



"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

**DISEÑO Y MODELADO DE MECANISMO PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN MÉXICO**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA  
PRESENTA

**ING. EDDY LEÓN RAMÍREZ**

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. ABDIEL GÓMEZ MERCADO

SINODALES:  
DR. RAFAEL CAMPOS AMEZCUA  
DR. IGNACIO RAMÍREZ VARGAS

132 Páginas

Pachuca de Soto, Hidalgo noviembre de 2020.





**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

"2020. Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

Pachuca, Hidalgo, 18/Septiembre/2020  
OFICIO No. DEPI-046-20

**C. ING. EDDY LEÓN RAMÍREZ  
PRESENTE**

La que suscribe, jefa de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, le comunica que los miembros de la Comisión Revisora, designada por el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica para examinar su Tesis:

Diseño y modelado de un mecanismo para el  
aprovechamiento de la energía undimotriz en  
México.

se han reunido, y después de intercambiar opiniones manifiestan su aprobación de la Tesis, en virtud que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes y, en consecuencia, se autoriza su impresión.

Sin otro particular por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*

  
**M. A. C. ELODIA CLAUDIA GUERRERO ORTIZ**  
**JEFA DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**



C.p. Archivo  
ECGO/LMPP

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA**  
DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. C.P. 42080, A. P. 276.  
Tels. : (01 771) 710 52 51, 170 03 45, 170 03 01, 170 06 87  
[www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx) | [www.itpachuca.edu.mx](http://www.itpachuca.edu.mx)



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de Pachuca

"2020, Año de Leona Vicario, Benemérita Madre de la Patria"

División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica

**ACTA**

Siendo las 13:00 horas del 15 de febrero de 2020, reunidos en el aula S10, el Consejo de Posgrado de la Maestría en Ingeniería Mecánica manifiesta la APROBACIÓN del tema de Tesis: Diseño y modelado de un mecanismo para el aprovechamiento de la energía undimotriz en México, con el siguiente contenido:


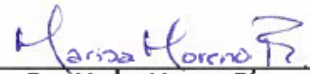




Resumen/Abstract  
Nomenclatura  
Contenido  
Índice de cuadros, gráficas y figuras.  
1. Antecedentes  
2. Marco teórico  
3. Diseño Mecánico.  
Conclusiones  
Bibliografía  
Apéndices

Para cubrir el requisito correspondiente a la Tesis para que el Ing. Eddy León Ramírez obtenga el grado de Maestro en Ingeniería Mecánica, bajo la dirección del Dr. Abdiel Gómez Mercado, profesor de la Maestría en Ingeniería Mecánica de la División de Estudios de Posgrado e Investigación.

**ATENTAMENTE**

*El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia*

**EL CONSEJO DE POSGRADO**

 Dr. Edgar Ernesto Vera Cárdenas	 Dra. Marisa Moreno Ríos	 Dr. Luis Manuel Palacios Pineda
 Dra. Erika Osiris Ávila Dávila	 Dr. Ignacio Ramírez Vargas	 Dr. Hugo Francisco Abundis Fong



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo. C.P. 42080, A. P. 276.

Tels. : (01 771) 710 52 51, 170 03 45, 170 03 01, 170 06 87

www.tecnm.mx | www.itpachuca.edu.mx

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante el periodo de estudios de maestría en el cual desarrolle la presente tesis de investigación.

A mi director de tesis, el Dr. Abdiel Gómez Mercado y sinodales, Dr, Rafael Campos Amezcua y Dr. Ignacio Ramírez Vargas; por su dedicación y apoyo en la asesoría para el desarrollo del presente trabajo.

A mis padres por representar un apoyo incondicional durante todo el proceso de estudio.

A mi madre por ser una constante luchadora y pilar dentro de mi vida para que siga adelante con mis metas y objetivos.

A mi hija por ser la inspiración de querer superarme y sacar lo mejor de mi.

A mi amigo Ignacio Martínez por el apoyo incondicional que me brindó a lo largo del presente trabajo.

A mis compañeros de clase por la amistad y apoyo brindado en todo este periodo.



## RESUMEN

Los dispositivos convertidores de energía undimotriz (WEC, por sus siglas en inglés wave energy convertor) pertenecen a un sector importante de producción de energía eléctrica mediante el aprovechamiento de energías renovables, en este caso, como lo menciona el nombre de estos dispositivos, la energía undimotriz.

