

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA
EL ARCHIPIELAGO DE LAS GALÁPAGOS**

**COMPONENTE: SINTONIZACIÓN Y PRUEBA DE CONCEPTO DE
UN CONVERTIDOR DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

JORDANY ESEQUIEL SEGOVIA SOLANO

jordany.segovia@epn.edu.ec

DIRECTOR: WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO

wilson.guachamin@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2023

CERTIFICACIONES

Yo, **JORDANY ESEQUIEL SEGOVIA SOLANO** declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JORDANY ESEQUIEL SEGOVIA SOLANO

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Jordany Esequiel Segovia Solano, bajo mi supervisión.

ING. WILSON IVAN GUACHAMIN ACERO, Ph.D.
DIRECTOR

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

ING. JOSÉ GERMÁN GALARZA
GRANDA, M.Sc.
REVISOR 1 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

ING. MIGUEL DARIO ORTEGA
LOPEZ, M.Sc.
REVISOR 2 DEL TRABAJO DE
INTEGRACIÓN CURRICULAR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Jordany Esequiel Segovia Solano

Ing. Wilson Iván Guachamin Acero, Ph.D.

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación se lo dedico:

A Dios, por darme la salud necesaria, las ganas para levantarme cada día de estos 5 años largos años de esfuerzo y sacrificio, además de su infinito amor y bondad.

A mis padres Fernando y Deisi, por todo el sacrificio que han hecho desde que nací, por tener confianza en mí, por ser mi ejemplo de perseverancia y demostrarme que el rendirse no existe.

A mis hermanas Lizbeth y Lorely, por apoyarme siempre y estar presente en todo momento.

A mi enamorada Diana, por estar conmigo en los momentos cuando sentía que todo va mal, por recordarme lo capaz que puedo llegar a ser.

A mi perrito halla en el cielo Doky, por desvelarse conmigo en esas noches interminables, a mi perrito Bruno por ser mi paño de lágrimas.

AGRADECIMIENTO

Agradecer infinitamente,

A mis abuelos Augusto y Delia, por ser un apoyo fundamental y brindar su granito de arena en toda mi formación.

A mi tutor de este trabajo de titulación Wilson Guachamin, por la paciencia que ha tenido, sus inmensas e interminables ganas de enseñar y por demostrarnos que las cosas por más difíciles que parezcan con dedicación y empeño todo es posible.

A todos mis profesores, que han estado ahí desde que entre al jardín de niños hasta ahora que culmino este capítulo en vida, mismos que han aportado con su granito de arena para mi formación a nivel personal, académica, y profesional.

A Luis y Josselyn, mis mejores amigos por demostrarme siempre que a pesar de no ser hermanos de sangre, si lo somos de corazón.

A Marcelo, por estar ahí con su apoyo desde el primer día de prepo, por ser ese amigo incondicional en todo momento y demostrarme que todo en esta vida con humildad y sinceridad es mejor.

A mis amigos, Joaquín, Josué, Sebastián, Mireya, por todos esos momentos inolvidables y ser ese pilar para seguir adelante.

Tabla de contenido

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del componente desarrollado.....	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Alcance.....	2
2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	3
2.1 Tipos de convertidores de energía undimotriz.....	3
2.2 Espectro de oleaje.....	5
2.3 Parámetros físicos del sistema WEC.....	7
2.3.1 Parámetros físicos del elemento flotante.....	7
2.3.2 Altura metacéntrica.....	7
2.3.3 Periodo natural del elemento flotante principal.....	9
2.3.4 Periodo natural del mecanismo tipo WEC.....	10
2.3.5 Masa estructural mínima en elemento sumergido.....	13
2.3.6 Análisis estructural en aletas.....	14
2.3.6.1 Posición de las aletas.....	14
3 CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	17
3.1 Experimentación del perfil hidrodinámico.....	17
3.2 Obtención del coeficiente de arrastre.....	19
3.3 Proposición de alternativas para la modificación del periodo natural (T_n), producido por el movimiento de rolido en el mecanismo de tipo WEC.....	22
3.3.1 Periodo natural del elemento flotante (T_{nB}).....	22
3.3.2 Periodo natural de mecanismo tipo WEC.....	23
3.4 Diseño para construcción de modelo preliminar a escala de mecanismo tipo WEC.....	25
3.4.1 Elección de material para construcción.....	25
3.4.2 Inclusión de peso en modelo a escala.....	25
3.5 Prueba de concepto.....	27
4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
4.1 Resultados.....	28

4.2	Ejemplo de cálculo	31
4.3	Conclusiones.....	34
4.4	Recomendaciones.....	34
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35
	ANEXOS.....	36

o

RESUMEN

En la actualidad existen diversos dispositivos que permiten la conversión de energía proveniente de las olas, sin embargo, ninguna de estas opciones prueba ser eficiente porque su frecuencia natural de oscilación no coincide debido a que generalmente el periodo natural del dispositivo es inferior al periodo pico característico de las olas, de manera que no se logra llegar al estado de resonancia. Como solución a este problema, en el presente trabajo se propone un dispositivo para la transformación de energía undimotriz (WEC), basado en el movimiento de rolido.

Para esto, a un elemento flotante (barcaza) se incluye dos estructuras submarinas (una en cada lado), lo que aumentará el momento de inercia de masa y por tanto será viable el incremento del periodo natural.

Con el fin de ilustrar la solución propuesta se realiza un análisis numérico preliminar y posteriormente una prueba de concepto en escala 1:100. Los resultados preliminares muestran que el periodo natural para el elemento flotante (0.30 metros de largo y 0.20 metros de ancho) es de 0.86 segundos, mientras que al añadir los elementos sumergibles (0.10 m de radio y 0.12 metros de altura) el periodo natural aumenta a los 2.80 segundos.

A través de este trabajo, este análisis y prueba de concepto permitirán diseñar de mejor manera dispositivos más eficientes y necesarios para el problema energético mundial.

PALABRAS CLAVE: elemento flotante (barcaza), elementos sumergibles, WEC, periodo natural, resonancia, prueba de concepto.

ABSTRACT

Currently there are several device concepts that allow the conversion of waves into mechanical energy. However, none of these options proves to be efficient because their oscillation frequency does not coincide with that one of the waves. In fact, the natural period of the device is generally lower than that of waves, so that, it is not possible to reach a resonance state. As a solution to this problem, a wave energy conversion (WEC) device based on the roll motion is proposed.

For this, two underwater structures, one on each side of a vessel, can increase the mass moment of inertia of the barge and thus, it's the natural period.

Preliminary results show that the roll natural period for a scale model of a vessel (0.30 m long and 0.20 m wide) is 0.86 seconds, while adding the subsea conical structure (0.10 m radius and 0.12 m height) increases the natural period to 2.80 seconds.

The analysis and proof of concept conducted in this work to better design and more efficient devices, which is necessary at a local and global scale.

KEYWORDS: barge, subsea, WEC, natural period, resonance, proof of concept.

1 CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del componente desarrollado

El siguiente trabajo tiene como objetivo la realización de una prueba de concepto práctica de un convertidor de energía undimotriz (WEC) a un modelo propuesto en el proyecto CEDIA I+D+I-XVII-2022-16-WEC GALAPAGOS, con el fin de mostrar que es posible la implementación de un dispositivo de estas características en el archipiélago de las Galápagos.

El componente de este trabajo incluye la construcción de un modelo a escala (1:100) basado en el diseño preliminar en escala real (1:1).

En la Figura 1 se muestra el dispositivo WEC, el mismo consta de un flotador (barcaza), que tiene un periodo natural de rolido bajo en comparación con las olas características del archipiélago de las Galápagos. El periodo natural del dispositivo se puede incrementar hasta que coincida con el periodo pico que tienen las olas (necesario para obtener resonancia). En este trabajo el cambio en el periodo natural del rolido se consigue mediante un dispositivo pasivo que consiste en dos elementos sumergibles con perfil hidrodinámico (forma de cono), mismo que será conectado con el elemento flotante mediante un cable a través de una polea y a una distancia (r) de separación. Cada uno de los elementos posee: masa estructural, masa del líquido atrapada dentro del dispositivo (m_a) y la masa añadida en el perfil (m_{at}). Las aletas permiten un perfil hidrodinámico al producirse movimiento vertical hacia abajo del cono. En contraste cuando el movimiento sea hacia arriba las aletas se deforman y contribuyen al arrastre del elemento sumergido. Esto es necesario para estabilizar el movimiento de rolido dentro de rangos aceptables.

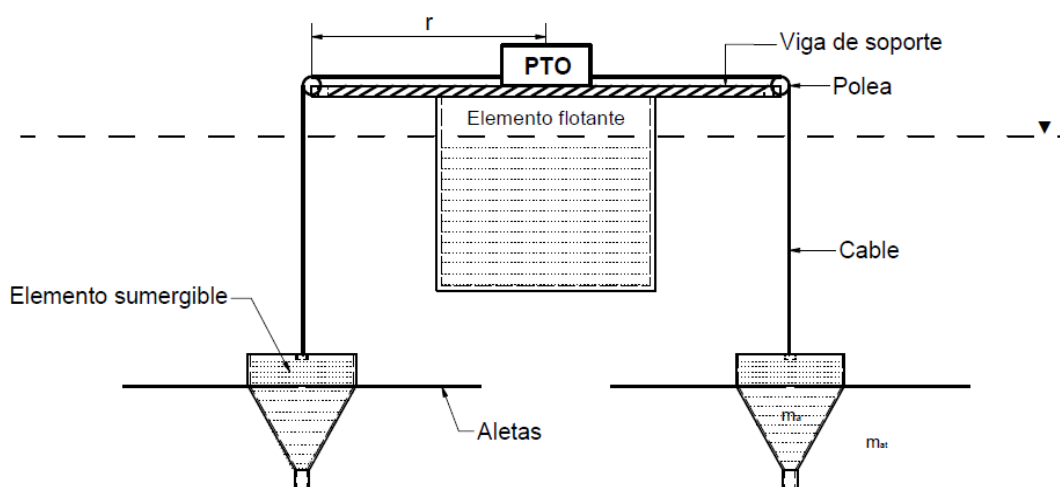


Figura 1. Esquema dispositivo WEC

1.2 Objetivo general

Sintonización y prueba de concepto de un convertidor de energía undimotriz.

1.3 Objetivos específicos

1. Sintonizar el periodo natural de un convertidor de energía undimotriz basado en movimiento de rolo.
2. Elaborar un modelo a escala que permita realizar las pruebas de concepto.
3. Contribuir al desarrollo de una publicación científica.

1.4 Alcance

El presente trabajo se limita al diseño y dimensionamiento preliminar de un mecanismo tipo WEC basado en rolo, para cambiar la frecuencia natural a la correspondiente del pico del espectro de oleaje para tener un sistema en resonancia con las olas, esto se va a demostrar mediante la construcción de un modelo a escala (1:100).

Este proyecto incluye la sintonización preliminar de un convertidor de energía undimotriz en escala 1:100, mismo que permitirá realizar la prueba de concepto.

El trabajo no incluye el diseño estructural de los componentes, ni del sistema encargado de la transformación de energía que forman parte del dispositivo tipo WEC.

2 CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Tipos de convertidores de energía undimotriz

Los dispositivos de generación de energía undimotriz son nuevas invenciones tecnológicas creadas con la finalidad convertir energía proveniente de las olas del mar en electricidad, para lo cual se sigue un proceso mecánico y de conversión (proceso electromecánico), como se puede observar en el esquema de la Figura 2.

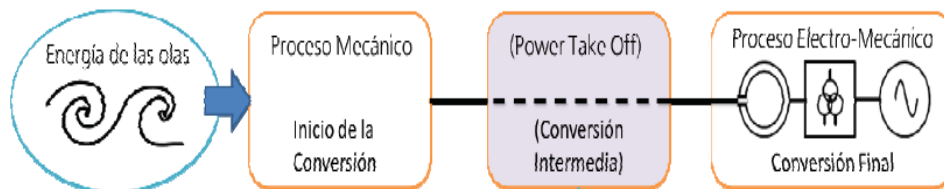
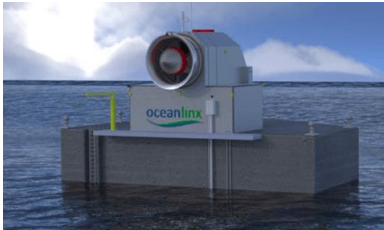




Figura 2. Esquema de conversión de energía undimotriz. Fuente:[1]

Se pueden clasificar por la profundidad del océano, el sistema de conversión de energía y el principio de funcionamiento. En lo que se refiere al principio de funcionamiento de los convertidores de energía es conveniente clasificar en dispositivos basados: en movimiento oscilante, por rebosamiento y columnas de agua oscilante (CAO).

Los dispositivos fundamentados en CAO están basados en el movimiento de flujo de aire introducido por movimiento oscilatorio en la superficie de agua provocado por el oleaje. En la Tabla 1, se muestra algunos de los mecanismos y prototipos que se han construido basados en CAO.




