del estiramiento x_l de la liga

Para determinar la distancia que la liga se estira en cada repetición, se realiza un diagrama de la vista superior del modelo, tanto en su posición inicial de reposo, como en su posición al final de su distancia máxima recorrida durante cada ola (ver Figura 44). Para determinar la longitud inicial L_0 en la posición de reposo, es necesario utilizar el teorema de Pitágoras, ya que entre la liga y la estructura del modelo se forma un triángulo rectángulo, en el que dos de sus lados tienen longitudes conocidas. La siguiente ecuación muestra el cálculo de L_0 .

$$L_0 = \sqrt{(58 \text{ cm})^2 + (58 \text{ cm})^2} = 82,02 \text{ cm} \quad [51]$$

El objetivo final es calcular la longitud final de la liga L_f , de forma que al restarle el valor de L_0 , se obtenga el valor de estiramiento de la liga. Para determinar este valor, primeramente, es necesario conocer el valor del lado y , utilizando como hipotenusa el tubo derecho de la estructura, que, al ser igual al tubo de la izquierda, también tiene una longitud de 58 cm. Además, se utiliza la distancia d , que será igual a la distancia recorrida por el flap y será medida más adelante, por lo que este será un valor conocido. La ecuación para determinar el valor de y se muestra a continuación:

$$(58 \text{ cm})^2 = y^2 + d^2 \quad [52]$$

$$y = \sqrt{(58 \text{ cm})^2 - d^2} \quad [53]$$

Una vez conocido el valor de y , y utilizando nuevamente el teorema de Pitágoras, se procede a determinar el valor L_f , utilizando este último valor como la hipotenusa del triángulo, como se muestra en la siguiente ecuación.

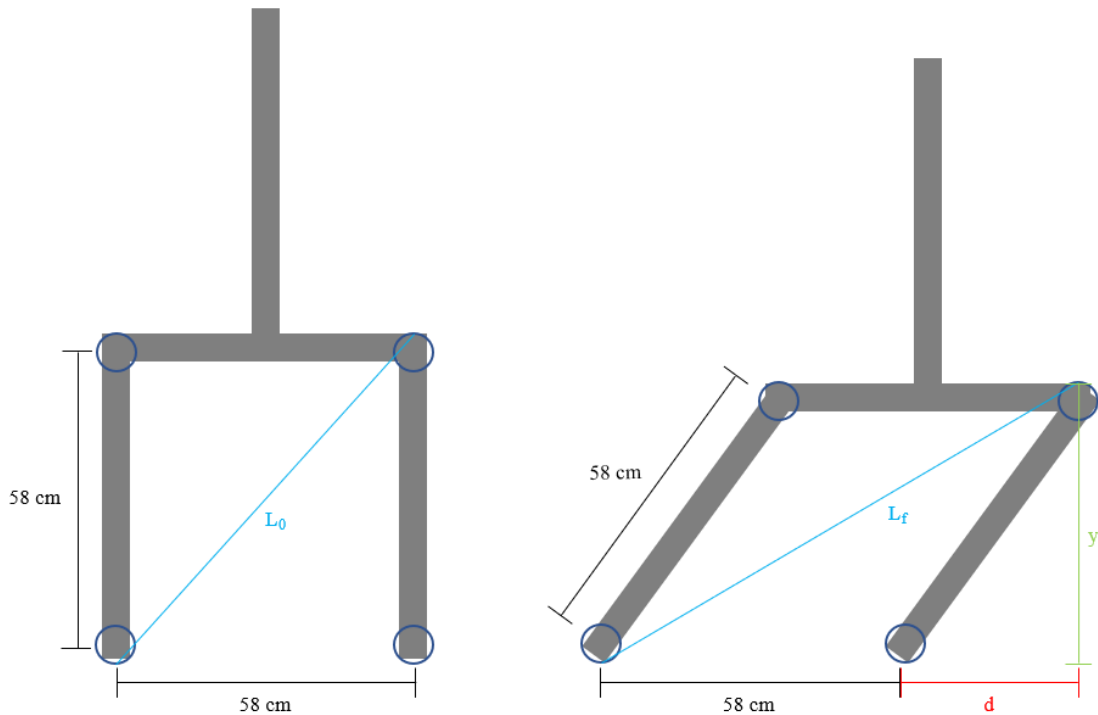
$$L_f = \sqrt{y^2 + (58 \text{ cm} + d)^2} \quad [54]$$