Actualmente, se han realizado variados avances tecnológicos para poder convertir la energía mecánica producida por el movimiento de las olas en electricidad, y con esto, generar suficiente potencial eléctrico para el abastecimiento energético de algunas ciudades. Tal es el caso de mecanismos como el The Salter Duck, Limpet, o el Oyster Aquamarine, desarrollados en el Reino Unido.

En el presente documento se muestra una alternativa de generación eléctrica en México por medio del aprovechamiento de energía undimotriz en sus costas. Se plantea la utilización de un tipo de energía renovable diferente a las comúnmente utilizadas en México, que son la energía eólica -principalmente- y la energía solar.

De igual forma, se expone la metodología de diseño utilizada para la generación y selección de la propuesta más conveniente de acuerdo a los intereses planteados, así como el diseño a estructural de algunos de los componentes involucrados y el ensamble general del convertidor. Esta propuesta, también contempla el desarrollo del modelo matemático del dispositivo WEC, de modo que pueda ser utilizado como un elemento global de estudio para trabajos posteriores a este.

Este trabajo pretende, además, ser parte de una solución -en conjunto- para la disminución de contaminación en el país por la producción de energía eléctrica, aprovechando la vasta extensión costera con la que cuenta México. De manera que, las ciudades adyacentes a zonas costeras, puedan abastecer su demanda eléctrica por medio de la conversión de la energía undimotriz captada por dispositivos WEC en un futuro cercano.

## ABSTRACT

Wave energy converters devices (WEC) belong to an important sector of power generation through the renewable energies harnessing, in this case, as it is mentioned on the name of those devices, wave energy.

At the present time, some technological developments had been done to achieve converting the mechanical power produced by the movement of the ocean waves into electricity, therewith, produce enough power for the energy supply of some cities. Such is the case of mechanisms like the Salter's Duck, Limpet, or the Oyster Aquamarine device, developed on the UK.

In the present document it is showed an alternative of power generation in Mexico through the usage of wave energy on its coasts. It is raised the utilization of a different kind of renewable energy out of those commonly used in Mexico, which are the wind energy, mainly, and solar energy.

Likewise, the design methodology used for the generation and selection of the most convenient proposal according to the proposed goals is exposed, as well as the detailed design of each of the components and the general assembly of the converter. This proposal also takes in account the development of the mathematical model of the WEC device, so it can be used as a global element of study for future works.

This work seeks, moreover, to be part of a solution -altogether- for the decrease of pollution in the country due to the production of electric power, taking in advantage the vast coastal area that Mexico has. In this way, adjacent cities to coastal areas can supply their electric power demand through the conversion of wave energy captured by WEC devices.

## Tabla de contenido

Índice de figuras .....	VI
Índice de tablas .....	VIII
Introducción .....	9
Planteamiento del problema .....	9
Justificación .....	10
Hipótesis.....	11
Objetivos .....	12
Alcances y limitaciones del trabajo .....	13
<b>CAPÍTULO I: ANTECEDENTES.....</b>	<b>14</b>
1.1    Energía undimotriz.....	15
1.1.1    Energía undimotriz en México.....	15
1.2    Convertidor de Energía Undimotriz .....	16
1.2.1    Estado del arte .....	17
1.2.1    Convertidores de energía undimotriz en México.....	20
<b>CAPÍTULO II:    MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
2.1    Conceptos Básicos.....	23
2.1.1    Energía Undimotriz.....	23
2.1.2    Convertidor Energía Undimotriz.....	27
<b>CAPÍTULO III:    DISEÑO MECÁNICO .....</b>	<b>38</b>
3.1    Diseño conceptual.....	39
3.1.1    Clarificación de Objetivos.....	39
3.1.2    Establecimiento de funciones .....	41
3.1.3    Fijación de requerimientos .....	42
3.1.4    Determinación de características.....	44
3.1.5    Generación de alternativas .....	45
3.1.6    Evaluación de alternativas .....	54
3.2    Diseño Estructural .....	58
3.2.1    Diseño de componentes.....	59
3.2.2    Materiales .....	63
3.2.3    Componentes de ensamblaje.....	65
3.2.4    Memoria de Cálculo .....	79
3.2.5    Análisis de fatiga en CAE .....	96
3.2.6    Ensamblaje del convertidor undimotriz.....	106

3.2.7	Modelo dinámico .....	110
<b>CONCLUSIÓN</b>	.....	114
<b>REFERENCIAS</b>	.....	116
<b>ANEXO</b>	.....	120
<b>TRABAJOS FUTUROS</b>	.....	130