Tabla 1. Mecanismos de CAO



<p style="text-align: center;">Oceanlinx MK</p> <ul style="list-style-type: none"> • Superficie de 100 m², • 250 kW de potencia 	 <p style="text-align: center;">Figura 3. Oceanlinx MK1 Fuente:[2]</p>
<p style="text-align: center;">Sperboy</p> <ul style="list-style-type: none"> • 10-20 km alejado de costa, • 1MW de potencia, • Costo de producción estimado en 64 y 178 \$/MWh 	 <p style="text-align: center;">Figura 4. Sperboy. Fuente: [3]</p>

<p style="text-align: center;">OE Buoy</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potencia nominal de 1MW, • Basado en boya de conducto doblada hacia atrás (BBDB) 	 <p style="text-align: center;">Figura 5. OE Buoy. Fuente: [4]</p>
---	---

Para los dispositivos cuya operación se basa en la captación de movimientos oscilantes (oscilación vertical, cabeceo, oleada, balanceo, alabeo o roldo), mismo que se da por la acción del oleaje en los elementos fijos (barcaza) y móviles (elementos sumergidos), esta energía undimotriz va a ser transformada por un mecanismo de conversión en energía eléctrica. En la Tabla 2, se mencionan los principales dispositivos basados en este principio de operación.

Tabla 2. Dispositivos basados en movimientos oscilantes

<p style="text-align: center;">Pelamis</p> <ul style="list-style-type: none"> • Potencia global de 750 kW, • Aprovecha oscilación vertical y de balanceo, • Aproximadamente 80% de conversión del proceso. 	 <p style="text-align: center;">Figura 6. Pelamis Fuente: [5]</p>
<p style="text-align: center;">Power Buoy</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boya flotante y cilindro sumergido, • Potencia nominal de 150 kW, • Elevación de tensión entre 600 V a 11 kV. 	 <p style="text-align: center;">Figura 7. Power Buoy Fuente: [6]</p>
<p style="text-align: center;">OWEC</p> <ul style="list-style-type: none"> • Trabaja en zonas de aguas profundas y lejos de límites costeros, • Dispositivos modular con absorción puntual. 	 <p style="text-align: center;">Figura 8. Dispositivo OWEC Fuente: [1]</p>

<p style="text-align: center;">WEC Hiperbárico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Boya unida a estructura dando oscilación, • Empleo de acumulador hidroneumático y cámara hiperbárica. 	 <p style="text-align: center;">Figura 9. WEC Hiperbárico Fuente: [1]</p>
<p style="text-align: center;">Waveberg</p> <ul style="list-style-type: none"> • 100- 300 kW de potencia, • Costo de fabricación cercano a los \$ 200000 	 <p style="text-align: center;">Figura 10. Waveberg Fuente: [1]</p>

En la categoría de los convertidores de energía undimotriz (WEC) oscilantes, el problema es que estos tienen que entrar en resonancia con las olas, en el presente trabajo se muestra una solución, misma que basa su funcionamiento en cambiar el periodo natural del dispositivo.

2.2 Espectro de oleaje

Para llegar a resonancia se debe igualar el periodo natural del elemento flotante al periodo en el pico del espectro de oleaje. En este trabajo, el estudio de las características de las olas en el archipiélago de las Galápagos es necesario.

La manera más idónea de representar las olas físicamente es asemejándolas a ondas, de esta manera se las puede caracterizar por su altura, dirección y frecuencia, siendo la altura la medida entre la cresta y el valle, la dirección es de propagación de la ola y periodo es el tiempo que ha transcurrido entre olas, por ejemplo tiempo entre crestas.[7]

Basado en el estudio propuesto por Guachamin. W y otros [8], en la Figura 11(a) se puede observar los 3 principales sistemas de oleaje que rodean la zona. Asimismo en la Figura 11(b) se muestra que la altura significativa (H_s) para un sistema de olas están dentro de un rango comprendido entre 1 y 3.5 metros.

Mensualmente la altura significativa varía respecto a los diferentes sistemas de olas, siendo el primer sistema el de mayor energía, tal como se indica en la Figura 11(c).

Finalmente, en la Figura 11(d) se puede encontrar un ejemplo característico para la zona de la isla Isabela en el Archipiélago de Galápagos con los tres componentes del sistema.

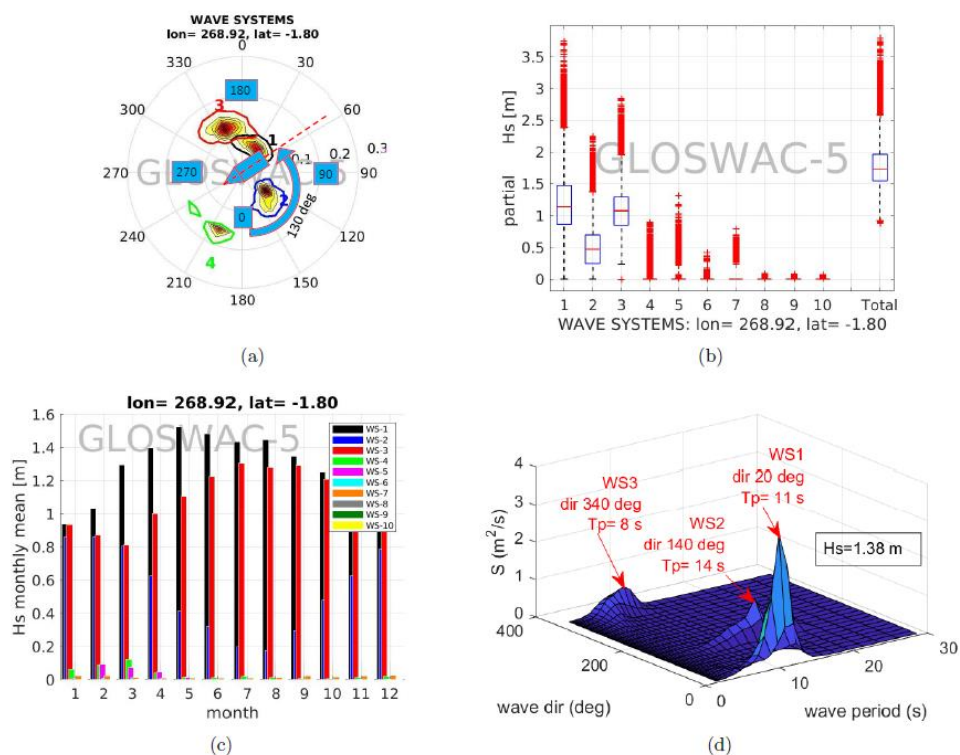


Figura 11. Sistemas de olas y espectros de oleaje para Galápagos (-1.8°N, 269°O). (a) sistemas de oleaje; (b) altura significativa (Hs); (c) variación de Hs mensualmente; (d) Espectro típico para isla Isabela. Fuente: [8]

Desde enero de 1979 hasta diciembre del 2016, se han recuperado datos de espectros de onda de la base de datos del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de rango medio (ECMWF), mismos que se resumen en la Figura 12, donde se observa que los estados de mar más comunes corresponden a una altura significativa (Hs) de 1.5 m para un periodo natural (Ts) de 13 s.

Hs (m)	Tp (s)													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0.5	0	0	0	4	21	11	20	26	17	0	7	4	0	0
1.0	92	280	346	417	719	3018	5506	5086	3491	0	1957	917	0	285
1.5	49	128	523	1485	1592	2329	11328	19391	14747	0	8401	3489	0	1079
2.0	0	0	20	216	814	655	764	4436	8091	0	4245	1561	0	406
2.5	0	0	0	0	14	131	78	127	789	0	993	388	0	69
3.0	0	0	0	0	0	6	5	11	27	0	103	85	0	19

Figura 12. Diagrama de dispersión para Galápagos (-1.8°N, 269°O). Fuente: [8]

El presente trabajo tendrá como lugar para la prueba de concepto una piscina, se asume que este medio presenta condiciones de oleaje típicas del Lago San Pablo ubicado en la provincia de Imbabura, donde la altura significativa (H_s) oscila los 0.35 m y el periodo natural está en el rango comprendido entre 1.3 a 2.6 s. [9]

2.3 Parámetros físicos del sistema WEC

Una vez que se han estudiado las características del medio en que se va a realizar la prueba de concepto para el mecanismo de transformación de energía undimotriz (WEC). En el presente trabajo se posibilita el estudio de los parámetros físicos que tendrán los componentes del mecanismo.

2.3.1 Parámetros físicos del elemento flotante

En la Figura 13, se muestra un esquema con las vistas frontal (a) y lateral (b), los parámetros geométricos: largo de la barcaza (l), ancho de la barcaza (b) y altura de la barcaza (h).

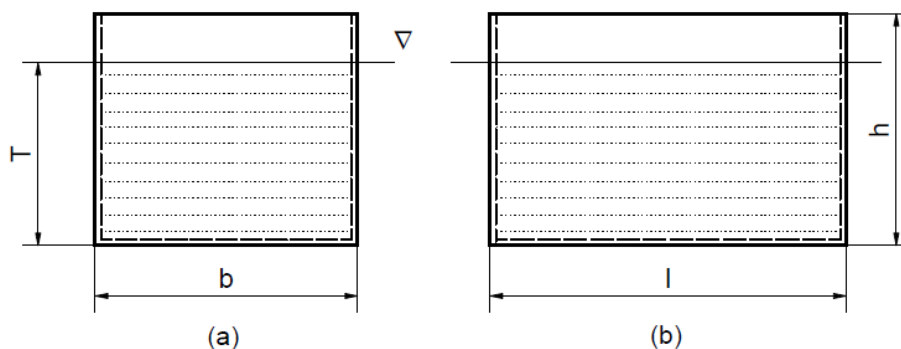


Figura 13. Parámetros geométricos de la barcaza Fuente: propia.

Definidos estos parámetros se obtiene el volumen desplazado (∇) con la aplicación de la ecuación (1).

$$\nabla = T \cdot b \cdot l$$

Ecuación 1. Volumen desplazado para el elemento flotante

Es así como se definirá y aplicará el concepto de altura metacéntrica (\overline{GM}) en el elemento flotante del dispositivo WEC.

2.3.2 Altura metacéntrica

Al trabajar con un dispositivo flotante, el dimensionamiento es fundamental; por lo tanto, se introduce el concepto de altura metacéntrica (\overline{GM}), misma que se define como la altura mínima posible para que el barco tenga estabilidad y que permita el estado de recuperación provocado por el movimiento de las olas.

En la Figura 14, se muestra una vista frontal de la barcaza con los parámetros necesarios para la obtención de la altura metacéntrica (\overline{GM}). G representa al centro de masa (centroide) en donde se concentra todo el peso de la estructura, en la ecuación (2) se muestra la manera de obtener este:

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$$

Ecuación 2. Centroide para elemento flotante

En donde:

y_i , representa la altura de cada pared que compone el elemento flotante,

m_i es la masa estructural de cada una de las paredes que forma el elemento flotante.

B es el centro de flotación, determinado por el volumen de la parte sumergida, así surge el concepto de calado (T), representa a la altura medida desde la superficie marítima hasta el punto más bajo de la barcaza (K), esto se muestra en la ecuación (3).

$$B = \frac{T}{2}$$

Ecuación 3. Centro de flotabilidad para elemento flotante

Finalmente, el metacentro (M) es el punto de intersección en donde las fuerzas de flotabilidad horizontales y verticales van a tender a encontrarse. La ecuación (4) define la altura metacéntrica \overline{GM} de la barcaza con paredes laterales paralelas.

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG}$$

Ecuación 4. Altura metacéntrica de elemento flotante

Donde:

$$\overline{BM} = \frac{I_T}{\nabla} = \frac{1/12 l \cdot b^3}{l \cdot T \cdot b}$$

Ecuación 5. Parámetro físico \overline{BM}

Siendo:

I_T el momento de inercia geométrico para el elemento flotante,

l el largo del elemento flotante y,

b el ancho del elemento flotante.

$$\omega_{nB} = \left(\frac{\rho_{liq} \cdot g \cdot \nabla \cdot \overline{GM}}{I_B} \right)^{0.5}$$

Ecuación 8. Frecuencia natural del elemento flotante

Finalmente, con la ecuación (9) se obtiene el periodo natural para el elemento flotante (T_{nB}).

$$T_{nB} = \frac{2\pi}{\omega_{nB}}$$

Ecuación 9. Período natural del elemento flotante

2.3.4 Período natural del mecanismo tipo WEC.

La Figura 1 muestra el esquema del mecanismo tipo WEC a escala (1:100), en el mismo se evidencian los elementos sumergidos de forma cónica, cuya función es aumentar el momento de inercia del elemento flotante y por tanto su periodo natural.

En la Figura 15, se muestra un esquema de la estructura del elemento sumergido, donde h_1 , h_2 , h_3 , d_a y d_b son: la altura del cilindro superior, altura del cono truncado, altura del cilindro inferior, diámetro de cilindro superior y diámetro de cilindro inferior, respectivamente.

El rolido afecta al mecanismo tipo WEC, con el afán de disminuir este movimiento y de mantener la tensión necesaria para el enlace entre el elemento flotante y los elementos sumergidos, se agregó un número determinado de aletas, mismas que siguen el ángulo de inclinación que tiene el cono.