Al calcular, finalmente, el valor de L_f , se procede a determinar el estiramiento x_l que tiene la liga en cada repetición de oleaje, como lo muestra la ecuación mostrada a continuación:

$$x_l = L_f - L_0 \quad [55]$$

Figura 44

Determinación de estiramiento x_l de la liga



4.10. Determinación del potencial energético aprovechado por el flap en oleaje regular

A partir de las distancias promedio determinadas anteriormente según el movimiento del flap, se determina el potencial de energía que este puede brindar en su estado actual, escalando dichas distancias a tamaño prototipo para realizar los cálculos. Para esta sección se presentarán los resultados obtenidos a escala del prototipo y no del modelo, debido a que interesa conocer cuánta energía se aprovecharía con el dispositivo en un escenario a escala real 1:1.

Con la distancia d recorrida por el flap, la constante k_r y el estiramiento x_l de la liga es posible averiguar la energía que está siendo aprovechada por el dispositivo mediante la ecuación de trabajo mecánico, que se muestra a continuación:

$$W = F_{liga} \cdot d = (k_r \cdot x_l) \cdot d \quad [56]$$

Una vez que se obtiene el valor de energía en Joules mediante la ecuación anterior, se divide este resultado entre el período del oleaje al que está siendo sometido el modelo. Esto porque el movimiento del flap coincide con el paso de la cresta de la ola en cada período, y así se obtiene el potencial energético aprovechado por el dispositivo en Watts, como se demuestra en la ecuación 45.

Para poder determinar la eficiencia del dispositivo en cada escenario, se utiliza la ecuación 38 para calcular el potencial energético disponible en cada ola, y la ecuación 45 para determinar el

potencial energético aprovechado. En la Tabla 4 se muestran los potenciales energéticos teóricos y aprovechados, así como las respectivas eficiencias para cada período y altura de ola estudiados.

La eficiencia energética del dispositivo se calcula mediante la ecuación 54.

$$Eficiencia = \frac{Potencial\ energético\ teórico}{Potencial\ energético\ aprovechado} \cdot 100 \quad [57]$$

Tabla 4

Promedio de potencial energético aprovechado para cada oleaje regular (escala prototipo).

T_p (s)	H_s (m)	Potencial energético disponible (kW)	Potencial energético aprovechado (kW)	Eficiencia (%)
17,1	2,3	1,72E+03	5,17	0,30%
16,5	1,5	7,08E+02	2,20	0,31%
16,0	1,0	3,05E+02	1,22	0,40%
15,1	2,3	1,52E+03	3,78	0,25%
14,5	1,5	6,22E+02	0,66	0,11%
14,0	1,0	2,67E+02	0,27	0,10%

La tabla anterior muestra que el mayor potencial energético obtenido está dado por el oleaje con período de 17,1 s y la altura de ola de 2,3 m, seguido del oleaje con período de 15,1 s y altura de ola de 2,3 m. No obstante, se observa que la eficiencia no es directamente proporcional al potencial energético, ya que, la eficiencia más alta la presenta el cuarto potencial obtenido más alto. Además, se calcula que los menores potenciales están dados por las dos combinaciones de altura y período más bajas.

Según la tabla anterior, se puede determinar que los períodos altos son más favorables para la extracción de energía de las olas con este dispositivo, siendo los tres períodos más altos los que poseen un mayor porcentaje de eficiencia energética, que disminuye gradualmente cuando se alcanzan los tres períodos más bajos. La tabla muestra que, incluso el período de 15,1 s, que presenta el segundo potencial energético más alto, alcanza solamente un 0,25% de eficiencia, siendo este valor apenas el cuarto más alto de toda la tabla.

En general, la eficiencia obtenida bajo los distintos tipos de oleaje puede considerarse baja, aunque, al ser estos los primeros experimentos con este dispositivo en específico, existe mucho espacio de mejora para poder alcanzar mayores rendimientos. Analizando otros dispositivos, también de tipo cuerpo oscilante, y de los que se han realizado solamente experimentos o simulaciones en laboratorio, se pueden encontrar eficiencias de entre un 7% y un 15% (Aderinto y Li, 2019), por lo que también se observa que las eficiencias alcanzadas por este tipo de dispositivos en sus primeras fases no son demasiado altas y requieren optimización.