## Índice de figuras

<b>Fig. 1</b>	Potencial undimotriz mundial en kilowatts por unidad de longitud de cresta [7].....	16
<b>Fig. 2</b>	Esquema del dispositivo WEC patentado por los Girard [4]. .....	17
<b>Fig. 3</b>	Esquema del dispositivo WEC desarrollado por Yoshio Masuda [4].....	17
<b>Fig. 4</b>	Esquema general de una Columna de Agua Oscilante (OWC) [14].....	18
<b>Fig. 5</b>	Representación gráfica de una granja undimotriz con dispositivos Pelamis [9].....	18
<b>Fig. 6</b>	Esquema general de las partes principales del Wave Dragon [15]. .....	19
<b>Fig. 7</b>	Esquema de funcionamiento del Oyster 800 [9]. .....	19
<b>Fig. 8</b>	Esquema del funcionamiento del dispositivo WEC "The duck". Ilustración: Al Hicks, NREL. ....	20
<b>Fig. 9</b>	Características de físicas de una ola [16]. .....	23
<b>Fig. 10</b>	Ilustración de los límites de aprovechamiento energético undimotriz [4]. .....	26
<b>Fig. 11</b>	Esquema conceptual del rompimiento de las olas en la costa [4]. .....	26
<b>Fig. 12</b>	Etapas de conversión energética [19]. .....	28
<b>Fig. 13</b>	Diagrama eléctrico general de una granja de dispositivos undimotrices HVAC [19]. .....	28
<b>Fig. 14</b>	Representación gráfica de la clasificación por localización de los convertidores de energía undimotriz. ....	29
<b>Fig. 15</b>	Representación gráfica de la clasificación de dispositivos undimotrices por su principio de funcionamiento y localización (términos generales). .....	32
<b>Fig. 16</b>	Representación gráfica de algunos sistemas undimotrices con diferentes principios de trabajo. ...	33
<b>Fig. 17</b>	Clasificación por tamaño del dispositivo y dirección de la ola. (a) Punto de Absorción: OPT, (b) Atenuador: Pelamis, y (c) Terminador: Wave Dragon.....	34
<b>Fig. 18</b>	Diagrama de árbol de objetivos. ....	41
<b>Fig. 19</b>	Esquema de caja negra.....	41
<b>Fig. 20</b>	Análisis funcional del dispositivo WEC - "Caja transparente" .....	42
<b>Fig. 21</b>	Método de especificaciones de funcionamiento – Hoja de especificaciones o requerimientos.....	43
<b>Fig. 22</b>	Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y características de ingeniería. Despliegue de la Función de Calidad (QFD). .....	45
<b>Fig. 23</b>	Representación gráfica de la tabla morfológica para la generación de alternativas. ....	47
<b>Fig. 24</b>	Esquema de selección de alternativa No. 1.....	48
<b>Fig. 25</b>	Esquema de la primera propuesta de diseño. ....	49
<b>Fig. 26</b>	Esquema de selección de alternativa No. 2.....	50
<b>Fig. 27</b>	Representación gráfica de la segunda propuesta de diseño. ....	51
<b>Fig. 28</b>	Esquema del ensamble de componentes de la planta piloto en Pecem Port, Brasil.....	51
<b>Fig. 29</b>	Esquema de selección de alternativa No. 3.....	52
<b>Fig. 30</b>	Representación gráfica de la tercera propuesta de diseño. ....	53
<b>Fig. 31</b>	Evaluación de la alternativa de diseño No. 1.....	55
<b>Fig. 32</b>	Evaluación de la alternativa de diseño No. 2.....	56
<b>Fig. 33</b>	Evaluación de la alternativa de diseño No. 3.....	57
<b>Fig. 34</b>	Esquema del primer diseño conceptual desarrollado.....	60
<b>Fig. 35</b>	Evolución del esquema de diseño del dispositivo WEC, en forma descendente. ....	62
<b>Fig. 36</b>	Medidas generales del flotador, en mm. ....	66
<b>Fig. 37</b>	Medidas generales del anillo de soporte, en mm. ....	67
<b>Fig. 38</b>	Medidas generales de la placa de soporte para sistema PTO, en cm. ....	68
<b>Fig. 39</b>	Medidas generales de la flecha de transmisión, en cm. ....	70
<b>Fig. 40</b>	Medidas generales del Soporte de rodamiento antirretroceso, en mm. ....	71