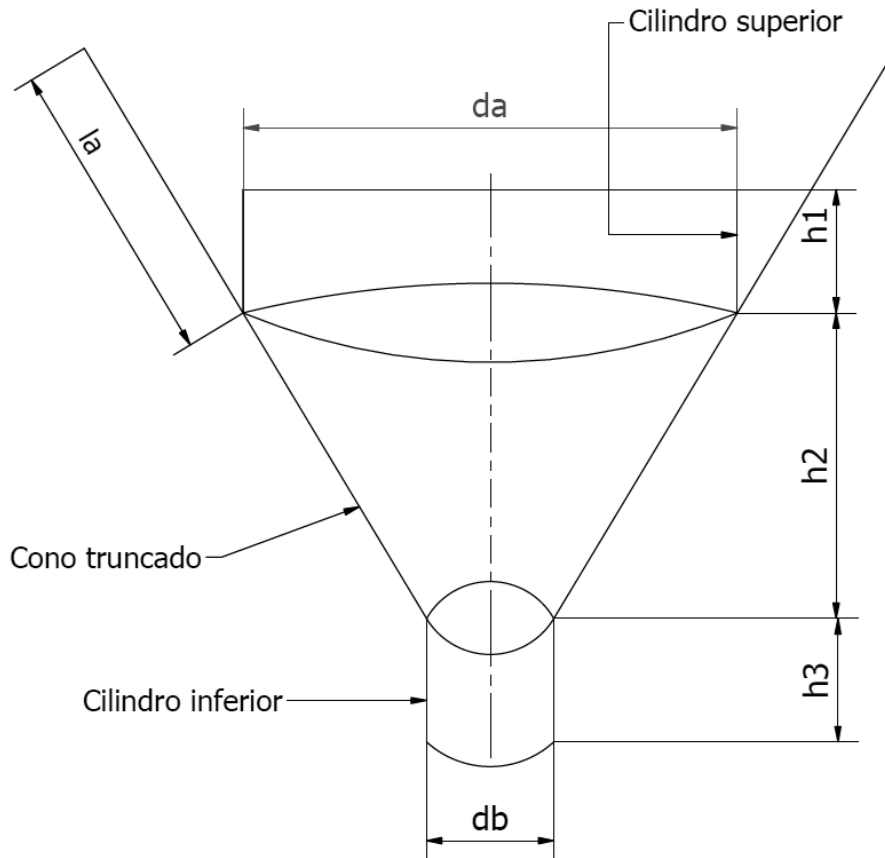


Figura 15. Esquema de elemento sumergido Fuente: propia.

El elemento sumergido tiene una masa estructural (m_E), misma que se puede obtener con la ecuación (10). Es importante mencionar que para las secciones que constituyen las altura h_1 , h_2 y h_3 , el elemento es hueco.

$$m_E = \rho_{PLA} \cdot V_T$$

Ecuación 10. Masa estructural para elemento a sumergir

Donde:

$$\rho_{PLA} = 1240 \left[\frac{kg}{m^3} \right] [11]$$

V_T es el volumen estructural.

En el elemento sumergido existe masa atrapada (m_a), se puede visualizar en la Figura 1, y es posible obtener con la ecuación (10.1).

$$m_a = \rho_{liq} \cdot V_{aT}$$

Ecuación 10.1 Masa atrapada del elemento sumergido

Siendo:

V_{aT} , el volumen del fluido atrapado dentro de la estructura hueca

La ecuación (11) muestra que en el presente trabajo se asume el 40% de la masa atrapada en el elemento sumergido (m_{at}) como la masa añadida generada en el perfil hidrodinámico.

$$m_{at} = 0.40m_a$$

Ecuación 11. Masa añadida al elemento sumergido

De esta manera, la ecuación (12) muestra la obtención de la masa total de cada uno de los objetos sumergidos (m_T).

$$m_T = m_E + m_a + m_{at}$$

Ecuación 12. Masa correspondiente al elemento sumergido

Dando como resultado el momento de inercia de masa para el mecanismo WEC (I_{BP}), misma que se traduce en la ecuación (13).

$$I_{BP} = I_B + n_p(m_T \cdot r^2)$$

Ecuación 13. Inercia de masa para el mecanismo WEC.

Donde,

r es la distancia mínima de separación entre elementos sumergidos, ver Figura 1.

Luego de obtener el momento de inercia de masa para el mecanismo WEC (I_{BP}) es posible obtener la frecuencia natural (ω_{nBP}) con ayuda de la ecuación (14).

$$\omega_{nBP} = \left(\frac{\rho_{fluido} \cdot g \cdot V_{cpo} \cdot \overline{GM}}{I_{BP}} \right)^{0.5}$$

Ecuación 14. Frecuencia natural para el mecanismo WEC.

Obtenida la frecuencia natural del mecanismo WEC, se alcanza el periodo natural modificado (T_{np}) con la ecuación (15).

$$T_{np} = \frac{2\pi}{\omega_{nBP}}$$

Ecuación 15. Periodo natural para el mecanismo WEC

2.3.5 Masa estructural mínima en elemento sumergido

El periodo natural del dispositivo WEC se modifica de modo que pueda igualar o superar el periodo pico característico de las olas (estado de resonancia), cuando aumenta el momento de inercia de masa, mediante la inclusión de aletas en el elemento sumergido. A velocidad máxima, al considerar el caso concreto cuando la fuerza inercial (F_i) tiene un valor de cero, la tensión (T) también puede ser cero si la fuerza de arrastre (F_D) es igual al peso sumergido (W_s). Por lo tanto, existe un mínimo de peso sumergido que evita la pérdida de tensión en el cable. En la Figura 16(a), se muestra un diagrama de cuerpo libre en donde la estructura sumergida tiene un movimiento y aceleración descendente, aquí la fuerza de arrastre debe ser mínima, mientras que en la Figura 16(b), se observa el diagrama de la estructura con sus fuerzas cuando el movimiento es ascendente y su aceleración descendente, aquí el arrastre debe ser máximo.

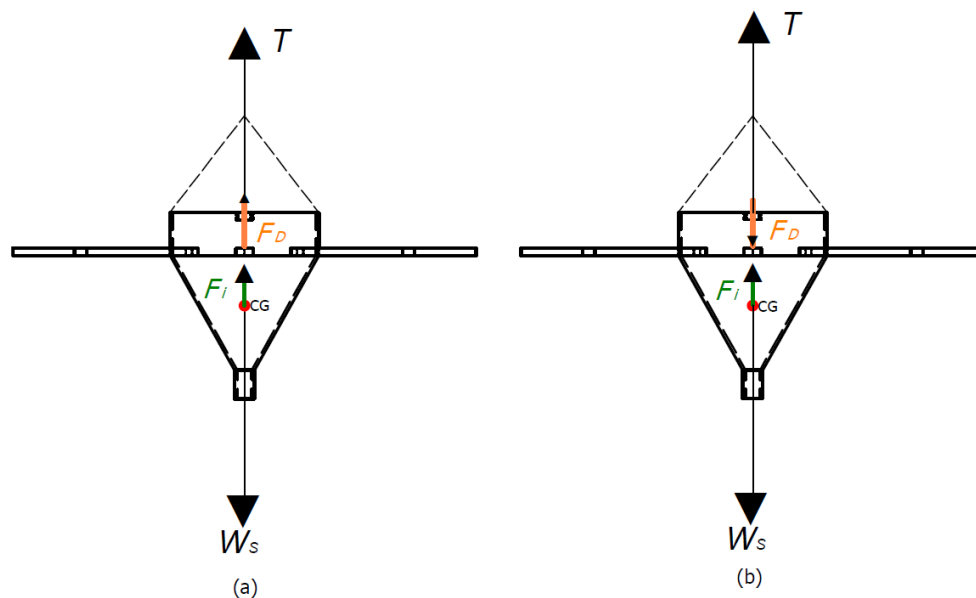


Figura 16. Diagrama de cuerpo libre. (a) Elemento moviéndose hacia abajo y acelerando hacia abajo; (b) Elemento moviéndose hacia arriba y acelerando hacia abajo Fuente: propia.

La fuerza de arrastre (F_D) se puede aproximar por medio de la ecuación (16).

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho_{fluido} \cdot A \cdot v^2$$

Ecuación 16. Fuerza de arrastre para elementos sumergidos

Donde:

C_D es el coeficiente de arrastre,

A es el área transversal sometida a oposición,

v es la velocidad del movimiento relativa al agua

2.3.6 Análisis estructural en aletas

2.3.6.1 Posición de las aletas

En la Figura 17, se detalla un esquema que muestra la posición de las aletas: cerradas cuando el elemento sumergido tiene un movimiento vertical hacia abajo (a), véase Anexo 2 y abiertas cuando el elemento sumergido tiene un movimiento vertical hacia arriba (b), ver Anexo 3. Aquí también se puede observar una zona crítica producida en la unión de cada aleta con el elemento sumergido (cono), por lo que cada una de las aletas tendrá falla por fatiga mecánica.

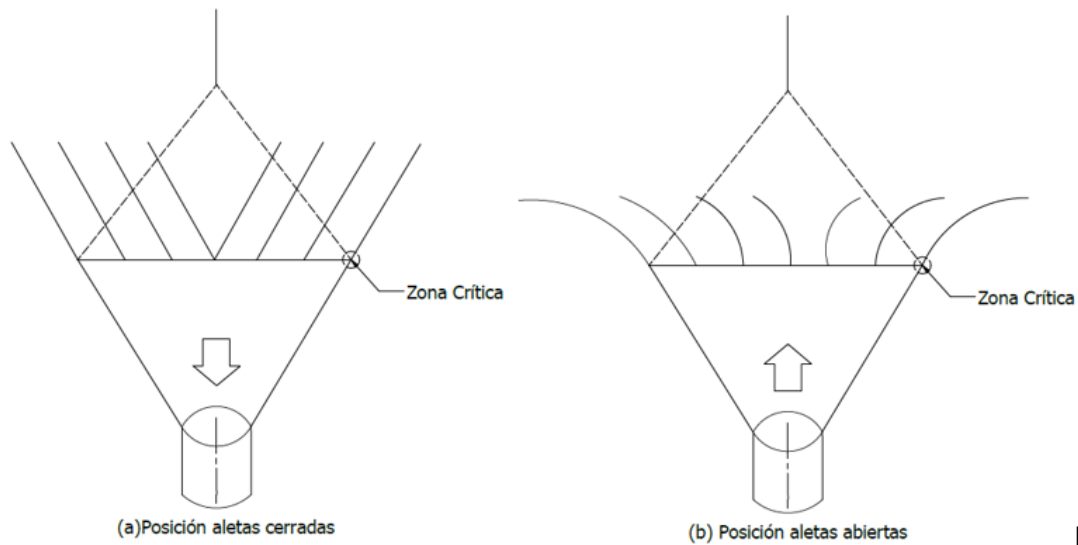


Figura 17. Esquema de posiciones para aletas en elemento sumergido Fuente: propia.

La forma en la que está enlazada cada aleta con el cono permite relacionarla con una estructura de viga empotrada, como se puede visualizar en el esquema de la Figura 18, aquí el empotramiento está representado por la unión en la zona crítica, mostrada en la Figura 17 y la carga distribuida va a ser representada por la fuerza de arrastre individual de cada aleta (F_{D2}).

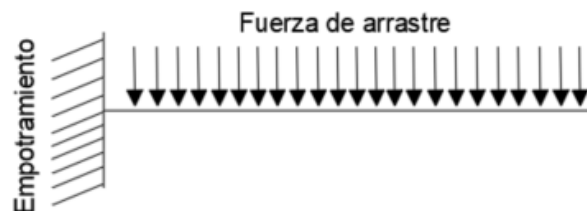


Figura 18. Esquema aleta - viga empotrada Fuente: propia.

El análisis para una viga empotrada determina la deflexión máxima ($y_{m\acute{a}x}$) que cada aleta va a tener, para lo cual es indispensable a ver elegido el material a usar y la geometría de la viga (aleta), véase Figura 19.

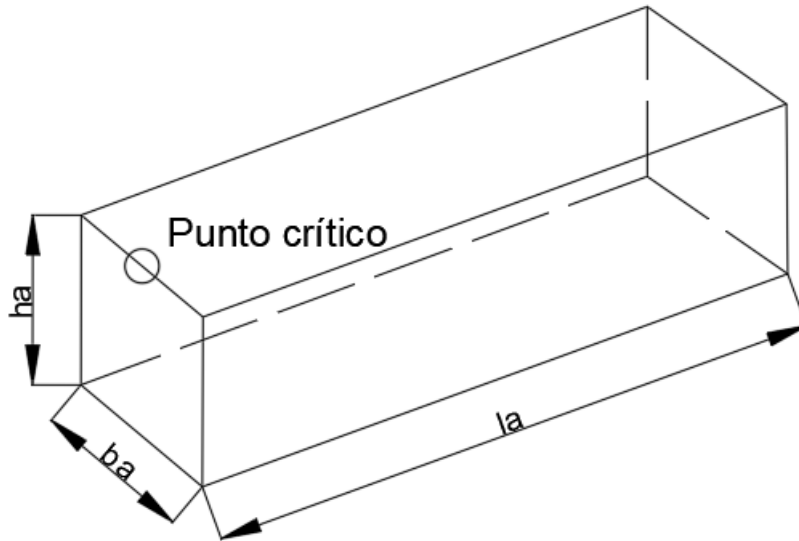


Figura 19. Esquema geométrico de aleta Fuente: propia.

La deflexión máxima para cada aleta se obtiene con la ecuación (17).

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{W \cdot L^4}{8E \cdot I}$$

Ecuación 17. Deflexión para una viga en cantiléver con fuerza distribuida

Se sabe que:

E , es el módulo de Young característico del material de la aleta.