4.11. Comportamiento general de movimiento del flap bajo oleaje irregular

Para determinar el comportamiento del flap en las pruebas de oleaje irregular, sí se consideró necesario analizar cada movimiento del flap, (y no cada 10 segundos, como se realizó para el oleaje regular) como lo muestra gráficamente la Figura 45. Esto debido a que, al ser oleaje irregular, se espera que el movimiento que este tenga no sea constante en cuanto a distancia recorrida, por lo que las mediciones registradas serían muy variables. Además, en la Tabla 5 se muestran los valores promedio de distancias alcanzadas por el flap durante la duración de la prueba.

Figura 45

Distancia recorrida por el flap en las distintas repeticiones de oleaje irregular.

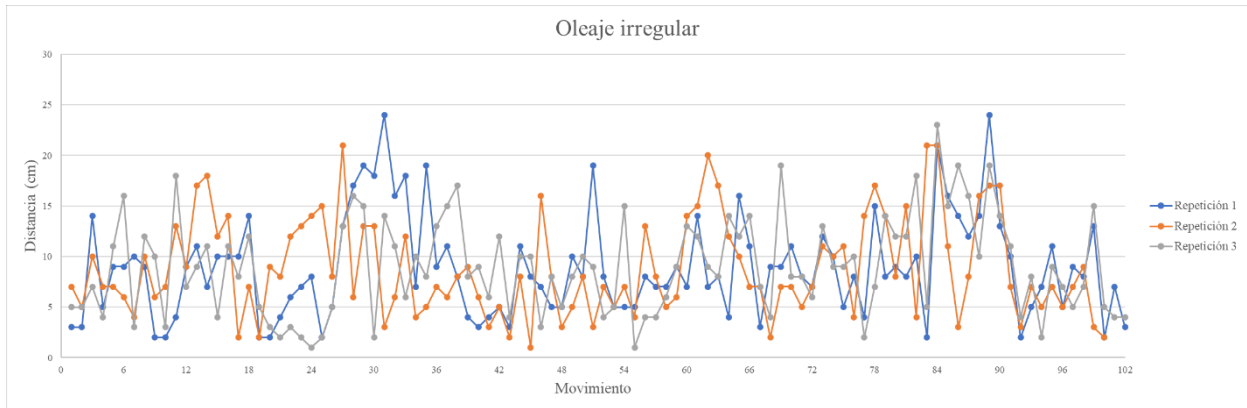


Tabla 5

Distancia promedio recorrida por el flap en cada repetición de oleaje irregular

Repetición	Distancia promedio (cm)
1	8,85
2	8,85
3	8,93

En la Tabla 5 se resalta el hecho de que los valores de distancia promedio son considerablemente cercanos, siendo iguales para la primera y segunda repetición, y presentando una diferencia de 0,08 cm respecto a la tercera repetición. Esto indica que, a pesar de haberse utilizado oleajes irregulares para estas pruebas, el movimiento general del flap se mantiene constante debido a que los parámetros iniciales para generar dichos oleajes son los mismos.

Los resultados mostrados previamente, en la Tabla 5 y Figura 45, permiten comprobar el funcionamiento del flap bajo variaciones constantes de oleaje, ya que este siguió registrando distancias proporcionales a las características cambiantes de oleaje que fue sometido. Además, ratifica el funcionamiento del modelo a lo largo del tiempo bajo condiciones de oleaje irregular, donde alcanzó distancias variables tanto al inicio de la prueba como al final de esta, indicando que no existió un factor externo al oleaje que limitara su movimiento conforme avanzó el tiempo de prueba.

4.12. Determinación del potencial energético aprovechado por el flap en oleaje irregular

Para determinar el potencial energético aprovechado por el dispositivo durante las pruebas de oleaje irregular, se utilizó la ecuación 53. La eficiencia de esta prueba puede determinarse al obtener el potencial energético teórico del oleaje mediante la ecuación 39, que es exclusiva para oleaje irregular.

Debido a que para las pruebas de oleaje irregular sí se midió cada movimiento del flap, en este caso no se calcula el promedio de energía, sino que se realiza una sumatoria de todos los valores y luego se divide entre los 6 minutos de duración de la prueba. Esto también resulta conveniente por el hecho de que, al ser oleaje irregular, el período de movimiento del flap es muy variable, lo que hace que un promedio no pueda ser dividido entre un período regular de oleaje.

En la Tabla 6 se muestran los valores de potencial energético obtenidos para las pruebas de oleaje irregular, así como la eficiencia obtenida en estas.