<b>Fig. 41</b> Medidas generales de la base estructural, en cm. ....	73
<b>Fig. 42</b> Esquema general e información del rodamiento de la familia FR.....	74
<b>Fig. 43</b> Medidas generales de la Base de soporte de generador eléctrico, en cm.....	75
<b>Fig. 44</b> Medidas generales de la placa de soporte para sistema de transmisión, en cm. ....	76
<b>Fig. 45</b> Medidas generales de la flecha de transmisión, en cm. ....	77
<b>Fig. 46</b> Generador eléctrico para aplicaciones de energía renovable de la empresa Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd.....	78
<b>Fig. 47</b> Pieza de estudio finalizada: Flecha de transmisión.....	97
<b>Fig. 48</b> Configuración de acero tipo 316L. ....	97
<b>Fig. 49</b> Proceso de mallado: Resultados de calidad de los elementos de la malla. ....	98
<b>Fig. 50</b> Estudio de Fatiga en Ansys Workbench: Resultado de la malla configurada al eje. ....	99
<b>Fig. 51</b> Esquema del posicionamiento de las cargas involucradas.....	100
<b>Fig. 52</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Factor de Seguridad de Fatiga. ....	101
<b>Fig. 53</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises. ....	101
<b>Fig. 54</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises. Sección del hombre de la flecha de transmisión.....	102
<b>Fig. 55</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 2: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises. ....	103
<b>Fig. 56</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 2: Factor de Seguridad de Fatiga. ....	103
<b>Fig. 57</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 3: Factor de Seguridad de Fatiga. ....	104
<b>Fig. 58</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 3: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises. ....	104
<b>Fig. 59</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench: Vida (Número de ciclos de trabajo). ....	105
<b>Fig. 60</b> Estudio de fatiga en Ansys Workbench: Daño. ....	105
<b>Fig. 61</b> Representación gráfica del ensamblaje del dispositivo WEC y la disposición de cada elemento que lo conforma.....	107
<b>Fig. 62</b> Representación gráfica del ciclo de trabajo de un flotador.....	108
<b>Fig. 63</b> Plano de la sección transversal del flotador del dispositivo WEC.....	110

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Nomenclatura utilizada en energía undimotriz. ....	24
<b>Tabla 2</b> Configuraciones posibles de sistemas de amarre existentes y su el grado de compatibilidad con dispositivos WEC.....	36
<b>Tabla 3</b> Panorama descriptivo del plástico seleccionado para el diseño de componentes. ....	63
<b>Tabla 4</b> Panorama descriptivo del acero seleccionado para el diseño de componentes. ....	64



## Introducción

La generación de energía eléctrica es una de las actividades más importantes en el día a día a nivel global. Sin embargo, los procesos utilizados y la sobreexplotación de recursos para la generación de energía han provocado un aumento en los índices de contaminación en todo el planeta. Desde el incremento en los gases de efecto invernadero, hasta el deterioro y destrucción de hábitats completos.

Como respuesta a los cambios climáticos que se han presentado en los últimos años, se propone el desarrollo de tecnologías que tengan como principio el uso de energías renovables para sustituir, paulatinamente, los procesos actuales que utilizan combustibles contaminantes, principalmente: el petróleo, carbón y gas natural.

Las energías renovables provienen de la utilización de recursos naturales, considerados como recursos que pueden regenerarse o que existen en gran abundancia, para la generación de energía. Dentro de las tantas ventajas que tienen sobre los combustibles fósiles se encuentra la abundancia y diversidad de sus recursos a lo largo todo el planeta, así como también el potencial este tipo de energías ofrece para su transformación en energía limpia. Sin embargo, la principal ventaja que ofrece este tipo de energías radica en la disminución de la producción de emisiones contaminantes y, por lo tanto, gases de efecto invernadero.

## Planteamiento del problema

El abastecimiento de energía eléctrica es una necesidad imperativa constante que se presenta a nivel global, pues la mayoría de las actividades, sino es que en general, son llevadas a cabo con la ayuda de electricidad.