Donde:

$$W = \frac{F_D}{n_a \cdot l_a}$$

Aquí:

n_a , es el número de aletas a implementar, y

F_D , es la fuerza de arrastre obtenida con la ecuación (18)

Además:

I , es el momento de área para la aleta y se obtiene aplicando la ecuación (18),

$$I = \frac{b_a \cdot h_a^3}{12}$$

Ecuación 28. Momento de área para la aleta

La Figura 19 indica el punto crítico donde la aleta va a tender a fallar por fatiga mecánica, es así como, la Figura 20 muestra el esquema de la distribución de esfuerzos cíclicos característicos, donde el esfuerzo mínimo (σ_{min}) va a ser cero y el esfuerzo alternante σ_{alt} tiene el mismo valor que el esfuerzo medio σ_{med} , dando así que el esfuerzo máximo σ_{max} es $\frac{\sigma_{med}}{2}$.

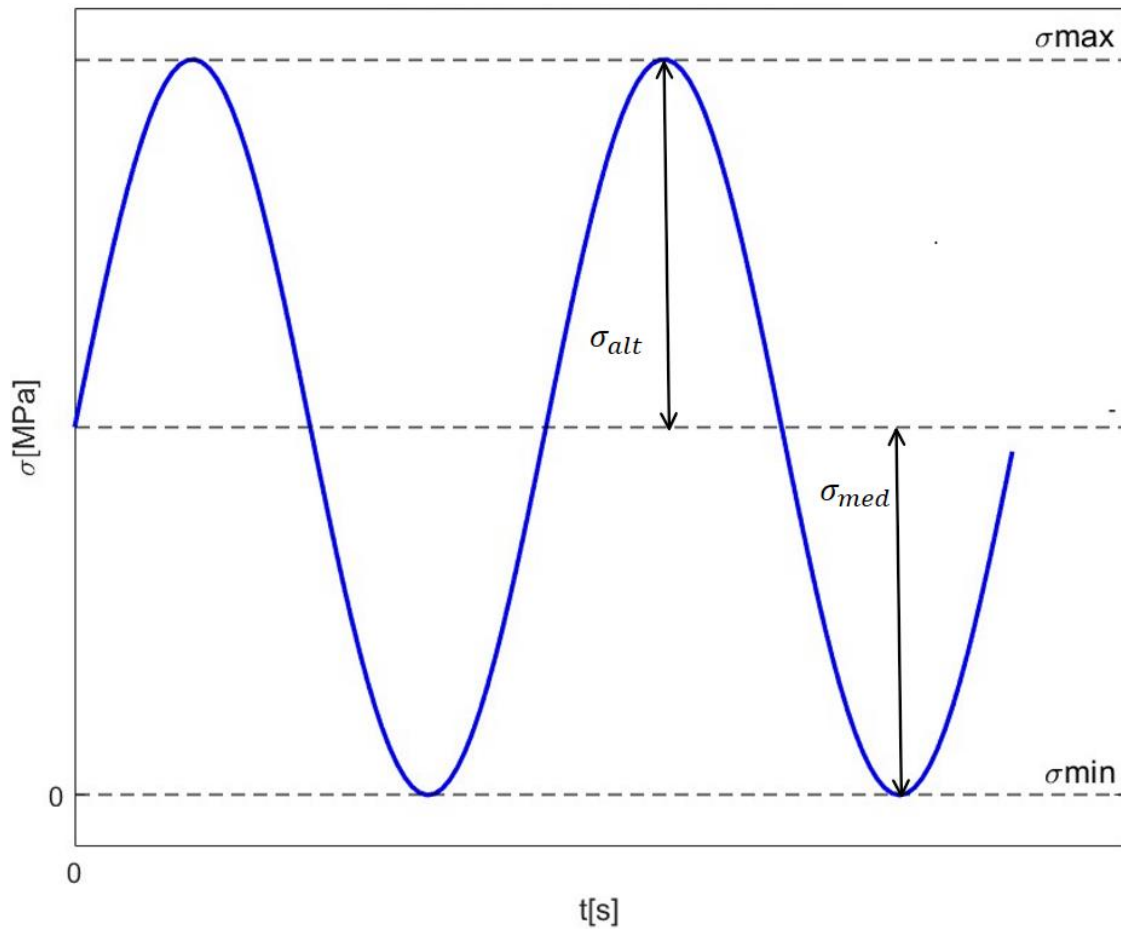


Figura 20. Distribución de esfuerzos cíclicos en punto crítico de aleta Fuente: [12]

3 CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

El procedimiento para el diseño preliminar para prueba de concepto del mecanismo convertidor de energía undimotriz (WEC) a escala (1:100), se muestra en la Figura 21.

En primer lugar se realiza una serie de ensayos que faciliten la obtención del perfil hidrodinámico de la estructura submarina, luego se procede a obtener el coeficiente de arrastre. A continuación se obtiene el periodo natural para el modelo del elemento flotante y con el mecanismo WEC, respectivamente. Para la selección de alternativas del elemento flotante y del dispositivo incluidos los elementos sumergidos se escogerá la opción que más se acerque a un periodo natural en un rango de 1.8 a 2.5 segundos, también se escoge el material que mejor se adapte a las necesidades requeridas para la construcción. Finalmente se realizan las pruebas de concepto.

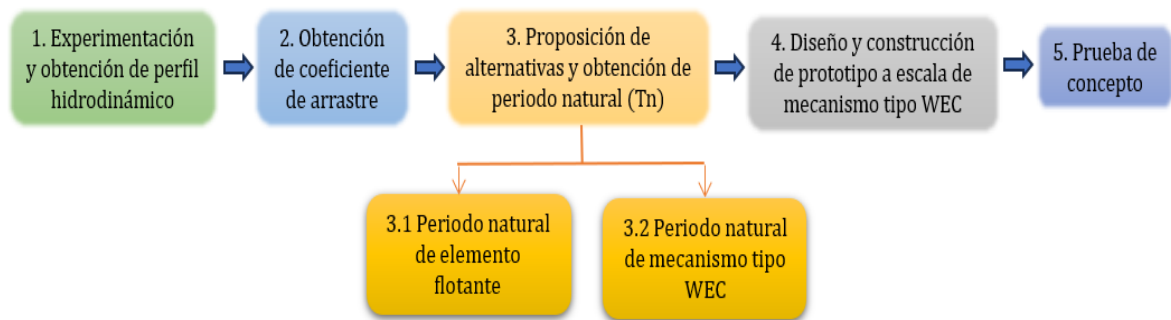


Figura 21. Flujograma de prototipo a escala de mecanismo tipo WEC a escala (1:100)
Fuente: propia.

3.1 Experimentación del perfil hidrodinámico

Como se mencionó en el capítulo 1, en el presente proyecto se realizaron varios ensayos para obtener la geometría de un perfil hidrodinámico, los cuales deben permitir: estabilidad frente a movimientos verticales bruscos, arrastre adecuado para la nula pérdida de tensión en el cable de sujeción con el elemento flotante y el menor peso sumergido posible. [13]

En la Figura 22(a) se muestra el primer ensayo, mismo que consta de una placa rectangular, a la que se le añade una masa (tuercas y arandelas). Por otra parte, la Figura 22(b) propone un perfil de forma cónica al mismo que se le añade una masa que permita el hundimiento del mecanismo a ensayar.

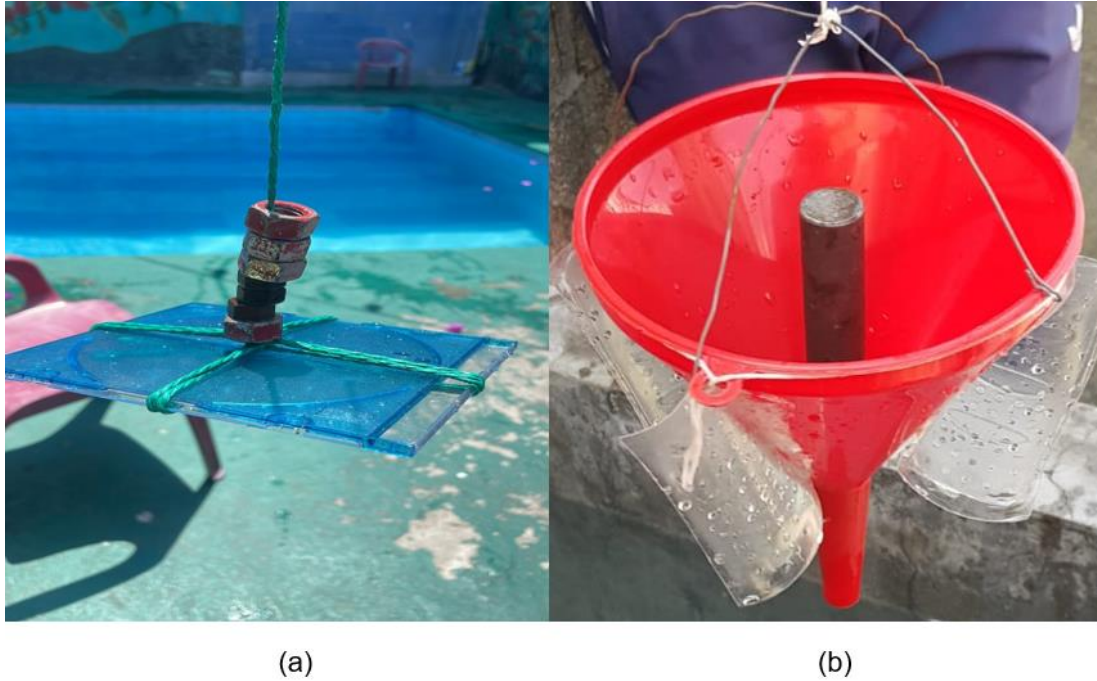


Figura 22. Pruebas caseras para elegir perfil hidrodinámico. (a) Placa rectangular. (b) Cuerpo con forma de embudo Fuente: propia.

El ensayo presentado en la Figura 22(a) se descarta; debido que, al provocar un movimiento brusco vertical este pierde estabilidad y se puede virar, por lo tanto la geometría rectangular no presenta el perfil hidrodinámico adecuado.

Al contrario, la prueba mostrada en la Figura 22(b) demuestra que el perfil hidrodinámico que tiene un embudo es adecuado, ya que, al estar sometido a movimientos bruscos generados por oscilaciones verticales este presenta las siguientes características:

- Bajo coeficiente de arrastre al bajar.
- Alto coeficiente de arrastre al subir.
- Poco peso sumergido.
- Estabilidad.

Definida la forma que tendrá el elemento a sumergir, se comprueba experimentalmente que la tensión del cable de conexión con el elemento flotante tiende a ser baja al momento de realizar el movimiento vertical hacia arriba, es decir no se genera el arrastre requerido, por tanto se incluyen aletas en forma rectangular, unidas al cono y siguiendo la inclinación que este presenta, logrando así un perfil hidrodinámico que no presente problemas al momento de introducirlo en el fluido de trabajo y que genere el arrastre necesario cuando se sube el mecanismo, esto se observa en la Figura 23.



Figura 23. Modelo final de elemento sumergible Fuente: propia.

3.2 Obtención del coeficiente de arrastre

Una vez obtenida la forma del elemento a sumergir y sus componentes, se realizaron dos pruebas de cinco ensayos preliminares cada uno:

- El primero consistió en la introducción del mecanismo a una velocidad relativa al agua promedio de 0.25 m/s y en un tiempo estimado de 2.25 segundos, véase Figura 24.

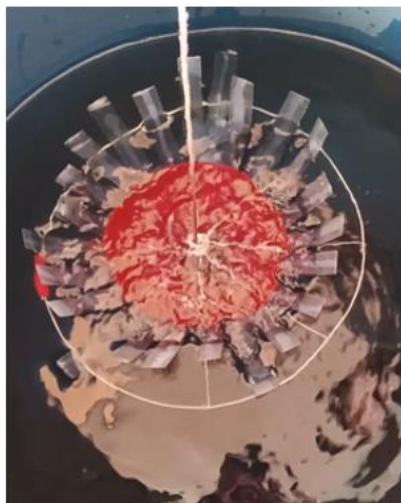


Figura 24. Primera prueba, introducción de mecanismo en estanque de agua Fuente: propia.

- La Figura 25 ilustra lo contemplado para la segunda prueba, el mecanismo ya está introducido, un sujeto aplica 1.8 kg-f en promedio para retirarlo a 0.26 m/s velocidad en un tiempo estimado de 2.25 segundos.

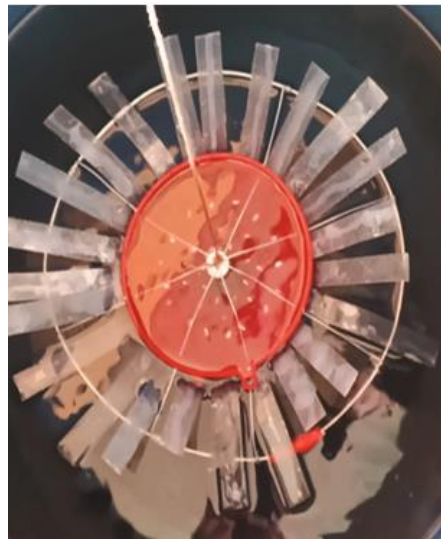


Figura 25. Segunda prueba, mecanismo ya introducido en estanque de agua Fuente: propia.