Tabla 6

Promedio de potencial energético aprovechado para cada oleaje irregular (escala prototipo).

Repetición	Potencial energético teórico (kW)	Potencial energético aprovechado (kW)	Eficiencia (%)
1	5,37E+05	7,12E+03	1,33%
2	5,37E+05	6,40E+03	1,19%
3	5,37E+05	6,93E+03	1,29%

Como se muestra en los resultados presentados en la tabla anterior, para la prueba de oleaje irregular se obtienen eficiencias muy similares en cada una de las tres pruebas realizadas, lo que indica un comportamiento constante del dispositivo incluso bajo escenarios de oleaje irregular. Además, las pruebas de oleaje irregular presentaron eficiencias más altas que las de oleaje regular, lo que destaca una parte positiva del sistema, siendo este tipo de condiciones a las que se sometería en un escenario real. Debido a este comportamiento observado, es posible que el dispositivo se beneficie de las distintas combinaciones de períodos y alturas que pueden presentarse bajo un escenario de oleaje irregular para mejorar su rango de movimiento.

Los valores de eficiencia obtenidos para el oleaje irregular, a pesar de ser más altos que los obtenidos para oleaje regular, se siguen considerando bajos. Como se mencionó anteriormente, existen diversos dispositivos en fases de experimentación que presentan eficiencias de entre 8% y 15%, lo que indica que estas también necesitan optimizarse para alcanzar eficiencias mayores que les permitan seguir avanzando en dichas fases experimentales. No obstante, existen otros dispositivos para aprovechar la energía undimotriz, que tienen más años de experimentación y optimización, que presentan eficiencias más altas y, aun así, no se encuentran en su etapa final de comercialización, puesto que sigue siendo necesario realizar pruebas a escala prototipo en condiciones reales de oleaje.

Entre estos dispositivos se puede mencionar el WaveRoller, que inició sus pruebas en 1999 y hasta el año 2007 desarrolló su dispositivo en escala prototipo. En el año 2019 instalaron su primer dispositivo en Portugal para seguir analizando su comportamiento y recopilando información, pero este sigue sin estar listo para su comercialización en el presente año 2023. Este convertidor de energía undimotriz alcanza eficiencias de entre un 25% y un 50% (WaveRoller, 2021).

Otro de estos dispositivos, el Pelamis, que fue uno de los pocos dispositivos en los que se hicieron esfuerzos importantes para su comercialización en el pasado, presenta apenas eficiencias de entre un 14% y un 21%, dependiendo de las condiciones a las que se exponga (Aderinto y Li, 2019). Estos datos indican que existen diversos dispositivos en etapas muy avanzadas con eficiencias no mayores a un 50%, lo que resalta el hecho de que la investigación en torno a la energía undimotriz debe seguir creciendo para alcanzar mejores resultados que permitan la viabilidad de este tipo de proyectos.

Sin embargo, alcanzando valores de eficiencia cercanos a un 10%, se pueden obtener resultados muy favorables en Costa Rica, tomando en cuenta que, en un estudio realizado por Brito (2013), se determinó que, aproximadamente un 17% de las necesidades energéticas del país podrían ser satisfechas al extraer solamente un 10% del potencial energético total existente en Costa Rica, según la demanda energética proyectada hasta el 2035.