Actualmente, la producción mundial de energía primaria se divide en 5 bloques principales, los cuales son: el petróleo, carbón, gas natural, nucleenergía y energías renovables. Según el Balance Nacional de Energía emitido por la Secretaría de Energía (SENER), México ocupó el decimoquinto lugar a nivel mundial con el 1.4 % de la producción total mundial de energía, así mismo, este documento avala que las energías más utilizadas para producir ya sea energía eléctrica, mecánica o térmica, son el aprovechamiento de los yacimientos de petróleo y la obtención de carbón [1]. Éstas, junto con otras fuentes de energía como el gas natural, tienen graves consecuencias ecológicas que perturban el desarrollo medioambiental del planeta. Algunos otros impactos negativos a considerar son el derrame de petróleo en alta mar, interrupción de desarrollo de vida

silvestre, contaminación de fuentes de agua, contaminación constante del aire, la destrucción de hábitats, erosión del suelo, eliminación de vegetación, entre otros.

Además de las consecuencias mencionadas, se adhiere de la misma manera la decadencia de los yacimientos para la obtención de estos recursos naturales. Debido a esto, los costos de bloques como la gasolina, la electricidad, gas natural, entre otros, aumentan paulatinamente de tal forma que la comparación de los precios actuales contra los precios de hace una década, muestran una diferencia remarcable.

En México, el consumo de energía durante el 2016, según la Secretaría de Energía, superó la producción de la misma [1]. Por tal motivo, el precio de algunos energéticos ascendió y es una tendencia que se sigue manteniendo actualmente.

Por otro lado, la utilización de las energías renovables ha tomado fuerza en los últimos años como una solución para a la producción de energías limpias. Sin embargo, existen bloques dentro de las energías renovables que no han sido completamente desarrollados y que impide, en gran parte, la sustitución de los procesos actuales de producción energética.

## Justificación

El aprovechamiento de las energías renovables es un factor importante dentro de la producción energética mundial, que puede satisfacer la demanda global e incluso superarla con creces.

En la actualidad, México ocupa el lugar 14 a nivel internacional en contaminación por emisión de gases debido a la utilización del petróleo, principalmente, y carbón. En 2018, el Sistema Nacional de Información Ambiental y Recursos Naturales estableció que los vehículos automotores representaron el mayor problema de contaminación ambiental [2]. Sin embargo, la industria petroquímica y la generación de energía eléctrica generaron la mayor producción de dióxido de azufre en el mismo periodo.

El diseño de un mecanismo que asimile la energía mecánica generada por las olas del mar para convertirla en energía eléctrica, puede ser una solución para la demanda energética existente en México, además de fungir como un método de producción energética libre de emisión de contaminantes.

El desarrollo de este mecanismo prevé que se aproveche el potencial undimotriz encontrado en los litorales de México para abastecer a las ciudades costeras y que, mediante el desarrollo de esta

investigación se aliente a otros ingenieros a desarrollar tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de energía inagotable en el país.

Para el desarrollo del proyecto, se tomarán en cuenta algunos datos importantes como la calidad o potencial undimotriz en diferentes puntos de la república, fauna y condiciones climatológicas de las zonas de estudio propuestas, entre otras. Es importante señalar que, para el presente trabajo, se estudiarán algunos proyectos realizados en otros países en donde la investigación sobre tecnologías de energía undimotriz es más avanzada. Por último, se tomará en consideración algunas de las iniciativas de desarrollo de tecnología undimotriz en el país, como el proyecto licitado por CFE en mayo de 2012 para generación de energía undimotriz en Baja California [3]. Esto ayudará para establecer parámetros reales y destacar las oportunidades que se pueden utilizar, sin hacer caso omiso de los contratiempos o vulnerabilidades que se pueden presentar para el desarrollo de este propósito.

## Hipótesis

Para realizar el diseño del mecanismo se estudiarán los antecedentes de aprovechamiento de energía undimotriz en el mundo, así como los prototipos y patentes registradas existentes al día de hoy, de modo que se puedan identificar los conceptos básicos concernientes a los dispositivos WEC desarrollados y que de esta manera, se puedan identificar las características que pueden ser adoptadas en el diseño de acuerdo a las características de oleaje de estudio; así como asegurar que cumpla su función adecuadamente. Para estos efectos, se seguirá una metodología de diseño que permita el desarrollo de diferentes propuestas que puedan ser comparadas entre sí y elegir la opción más adecuada según las necesidades identificadas.

Para asegurar su función, se llevará a cabo un estudio de vida a los componentes con mayor interacción energética del sistema de toma de potencia de acuerdo al material seleccionado para su construcción. De esta forma se busca garantizar que no existan fallos tempranos o graves en el mecanismo, y se logre que el mantenimiento se convierta en una tarea fácil y poco recurrente.