La Figura 26 indica un dinamómetro que se usó para obtener la lectura de la fuerza, con la que el sujeto realizó los ensayos ya mencionados.



Figura 26. Obtención de peso sumergido (W_s) Fuente: propia.

En la Tabla 3, se muestran los datos obtenidos cuando el movimiento es ascendente:

Tabla 3. Datos experimentales para obtención de coeficiente de arrastre

N.º Ensayo	Tiempo, t (s)	Velocidad, v (m/s)	Tensión del cable, T (kg-f)
1	2.02	0.297	2
2	2.23	0.269	1.90
3	2.27	0.264	1.90
4	2.3	0.26	1.80
5	2.43	0.246	2

Tomando como referencia la ecuación (12) y los datos presentados en la Tabla 3, es posible obtener el coeficiente de arrastre, este se presenta en la esquema de dispersión de la Figura 27.

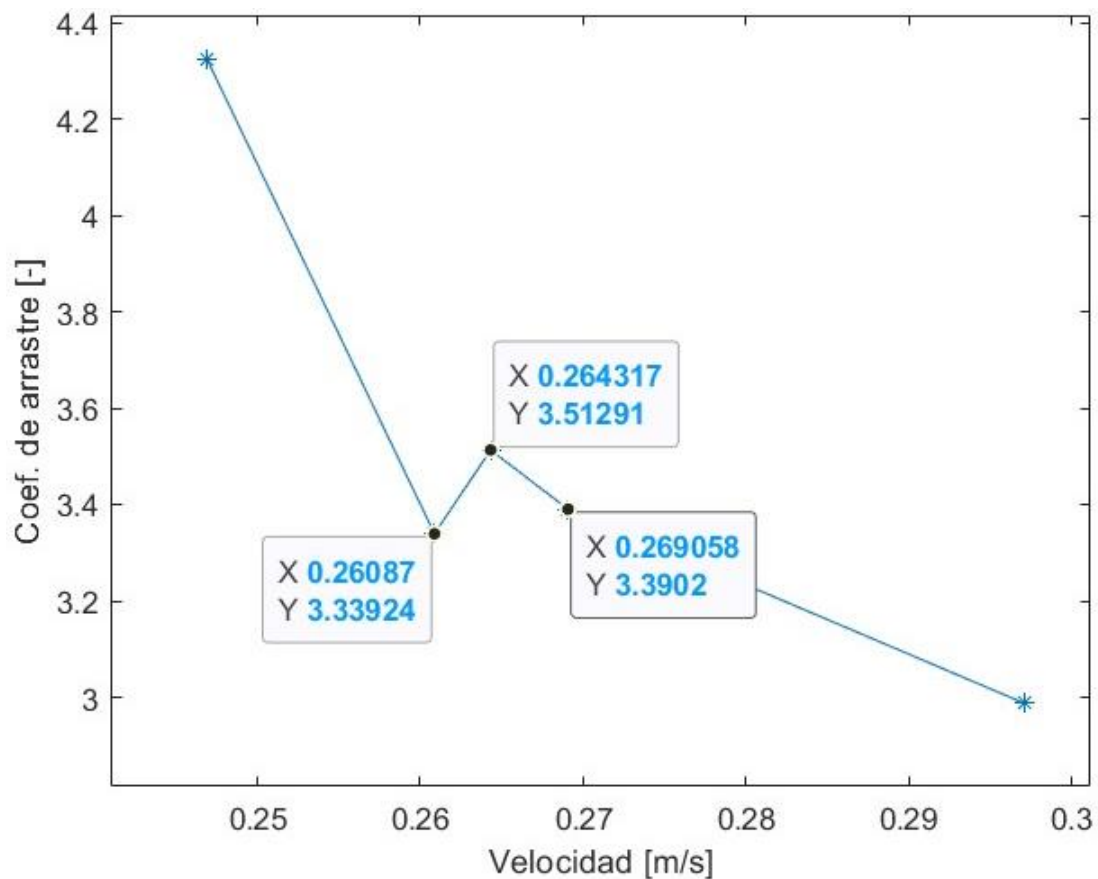


Figura 27. Grafica coeficiente de arrastre vs velocidad Fuente: propia.

Como se observa en la Figura 27, los datos tienen un valor en el eje “y” que está dentro del rango entre 3 y 4, por lo tanto en el presente trabajo el coeficiente de arrastre tiene un valor correspondiente a 3.5.

3.3 Proposición de alternativas para la modificación del periodo natural (T_n), producido por el movimiento de rolido en el mecanismo de tipo WEC.

El diseño del modelo del mecanismo convertidor de energía undimotriz WEC en escala 1:1 ha sido realizado por Salguero, M [12]. Para la realización de la prueba de concepto en el presente trabajo, se ha dispuesto el diseño preliminar y construcción de un modelo a escala (1:100), mismo que es fundamental para sintonizar el periodo natural, a través de la disminución del movimiento de rolido de un mecanismo flotante con la introducción de elementos sumergibles. En el presente trabajo la prueba de concepto se realizó en un estanque.

3.3.1 Periodo natural del elemento flotante (T_{NB})

En la Tabla 4, se han propuesto varias opciones para el dimensionamiento del elemento flotante (barcaza) que se puede observar en la Figura 13.

Tabla 4. Opciones para dimensionamiento de elemento flotante del modelo a escala (1:100)

Opciones	Altura barcaza h [m]	Largo barcaza l [m]	Ancho barcaza b [m]	Calado barcaza T [m]
A	0.15	0.20	0.12	0.09
B	0.14	0.30	0.20	0.04
C	0.30	0.60	0.35	0.02
D	0.50	1	0.60	0.16

Una vez presentadas las propuestas para el dimensionamiento de la barcaza, es posible obtener los momentos de inercia de masa aplicando la ecuación (7), las frecuencias y los periodos naturales con las ecuaciones (8) y (9) respectivamente, para cada una de las opciones mostradas. En la Figura 28, se muestra un diagrama de secuencia de datos, aquí se visualiza los datos obtenidos para el periodo natural de cada una de las 4 opciones mencionadas.

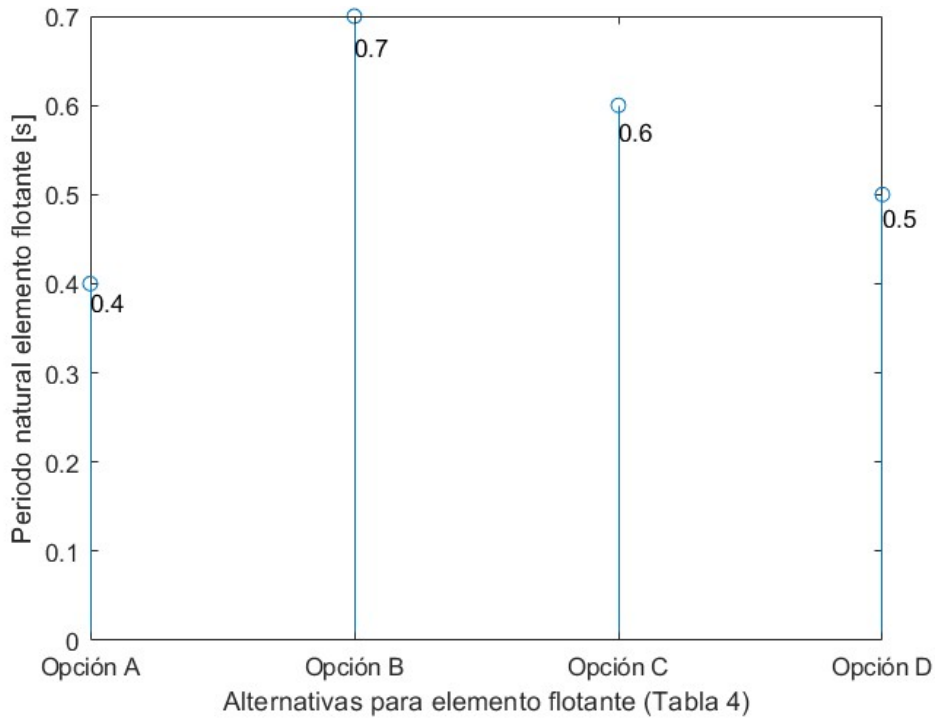


Figura 28. Comparación de periodos naturales para elemento flotante Fuente: propia.

3.3.2 Periodo natural de mecanismo tipo WEC

Parte fundamental de cada uno de los elementos a sumergir es la cantidad de aletas que este mecanismo tendrá, es así como en la Figura 28, se muestra un esquema de la superficie del cono, de manera que se coloca un número determinado de aletas a distancia (da).

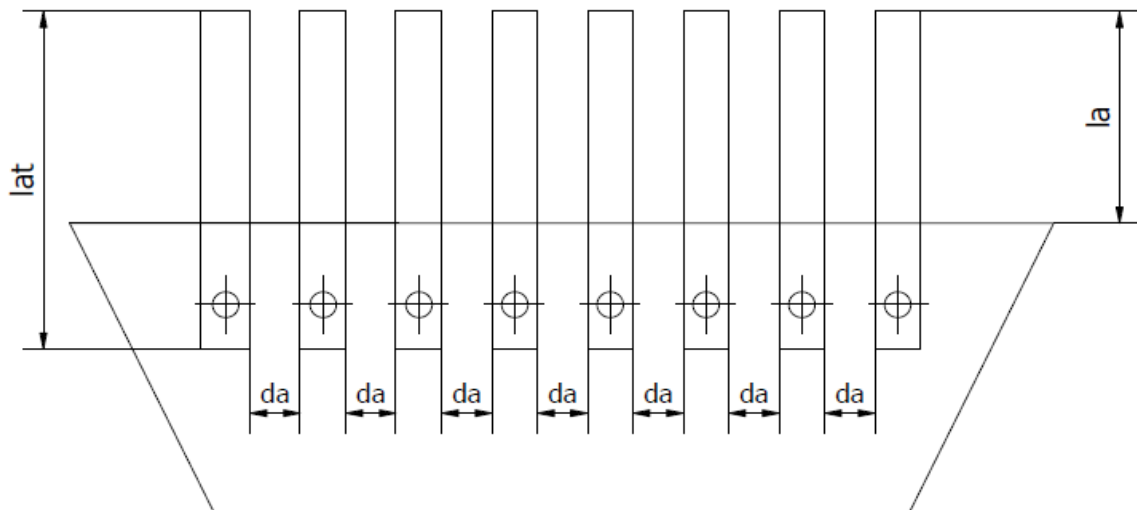


Figura 29. Esquema distribución y adaptación de aletas en cono Fuente: propia.

Una vez obtenido el periodo natural del elemento flotante, se evidencia que no hay el suficiente momento de inercia de masa para alcanzar la resonancia. Como se mencionó en la sección 3.1, los elementos a sumergir son los encargados del incremento del periodo natural.

El número de elementos sumergidos ya fue estimado en el diseño del modelo real (1:1), aquí el periodo natural alcanzado por el elemento flotante es de 5 segundos, mientras que con la inclusión de dos elementos sumergibles el periodo natural alcanza los 13 segundos, [12], por lo tanto, para la elaboración del diseño preliminar a escala (1:100) se usarán dos estructuras submarinas.

A continuación en la Tabla 5, se propone una serie de alternativas para las estructuras submarinas, en la Figura 15 se muestra un esquema en donde se detalla cada una de las dimensiones.

Es preciso mencionar que para cada una de las alternativas mostradas en la Tabla 4, se aplicó las distintas opciones propuestas para el elemento flotante.

Tabla 5. Alternativas de dimensionamiento para elemento sumergible

Opciones	Altura cilindro superior h1 [m]	Altura del cono h1 [m]	Altura cilindro inferior h1 [m]	Diámetro cilindro superior h1 [m]	Diámetro cilindro inferior h1 [m]	Longitud de aleta la [m]
E1	0.018	0.070	0.01	0.08	0.008	0.10
E2	0.030	0.080	0.02	0.1	0.01	0.16
E3	0.040	0.12	0.06	0.15	0.05	0.16

Aplicadas las alternativas que se han propuesto en la Tabla 5, la Figura 30 muestra los resultados para el periodo natural modificado, el mismo que ya incluye a los 2 elementos sumergidos.