En cuanto a posibles mejoras que podrían realizarse para aumentar la eficiencia de estos dispositivos, puede mencionarse el uso de materiales menos pesados para la construcción del dispositivo, disminuyendo así la fuerza necesaria para moverlo, y la implementación de bujes y rodamientos para facilitar la rotación de las partes que ejecutan esta acción.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los dispositivos de tipo flap resultan una opción adecuada para aprovechar las velocidades horizontales del agua presentadas en la costa del Pacífico de Costa Rica, principalmente cuando estos logran mantenerse siempre en posición perpendicular a la dirección de propagación de la ola y abarcan la mayor longitud posible de la columna de agua.
- Durante la construcción del modelo se determinó que el flap debe ser lo suficientemente rígido para que este no tenga un movimiento de cabeceo independiente al resto del dispositivo, sino que se mueva como una sola pieza en sincronía con toda la estructura que le sostiene.
- Las pruebas realizadas con oleaje regular demuestran que las distancias recorridas por el flap se mantienen similares durante el tiempo de prueba, lo que indica que, durante este tiempo, no aumentan las pérdidas de energía que ocasionen una disminución en la distancia recorrida.
- Para oleaje regular, la combinación de período y altura de ola con valores más altos resultó en un mayor desplazamiento del flap, mientras que la combinación de valores más bajos resultó en el menor desplazamiento alcanzado.
- Los resultados de oleaje regular resaltan la importancia de la altura de ola para la generación de energía y que esta última no se ve exclusivamente determinada por el período.
- La eficiencia energética para oleajes regulares del dispositivo es más baja para los tres períodos de ola menores, lo que indica que el modelo se beneficia principalmente de períodos altos.
- Las pruebas de oleaje irregular presentaron eficiencias más altas que las de oleaje regular, lo que destaca una parte positiva del sistema, ya que es a este tipo de condiciones a las que se sometería en un escenario real y resalta que el dispositivo se beneficia de las distintas combinaciones de oleaje.
- Las eficiencias en oleajes tanto regulares como irregulares se consideran bajas y podrían ser aumentadas mediante un diseño optimizado del dispositivo.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda utilizar rodamientos y bujes para las partes del modelo que tienen movimiento de rotación, ya que estas piezas mecánicas están diseñadas específicamente para facilitar la rotación entre dos cuerpos, por lo que la fricción que se da al utilizar este tipo de piezas es significativamente menor y facilitaría significativamente el movimiento del dispositivo.
- Se recomienda utilizar materiales más ligeros, pero resistentes, para construir el flap, de forma que su peso disminuya y se facilite su movimiento debido a la fuerza del oleaje.
- Es recomendable realizar un análisis estructural en el que se determinen otros aspectos que de esta índole que puedan estar limitando el movimiento rotacional del modelo.
- Se recomienda realizar un análisis estadístico de la constante k_r de la liga, donde se mida su estiramiento con distintos pesos para determinar si el valor de k_r cambia según el estiramiento registrado.
- Se recomienda realizar más pruebas con oleajes de mayor magnitud para determinar exactamente a partir de qué características de oleaje se presenta el fallo del dispositivo.
- Es recomendable realizar pruebas con ligas de mayor resistencia a la utilizada, de forma que el dispositivo pueda funcionar de manera adecuada con oleajes de mayores magnitudes.
- Se recomienda diseñar un mecanismo que permita inhabilitar el dispositivo de manera segura cuando se presenten condiciones de oleaje que puedan dañarlo.
- Es recomendable probar otras geometrías y tamaños de flap para así determinar cuál es la más eficiente para cada tipo de oleaje estudiado.
- Se recomienda incluir un arreglo experimental más detallado, donde se incluya una mayor cantidad de parámetros estadísticos que ayuden a definir de mejor manera los resultados obtenidos.

6. REFERENCIAS

- Aubry, J., Ahmed, H., Multon, B., Babarit, A., y Clément, A. (2012). Marine Environment and Energy Resources. En B. Multon. (Ed.), *Marine Renewable Energy Handbook*. ISTE-John Wiley and Sons.
- Aderinto, T. y Li, H. (2019). Review on Power Performance and Efficiency of Wave Energy Converters. *Energies*, 12(4329), 1-24.
- Aragón, E. (23 de abril de 2021). *Enel Green Power Chile instala el primer convertidor a escala completa de energía de olas en el país*. Energy News. <https://www.energynews.es/enel-green-power-chile-energia-olas/>.
- Agencia Internacional de la Energía [IEA]. (2020). *Ocean Power*. Recuperado el 16 de julio del 2021, de <https://www.iea.org/reports/ocean-power>.
- Brito, A. (2013). *Costa Rica. Determinación del Potencial de Energía Marina para Generación Eléctrica*.
- Centro Nacional de Control de Energía [CENCE] e Instituto Costarricense de Electricidad [ICE]. (2021). *Informe Anual 2021*.
- Centro Nacional de Información Geoambiental. (8 de junio de 2020). *Datos Oficiales sobre la superficie marina y terrestre de Costa Rica*. Recuperado el 17 de Junio de 2021 de <http://ceniga.go.cr/datos-oficiales-sobre-la-superficie-marina-y-terrestre-de-costa-rica/>
- Corrales, M. (2019). Evaluación de las ecuaciones para el cálculo de run up y run down mediante modelado físico bajo las condiciones típicas de oleaje en el litoral Pacífico costarricense. [Tesis de Maestría]. Universidad de Costa Rica

Dean, R. y Dalrymple, R. (1991). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. (Vol. 2). World Scientific.