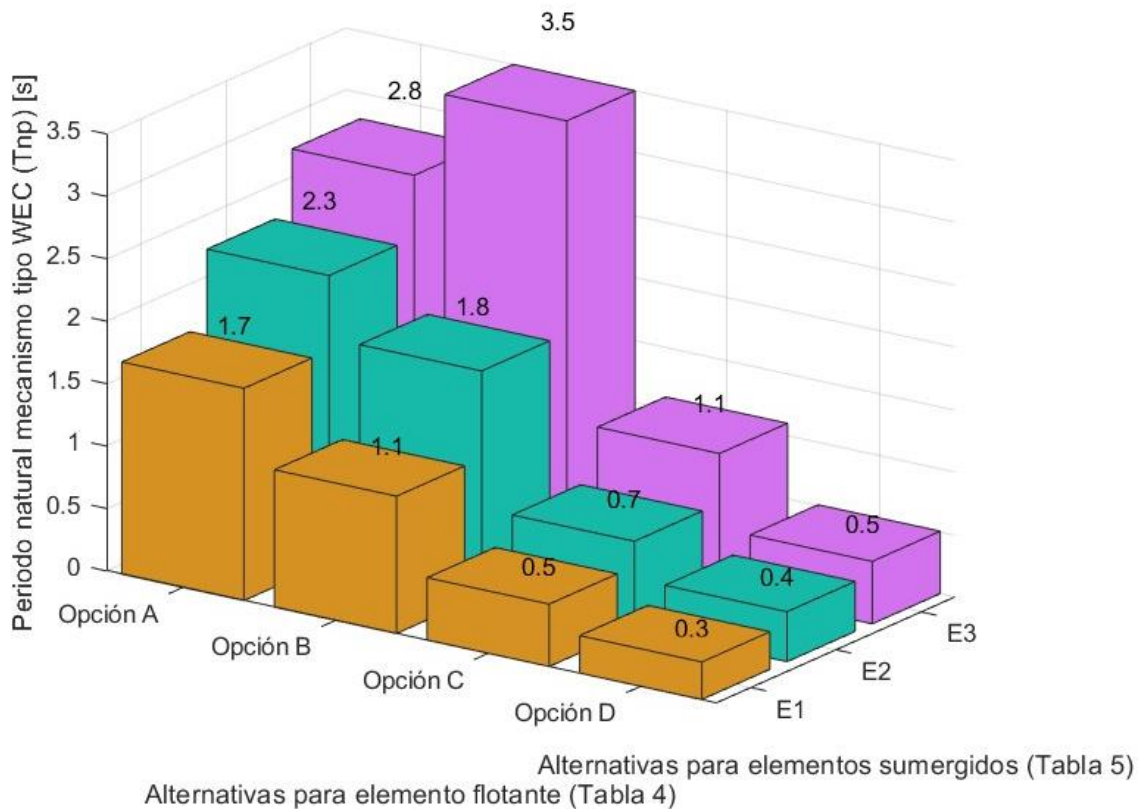


Figura 30. Periodo natural modificado para alternativas propuestas (Tabla 4 y 5)

Fuente: propia.

3.4 Diseño para construcción de modelo preliminar a escala de mecanismo tipo WEC.

3.4.1 Elección de material para construcción

En el presente trabajo se realizó la construcción de un mecanismo a escala (1:100) para un convertidor de energía undimotriz (WEC). El modelo consta de distintos componentes: elemento flotante o barcaza, que se construyó en acero galvanizado de grado 60. Para cada uno de los elementos sumergidos se utilizó impresión 3D en ácido poliláctico (PLA), y debido a las propiedades de flexión y resistencia a la fatiga se ha elegido al polipropileno como material para la elaboración de las aletas.

3.4.2 Inclusión de peso en modelo a escala

Para obtener el calado (T) correspondiente al elemento flotante y el peso sumergido para cada uno de los elementos sumergibles, se propuso la inclusión de una cantidad de masa, misma que se denominara masa extra de lastre (mbl) y masa extra añadida en elemento sumergido (mp) en la barcaza y en el elemento sumergido respectivamente.

En la Figura 31, se detalla cómo estos pesos han sido añadidos en el mecanismo.

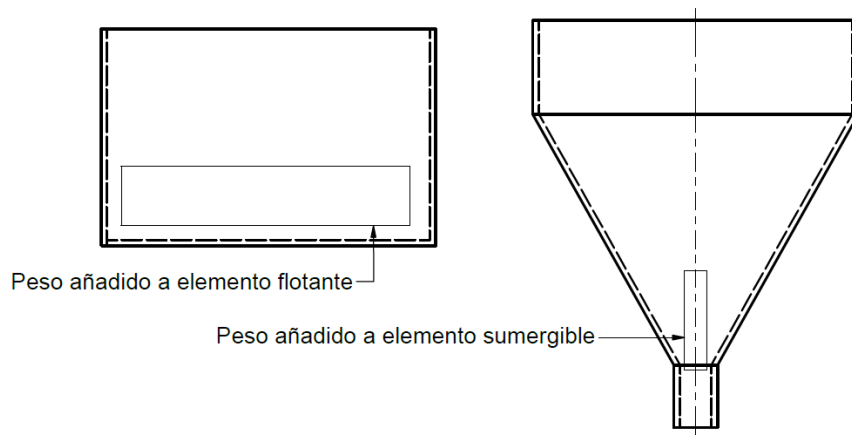


Figura 31. Esquema de inclusión de masa en componentes de WEC

Las ilustraciones mostradas en la Figura 32 y Figura 33, muestra parte de lo que se realizó en la construcción del mecanismo convertidor de energía undimotriz a escala (1:100), que se utilizó para la prueba de concepto del presente trabajo.

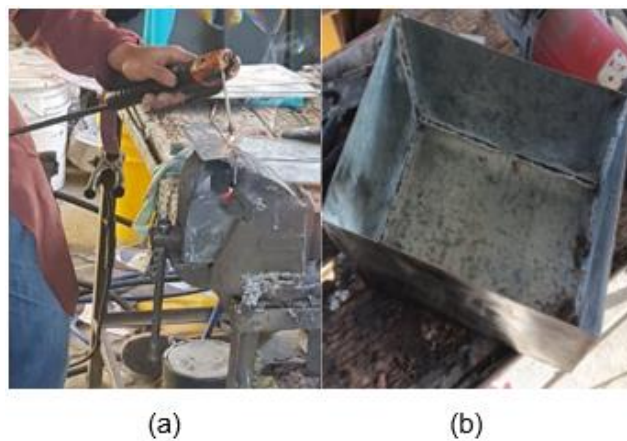


Figura 32. Evidencia proceso de construcción. (a) Soldadura de elementos que conforman el elemento flotante; (b) Elemento flotante soldado, listo para recubrimiento.



Figura 33. Embudos con impresión 3D y aletas de polipropileno Fuente: propia

3.5 Prueba de concepto

En el flujograma mostrado en la Figura 20 se detalla que el último paso que se desarrolló en el presente trabajo es la prueba de concepto, la cual consistió en realizar el mismo procedimiento para los dos casos: con los elementos sumergidos y sin ellos. La prueba de concepto se realizó en un estanque (piscina).

La experimentación consistió en:

- a) Dar un ángulo de inclinación (5 a 15°) a la barcaza, cuando esta se encontraba en la superficie de la piscina.
- b) Posteriormente, se contabilizaron las oscilaciones y con un cronometro se midió el tiempo la barcaza tardo en estabilizarse.
- c) La barcaza ya está estabilizada.

4 CAPÍTULO 4: RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Resultados

En la Figura 34, se observa el prototipo final del modelo construido a escala (1:100) del mecanismo para generación de energía undimotriz.

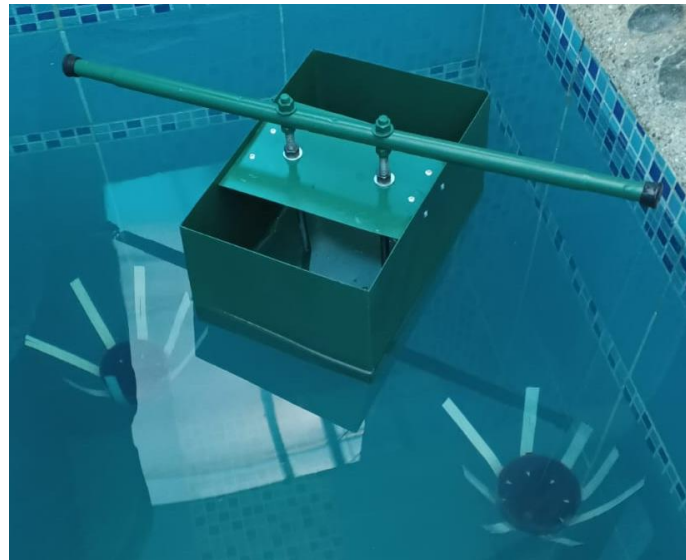


Figura 34. Modelo a escala (1:100) de mecanismo tipo WEC Fuente: propia.

La Tabla 6 muestra los datos con las características geométricas del modelo presentado en la Figura 34, adicionalmente el Anexo 1 da a conocer el plano de conjunto del modelo. El mecanismo se lo construyó con este dimensionamiento, ya que, cumple con el periodo natural teórico (1.3 a 2 segundos), ver Figura 30 y sección 3.

Tabla 6. Datos del modelo tipo WEC a escala (1:100) construido

Prototipo a escala de Mecanismo tipo WEC			
Datos para elemento flotante (barcaza)			
Dimensiones	Notación	Valor	Unidad de medida
Largo	l	0,3	m
Ancho	b	0,2	m
Altura	h	0,14	m
Calado	T	0,035	m
Altura metacéntrica	GM	0,07	m
Espesor	e	0,001	m
Altura base - viga	ht	0.055	m
Masa	mb	2,1	kg
Masa extra de lastre	mbl	0,7	kg
Material	Acero galvanizado G60		

Datos para elementos sumergidos			
Dimensiones	Notación	Valor	Unidad de medida
Diámetro superior	da	0.1	m
Diámetro inferior	db	0.01	m
Altura total	Ht	0.13	m
Altura cilindro superior	h1	0.03	m
Altura cono	h2	0.08	m
Altura cilindro inferior	h3	0.02	m
Masa estructural	me	0.09	kg
Masa contenida de agua	ma	0.43	kg
Masa extra añadida en elemento	mp	0.02	kg
Espesor	ef	0.002	m
Material	PLA (Impresión 3D)		
Datos para aletas de elementos flotantes			
Dimensiones	Notación	Valor	Unidad de medida
Largo	la	0.11	m
Ancho	ba	0.03	m
Espesor	ea	0.0001	m
Numero de aletas	na	8	-
Material	Polipropileno		
Distancia de separación	r	0.05/0.23/0.3	m
Distancia de hundimiento	dh	0.6	m

En la Tabla 7, se muestran los datos obtenidos para el primer caso experimentado (elemento flotante) que se mencionó en la sección 2.5, aquí se detalla el número de oscilaciones, el tiempo que tardó el elemento flotante en estabilizarse y el periodo natural.

Tabla 7. Resultados obtenidos de la prueba de concepto para elemento flotante

Numero de experimento	Numero de oscilaciones	Tiempo de estabilización (s)	Periodo natural (s)
Caso 1: Elemento flotante sin elementos sumergidos			
1	2.5	2.20	0.88
2	3	2.48	0.83
3	3	2.52	0.84
4	3.5	3.10	0.87

Los resultados obtenidos para el segundo caso experimentado se muestran en la Tabla 8. Se realizaron 3 variaciones en lo que respecta a la distancia de separación desde el centro de la barcaza hasta el elemento sumergido (r), de manera que se ensayó a: e 0.15 m, 0.23m y 0.30 m.

Tabla 8. Resultados obtenidos de la prueba de concepto del mecanismo tipo WEC con distancia de separación (r) variable entre elemento flotante y estructura submarina

Numero de experimento	Numero de oscilaciones	Tiempo de estabilización (s)	Periodo natural (s)
Distancia de separación, $r = 0.15\text{m}$			
1	1	1.78	1.78
2	1	1.80	1.80
3	1	1.83	1.83
4	1	1.86	1.86
Distancia de separación, $r = 0.23\text{m}$			
1	1	2.47	2.47
2	1	2.60	2.60
3	1	2.51	2.51
4	1	2.5	2.53
Distancia de separación, $r = 0.30\text{ m}$			
1	1	3.28	3.28
2	1	3.35	3.35
3	1	3.39	3.39
4	1	3.42	3.42

Finalmente, la tabla 10 muestra la comparación entre los resultados obtenidos de manera teórica y los resultados promedio de cada uno de los casos que se realizaron en la prueba de concepto.

Tabla 9. Comparación resultados teóricos y experimentales

Periodo natural / error	Notación	Valor	Unidad de medida
Barcaza (sin elementos sumergidos)			
Teórico	T_n	0.65	segundos
Experimental	T_{ne}	0.86	segundos
Error	e_b	22	%

Mecanismo tipo WEC (con elementos sumergidos)			
Distancia de separación, r = 0.15m			
Teórico	T_{np}	1.50	segundos
Experimental	T_{npe}	1.80	segundos
Error	e_p	20	%
Distancia de separación, r = 0.23m			
Mecanismo tipo WEC (con elementos sumergidos)			
Teórico	T_{np}	2.20	segundos
Experimental	T_{npe}	2.50	segundos
Error	e_p	13.4	%
Distancia de separación, r = 0.3m			
Mecanismo tipo WEC (con elementos sumergidos)			
Teórico	T_{np}	2.78	segundos
Experimental	T_{npe}	3.36	segundos
Error	e_p	17.3	%

Las pruebas de concepto del presente proyecto han sido grabadas, a continuación se adjunta el link donde se puede observar los resultados:

<https://youtu.be/m7eLuET11u4>

4.2 Ejemplo de cálculo

Los datos teóricos mostrados en la Tabla 10, para una separación (r) de 0.15 m serán corroborados con el ejemplo de cálculo mostrado a continuación.

Como primer paso es importante conocer la altura metacéntrica del elemento flotante, para lo cual se debe conocer el centroide (G) con la ecuación (1).

$$G = \frac{0.0772 \left[\frac{kg}{m} \right]}{2.32 [kg]}$$

$$G = 0.062 [m]$$

Una vez hallado el centroide se procede a utilizar la ecuación (2) para obtener el calado (T),

$$T = 0.038[m]$$

Es así como haciendo uso de la ecuación (3), se obtiene la altura metacéntrica (\overline{GM}):

$$\overline{GM} = 0.018[m] + 0.088[m] - 0.062[m]$$

$$\overline{GM} = 0.045[m]$$

Obtenidos los parámetros físicos de la barcaza, se puede determinar el volumen desplazado (∇) del elemento flotante mediante la ecuación (5),

$$\nabla = 0.038 [m] \cdot 0.20[m] \cdot 0.30[m]$$

$$\nabla = 0.0023 [m^3]$$

A continuación la ecuación (6), permitirá obtener el valor de la masa del elemento flotante desplazada (m_B),

$$m_B = 3.06 [kg]$$

De esta forma la inercia de masa (I_B) se obtiene con la aplicación de la ecuación (7),

$$I_B = 3.06[kg] \cdot (0.3 \cdot 0.2[m])^2$$

$$I_B = 0.011[kg \cdot m^2]$$

La ecuación 8 muestra la frecuencia natural para el elemento flotante (ω_{nB}),

$$\omega_{nB} = \left(\frac{1025 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0.0023[m^3] \cdot 0.045[m]}{0.011[kg \cdot m^2]} \right)^{0.5}$$

$$\omega_{nB} = 9.62 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Para obtener un periodo natural (T_{nB}) de:

$$T_{nB} = \frac{2\pi}{9.62 \left[\frac{rad}{s} \right]}$$

$$T_{nB} = 0.65 [s]$$

En lo que se refiere a la masa estructural (m_E) de cada uno de los elementos a sumergir se van a usar la ecuación (10), así:

$$V_T = 5.18 \times 10^{-5} [m^3]$$

$$m_E = 0.02[kg] + 1240 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 5.18 \times 10^{-4} [m^3]$$

$$m_E = 0.085[kg]$$

Adicional, la ecuación (10.1) permite la obtención de la masa atrapada dentro de la estructura submarina (m_a),

$$V_{aT} = 4.17 \times 10^{-4} [m^3]$$

$$m_a = 1025 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 4.17 \times 10^{-4} [m^3]$$

$$m_a = 0.43 [kg]$$

Mientras que para la masa añadida (m_{at}) que se concentra alrededor del perfil hidrodinámico se usa la ecuación (11),

$$m_{at} = 0.38 [kg]$$

Es así como la ecuación (12) determina la masa total (m_T) para cada uno de los elementos sumergidos:

$$m_T = 0.91 [kg]$$

Por lo tanto, la inercia de masa para la barcaza incluidos los elementos sumergidos (I_{BP}) se obtiene con la ecuación (13),

$$I_{BP} = 0.011 [kg \cdot m^2] + 2(0.91 [kg] \cdot 0.15^2 [m^2])$$

$$I_{BP} = 0.084 [kg \cdot m^2]$$

La nueva frecuencia natural (ω_{nBP}) del dispositivo tipo WEC se obtiene con la ecuación (14),

$$\omega_{nBP} = \left(\frac{1025 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \cdot 0.0023 [m^3] \cdot 0.045 [m]}{0.084 [kg \cdot m^2]} \right)^{0.5}$$

$$\omega_{nBP} = 4.19 \left[\frac{rad}{s} \right]$$

Finalmente con la ecuación (15) es posible obtener el nuevo periodo natural (T_{nBP}):

$$T_{nBP} = 1.50 [s]$$

4.3 Conclusiones

1. Este trabajo introduce el diseño preliminar y prueba de concepto de un dispositivo WEC para sintonizar el periodo natural, del movimiento de rolido de un elemento flotante con el periodo pico de un sistema de olas.
2. La solución propuesta consta de un elemento flotante (30 cm de largo, 20 cm de ancho y 3.5 cm de calado), dos elementos sumergidos (10 cm de radio y 12 cm de altura) a una distancia de separación (r) de 0.23 m y un cable sujetador. En este proyecto se modifica el periodo natural de rolido de 0.86 segundos a 2.50 segundos.
3. Se concluye que el modelo a escala diseñado y construido en el presente trabajo permitió la realización de la prueba de concepto.
4. El periodo natural obtenido de manera teórica para el mecanismo WEC es de 2.20 segundos, mientras que el correspondiente a la prueba de concepto es de 2.50 segundos, por lo tanto, es factible concluir que la sintonización del periodo natural del convertidor de energía undimotriz basado en rolido es tolerable, dando un error del 13%.
5. Los resultados presentados en este trabajo han contribuido para la elaboración de la publicación científica: "A numerical feasibility study of a novel resonant wave energy converter concept based on the roll response", misma que se encuentra en revisión para su posterior publicación.

4.4 Recomendaciones

1. Se recomienda realizar experimentos a escala en tanques de pruebas experimentales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

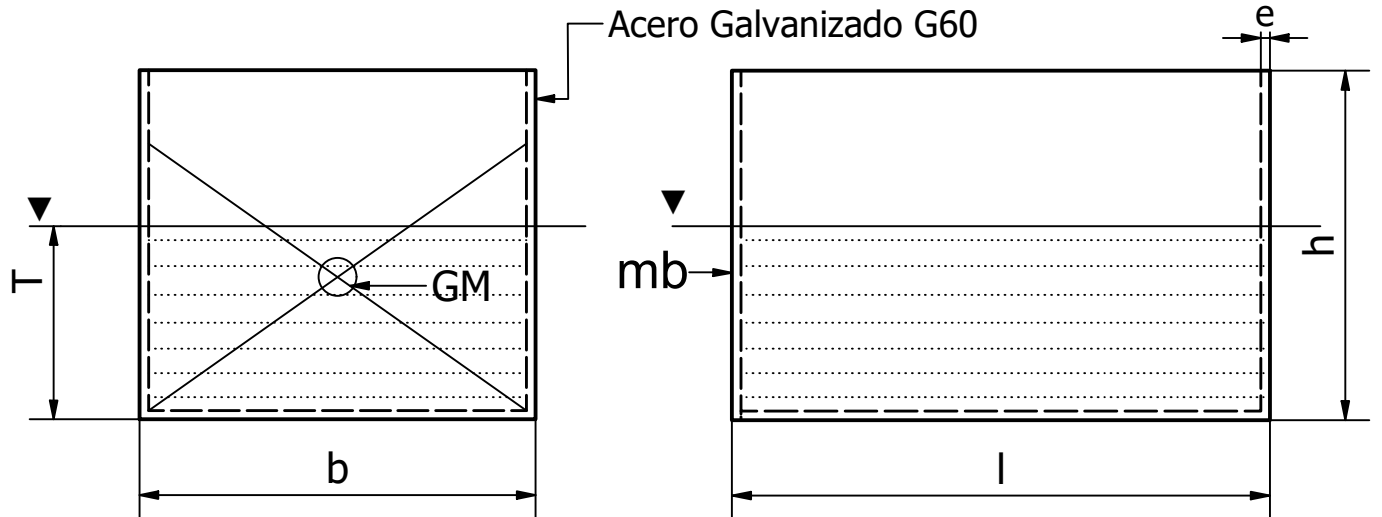
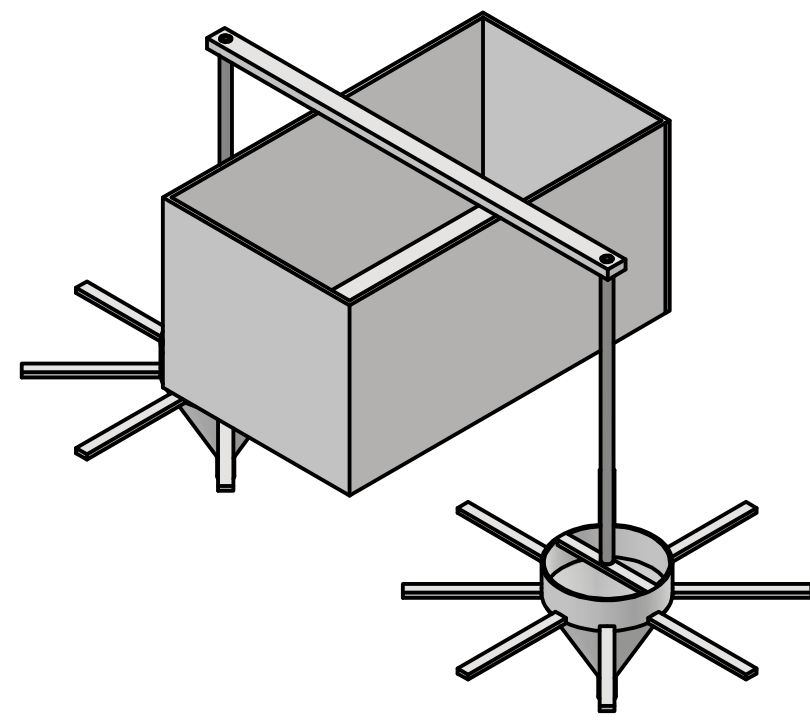
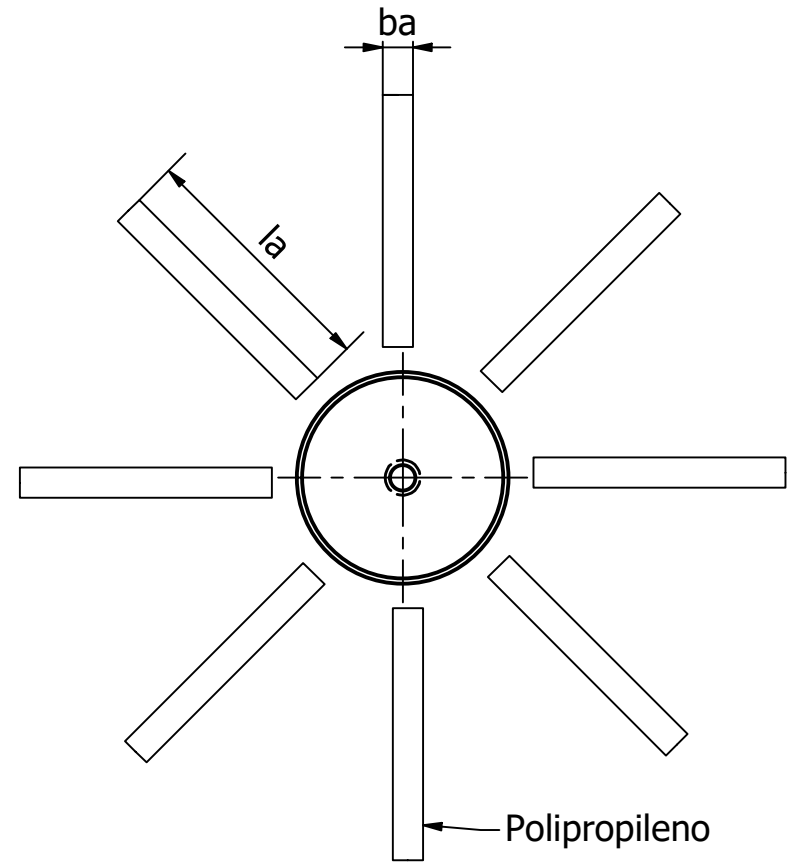
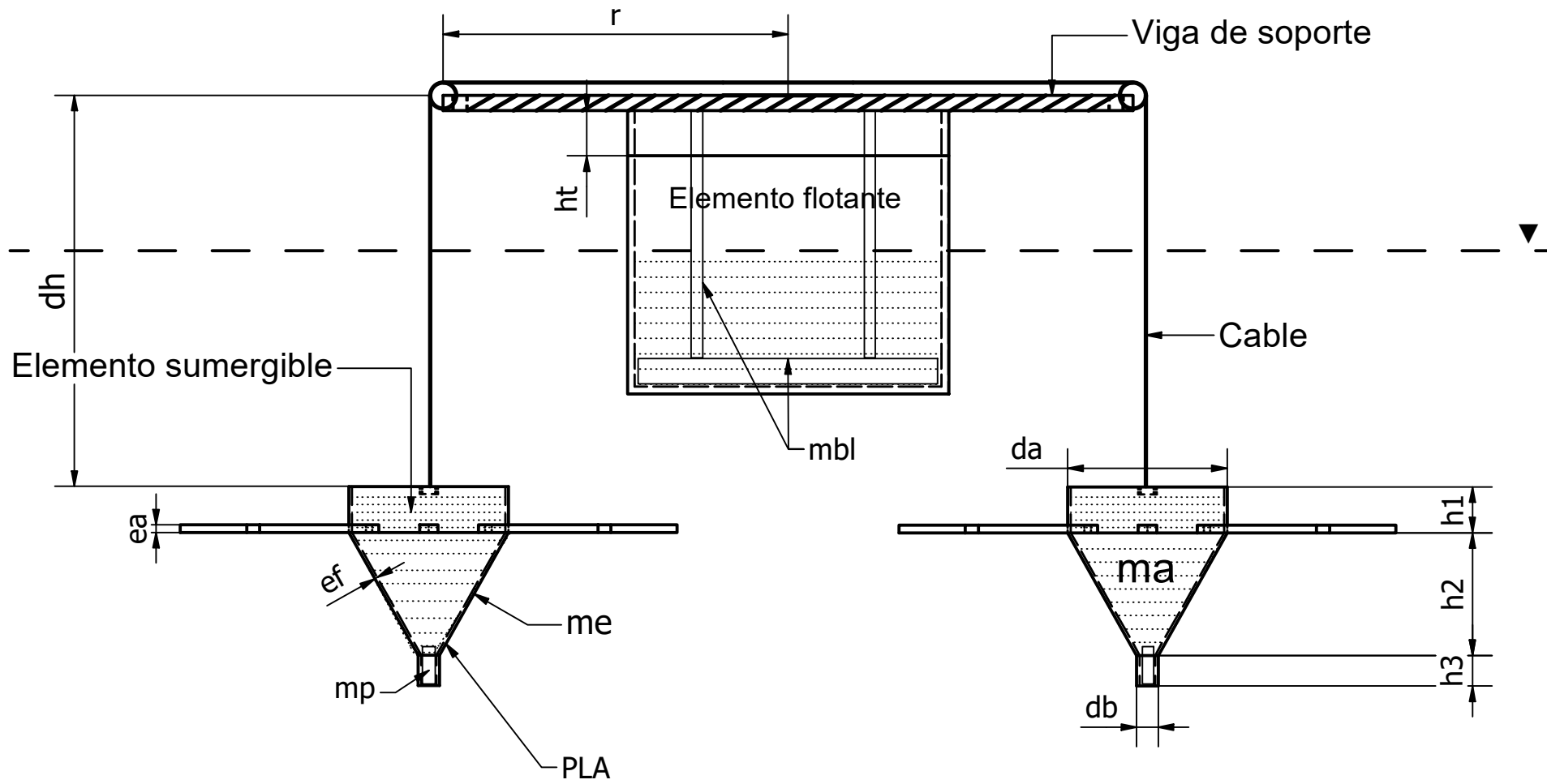
- [1] “3 Tecnologías de conversión de energía a undimotriz”.
- [2] “Oceanlinx Unveils World’s First 1 MW Wave Power Harvesting Unit in Australia - The Green Optimistic.” <https://www.greenoptimistic.com/oceanlinx-wave-power-australia-20131031/> (accessed Jun. 07, 2023).
- [3] “SPERBOY Wave Energy Converter.” <http://www.paddocks1.co.uk/> (accessed Jun. 07, 2023).
- [4] “OE35 Wave Energy Converter Buoy – MARITIME HAWAII.” <https://www.maritimehawaii.com/2020/12/oe35-wave-energy-converter-buoy/> (accessed Jun. 07, 2023).
- [5] “La energía de las olas: del Pelamis al Penguin – Fundación Exponav en Ferrol.” <https://exponav.org/blog/puertos-y-buques/la-energia-de-las-olas-del-pelamis-al-penguin-pasando-por-gelula/> (accessed Jun. 07, 2023).
- [6] “Ocean Power Technologies | PB3 PowerBuoy.” <https://oceanpowertechnologies.com/platform/opt-pb3-powerbuoy/> (accessed Jun. 07, 2023).
- [7] “MARN - Oleaje y Viento.” <https://www.snet.gob.sv/ver/oceanografia/pronostico/oleaje+y+viento/> (accessed May 14, 2023).
- [8] “A numerical feasibility study of a novel resonant wave energy,” 2023.
- [9] “Estado del mar San Pablo. Previsiones de Olas, Surf y Viento.” <https://seatemperature.info/es/san-pablo-previsiones-de-olas.html> (accessed Jun. 25, 2023).
- [10] “La densidad del Agua de Mares y Océanos.” <https://serviqualita.es/index.php/inicio/blog/item/151-la-densidad-del-agua-de-mares-y-oceanos> (accessed Aug. 05, 2023).
- [11] “Las densidades de todos los materiales de impresión 3D - Bitfab.” <https://bitfab.io/es/blog/densidades-materiales-3d/> (accessed Aug. 05, 2023).
- [12] M. J. Salguero Rodríguez, “Diseño hidromecánico y estructural de una estructura sumergida con perfil hidrodinámico y doble fuerza de arrastre que permita el control de movimiento de un WEC.,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2023.
- [13] A. F. O. J. Meana-Fernández, “Selección de perfil hidrodinámico para la construcción de un modelo a escala de una microturbina hidrocínética”.