Echávez, G. (1996). *Introducción a los modelos hidráulicos de fondo fijo y a la ingeniería experimental*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Enel. (23 de setiembre de 2019). *Enel Green Power Chile adquiere el primer convertidor a escala completa de energía de las olas para Chile*. Recuperado el 2 de enero de 2023, de <https://www.enel.cl/es/conoce-enel/prensa/press-enel-green-power-chile/d201909-enel-green-power-chile-adquiere-el-primer-convertidor-a-escala-completa-de-energia-de-las-olas-para-chile.html>

Enerdata. (2021). *Electricity production*. <https://yearbook.enerdata.net/electricity/world-electricity-production-statistics.html>.

Falcão, A. (2009). Wave energy utilization: A review of technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 899-918.

Garza, J. (29 de enero de 2020). *ICE incursionaría en energía marina en diez años*. La República. <https://www.larepublica.net/noticia/ice-incursionaria-en-energia-marina-en-diez-anos>.

Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas. (2000). *Documento de Referencia: Dinámicas*. Universidad de Cantabria.

Govaere, G., Alfaro, H. y Corrales, M. (2020). Wave characteristics on the Pacific coast of Costa Rica for energy production. *Unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y de Estuarios*

Govaere, G. (1997). *Acción del oleaje sobre estructuras marítimas no rebasables*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Iglesias, G., y Greaves, D. (2018). *Wave and Tidal Energy*. Wiley.

Instituto Costarricense de Electricidad [ICE]. (2015). *Costa Rica: Matriz eléctrica. Un modelo sostenible, único en el mundo*. https://www.grupoice.com/wps/wcm/connect/8823524c-7cc7-4cef-abde-a1f06e14da0e/matriz_folleto_web2.pdf?MOD=AJPERES&CVID=l8SK4gG

International Energy Agency [IEA] y Ocean Energy Systems [OES]. (2021). *Annual Report: An Overview of Ocean Energy Activities in 2020*.

Jupiter Hydro. (2022). *Jupiter Hydro Inc. Energy that doesn't cost the earth*. Recuperado el 10 de diciembre del 2022, de <https://jupiterhydro.com/>.

Lewis, A., y Estefen, S. (2012). Ocean Energy. En O. Edenhofer, R. Pichs y Y. Sokona (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153.010>.

Lizano, O. (2003). Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica. *Centro de Investigaciones Geofísicas [CIGEFI]*.

MacKay, D. (2016). *Sustainable energy without the hot air*. UIT Cambridge.

Moomaw, W., y Yamba, F. (2012). Renewable Energy and Climate Change. En O. Edenhofer, R. Pichs y Y. Sokona (Eds.), *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.

Nerzic, R., y Mazé, J. (2012). Marine Environment and Energy Resources. En B. Multon. (Ed.), *Marine Renewable Energy Handbook*. ISTE-John Wiley and Sons.

Shields, M., (2014). An Introduction to Marine Renewable Energy. En M. Shields y A. Payne (Eds.), *Marine Renewable Energy Technology and Environmental Interactions*. Springer.

Silva, R. (2005). Análisis y descripción estadística del oleaje. Instituto de Ingeniería, UNAM.

Tinoco, I. y López, H. (2014). *Ondas Superficiales en el Mar*.

Phillips, O. (1958). The equilibrium range in the spectrum of wind-generated waves, *Journal of Fluid Mechanics*.

Waters, R. (2008). *Energy from ocean waves*. Uppsala Universitet. www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A172943&dswid=7647

WaveRoller. (2021). *WaveRoller by AW-Energy*. Recuperado el 25 de julio del 2021, de <https://aw-energy.com/waveroller/>.

Weptos. (2021). *WEPTOS: Technology*. Recuperado el 10 de diciembre de 2022, de <http://www.weptos.com/>.

Wavepiston. (2023). *Competitive wave energy on islands*. Recuperado el 31 de enero de 2023, de <https://www.wavepiston.dk/>.

Zumbado, J. (2021). *Determinación del potencial teórico de energía undimotriz en la costa Pacífico norte de Costa Rica*. [Tesis de Licenciatura]. Universidad de Costa Rica.

APÉNDICES

Apéndice A. Construcción del modelo de dispositivo para captación de energía undimotriz.