ANEXOS

Anexo 1: Plano de conjunto de modelo a escala (1:100) para mecanismo WEC.

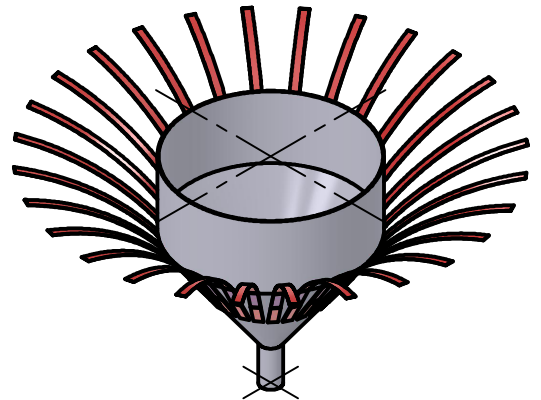
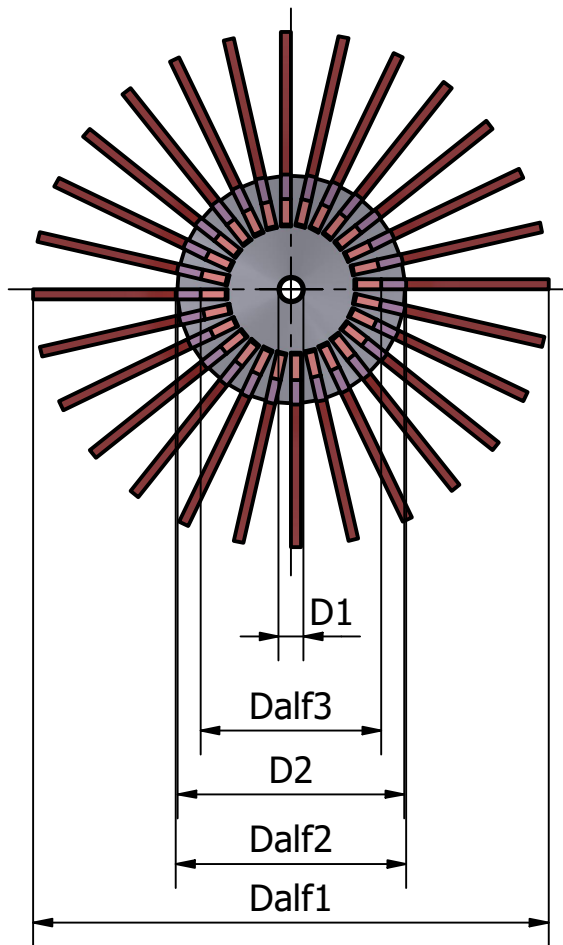
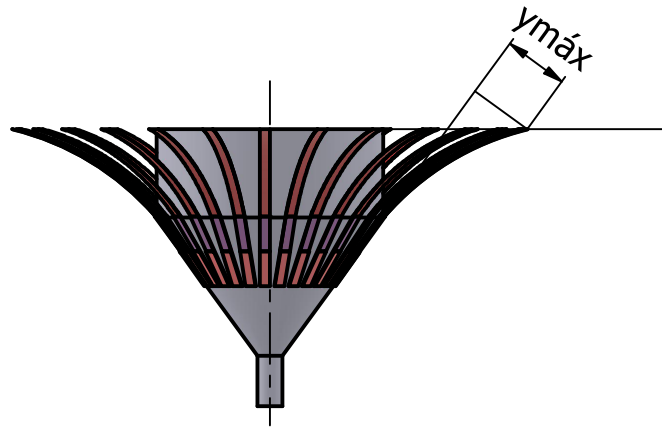
Anexo 2: Estructura sumergida – aletas abiertas [12].

Anexo 3: Estructura sumergida – aletas cerradas [12].

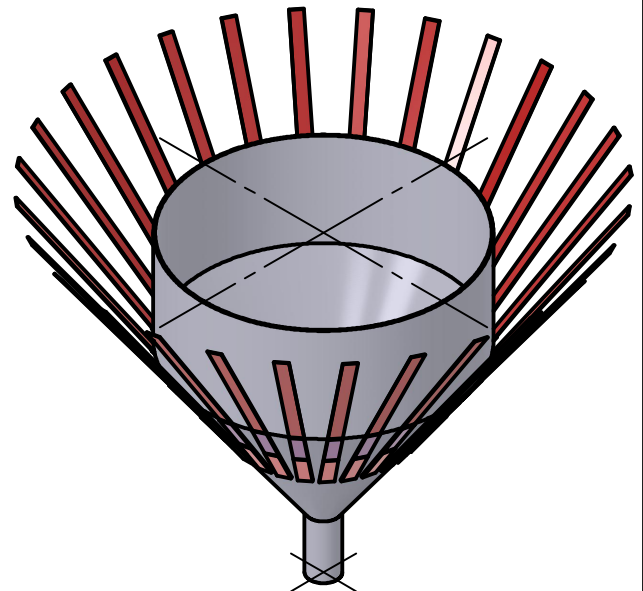
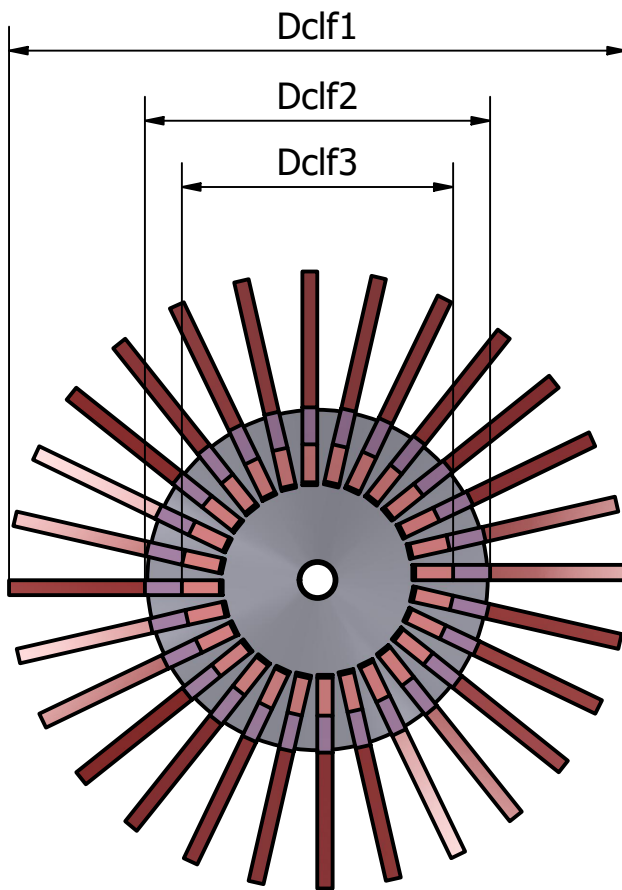
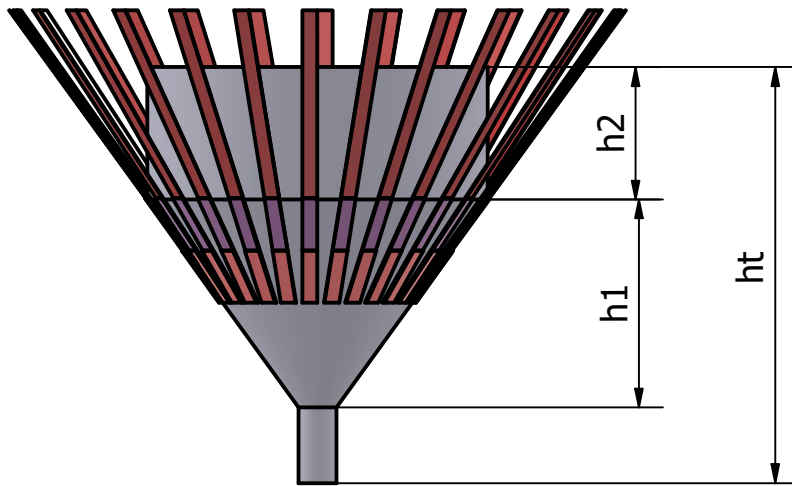


Tratamiento Térmico	N/A	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento:	N/A		Dib.	Segovia Jordany
Material: Acero Galvanizado G60 - PLA- Polipropileno	Tol. Gen.: N/A	Escala: 1:100	Dis.	Segovia Jordany
			Rev.	Guachamin Wilson
Contenido: Plano de conjunto de modelo a escala (1:100) para mecanismo WEC	TIC-001		Fecha: 22/08/2023	

Anexo 2



Tratamiento Térmico	N/A	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento:	N/A		Dib.	Marcelo Salguero
Material: A572	Tol. Gen.: N/A	Escala: 1:300	Dis.	Marcelo Salguero
			Rev.	Ing. Wilson Guachamín A.
Contenido: Estructura sumergida aletas abiertas	002			Fecha: 20/08/2023



Tratamiento Térmico	N/A	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento:	N/A			
Material: A572	Tol. Gen.: N/A	Escala: 1:300	Dib.	Marcelo Salguero
			Dis.	Marcelo Salguero
			Rev.	Ing. Wilson Guachamín A.
Contenido: Estructura sumergida aletas cerradas		001	Fecha:	20/08/2023