Todos los tubos y uniones, tanto simples como tees roscadas, utilizadas en este modelo, son de hierro galvanizado y 1½" de diámetro. Las otras partes, hechas a partir de diferentes materiales, que fueron utilizadas, serán especificadas conforme se explique el proceso de manufactura.

El proceso de construcción inicia con el corte de las láminas de hierro negro que sirven para unir la estructura ya existente en el laboratorio con la del modelo. Debido a que la estructura ya existente en el laboratorio tiene una distancia entre centros de platina de 58 cm, se parte de esta distancia para dimensionar varias partes del modelo, como la separación que habrá entre estas dos láminas. Estas fueron cortadas con unas medidas de 13 cm de ancho por 13,5 cm de alto. Posteriormente, se le realizaron 4 agujeros de ¼", por donde entrarían los tornillos que fijarían la estructura del modelo con la del laboratorio. Esto se muestra en la Figura 46.

Figura 46

Agujeros en platina de hierro negro



Una vez que se tienen las láminas listas, se suelda un tubo de 45 cm de largo a cada una de ellas, como lo muestra la Figura 47. Esto se realiza con el objetivo de que estos tubos, colocados de forma vertical, sirvan como eje de rotación para otros dos tubos horizontales que serán los encargados del movimiento horizontal de la estructura.

Figura 47

Soldadura entre tubo de hierro galvanizado y lámina de hierro negro



Seguidamente, se realiza la operación de quitarle las roscas a las uniones, de forma que estas puedan ser utilizadas como collarines en los tubos verticales que van soldados a las láminas de hierro negro y sostienen la totalidad de la estructura. Este procedimiento permite que estas piezas se muevan libremente a lo largo del tubo. Esto fue realizado a 4 uniones comunes y 2 tees roscadas. Esta operación fue realizada en un torno, como lo muestra la Figura 48.

Figura 48

Eliminación de la rosca en las uniones que serán utilizadas como collarines



Posteriormente, los collarines hechos a partir de las tees roscadas, fueron soldadas en uno de sus lados a un tubo de hierro galvanizado de 60 cm de largo y 1½” de diámetro. Esta soldadura se puede apreciar en la Figura 49. A estos tubos se les realiza un agujero de ½” en el medio, con una fresadora, en su extremo libre (es decir, el extremo sin la unión soldada), con el fin de poder unirlo a otros tubos que serán mencionados posteriormente.

Figura 49

Soldadura entre tubo y collarín



Seguidamente, a cada uno de los 4 collarines restantes se le realizaron dos agujeros de 10 mm con una separación de 90° entre sí en una fresadora. Este procedimiento fue realizado para, posteriormente, emplear un macho para roscar y realizarle una rosca a cada agujero realizado, de forma que puedan entrar dos tornillos. Esta operación se realiza con el objetivo de que estas uniones, con dos tornillos en diferentes puntos de presión, se coloquen arriba y abajo del tubo soldado antes mostrado, y limiten el movimiento vertical de este, permitiendo solo rotación. Estos procedimientos pueden observarse en la Figura 50 y la Figura 51.

Figura 50

Agujeros en collarines



Figura 51

Rosca en collarines para entrada de tornillos



Después de este proceso, se realizaron dos roscas a dos tubos con el objetivo de poder enroscar estos a dos lados opuestos de una tee roscada, a la que posteriormente se le suelda un tubo en su agujero libre. A cada uno de los tubos roscados previamente, se les realiza un agujero en un extremo de $\frac{1}{2}$ ", separados a una distancia de 58 cm, que es la misma distancia entre los agujeros

realizados a los tubos que controlan el movimiento horizontal y a los que serán unidos mediante una barra roscada y tuercas para fijar su posición. Entre los dos tubos se coloca una arandela para evitar el contacto directo entre estos y distribuir uniformemente la carga.

Luego de esto, al tubo que se soldó a la última tee roscada mencionada, se le realizaron dos agujeros con a una distancia de 28 cm, esto para que entren dos barras roscadas de 20 cm de largo y $\frac{1}{2}$ " de diámetro, que serán las que sostienen al flap.

Para el flap, se utilizó una lámina de acero inoxidable de 100 cm de largo por 82 cm de ancho. Para darle mayor rigidez a este, se realizó un marco con angulares de hierro negro, fijados a la lámina mediante tornillos de 60 mm. Además, se le soldaron angulares desde su parte baja hasta la parte más alta, donde tiene su punto de sostén, para que su movimiento en el agua fuera más uniforme.