Se hará uso de software CAD para la modelación en 3D del mecanismo y software CAE para el desarrollo de las simulaciones mecánicas necesarias. En este proceso, se espera identificar las oportunidades de mejora que puedan presentarse de acuerdo a los resultados obtenidos.

## Objetivos

### *Objetivo General*

Diseñar un dispositivo que sea capaz de convertir la energía mecánica generada por las olas en energía eléctrica, considerando las tecnologías existentes y las características de potencial undimotriz en diferentes partes del mundo.

### *Objetivos específicos*

Obtener información sobre tecnologías de desarrollo undimotriz existentes.

Diseñar una estructura resistente a diferentes situaciones climáticas.

Obtener datos de potencial undimotriz en México y otras partes del mundo.

Diseñar un convertidor de energía undimotriz.

Desarrollar el modelo dinámico del sistema a diseñar.

## Alcances y limitaciones del trabajo

### *Alcances.*

- Para el presente trabajo, se contemplará exclusivamente el desarrollo del diseño estructural de un convertidor undimotriz.
- Se recabará información sobre convertidores de energía undimotriz existentes.
- Se desarrollará el diseño conceptual del convertidor por medio de una metodología establecida para estos propósitos.
- Se contemplarán datos de potencial undimotriz de países que ya han realizado investigaciones relacionadas con el presente trabajo.
- El diseño estructural contemplará un estudio de fatiga a la flecha de transmisión debido la importancia de su trabajo e interacción energética.
- Los estudios realizados se llevarán de forma estática. No se considera el estudio dinámico del sistema dentro el diseño mecánico.

### *Limitaciones.*

El limitado conocimiento sobre tecnologías la energía undimotriz y los aspectos que la conforman, supuso un reto al momento de investigar e intentar comprender algunos temas especializados que lo conforman. Además, la mayor parte de la información que está disponible sobre estas tecnologías es escasa y difícil de comprender.

Otro aspecto importante a considerar, es que la información y recursos, como datos de oleaje, potencial undimotriz, centros de investigación, laboratorios, etc.; son casi nulos debido a que la energía undimotriz supone un tipo de energía renovable nueva, en México.

Lo anteriormente descrito, condujo a la delimitación de ciertos aspectos del diseño mecánico y del trabajo en general, a causa de la complejidad del problema que se propuso inicialmente.

# CAPÍTULO I: **ANTECEDENTES**

## 1.1 Energía undimotriz.

El movimiento de las olas es una de las consecuencias de la interacción del Sol con la Tierra, a través del viento. Debido a que existe una diferencia de temperaturas en la atmósfera, por el calentamiento desigual generado por el Sol, se generan corrientes de vientos que, al interactuar con la superficie oceánica provoca la generación de las olas.

Existen otras causas que intervienen en el proceso de generación de olas, como las fuerzas gravitacionales ejercidas por el Sol y la Luna, tormentas, maremotos, entre otras. Sin embargo, el viento es considerado el principal causante de la generación de olas [4].

La energía mecánica liberada gracias a la oscilación de las olas, puede ser aprovechada para ser convertida en energía eléctrica a través de dispositivos mecánicos instalados en el mar; a esto se le conoce como energía undimotriz.

El valor energético undimotriz teórico mundial, de acuerdo con The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), es de 32,000 TWh/año [5]. Sin embargo, un estudio realizado por K. Gunn y C. Stock-Williams, señala que el potencial undimotriz teórico mundial es de aproximadamente  $2.11 \pm 0.05$  TW con un 95% de confiabilidad, con cantidades iguales en ambos hemisferios [6]. Si toda la energía undimotriz fuera hipotéticamente aprovechada, podría representar el 12% del consumo energético mundial total. La potencia estimada por la Agencia Internacional de Energía (AIE, en inglés International Energy Agency o IEA) es de 17.7 GW [7].

### 1.1.1 Energía undimotriz en México.

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México cuenta con 11,122 km de litoral y 3'149,920 km<sup>2</sup> de superficie marítima [8]. Sin embargo, a pesar de la gran extensión marítima, el potencial undimotriz encontrado en las extensiones territoriales del país no supera el rango de 20-30 kW/m, como se observa en la Fig. 1. Esto se debe a que el potencial undimotriz encontrado entre los trópicos es considerablemente menor al potencial encontrado entre las latitudes 30-60° de ambos hemisferios. No obstante, el reporte presentado por Electric Power Research Institute (EPRI, en español Instituto de Investigación de Energía Eléctrica) muestra que el recurso total de energía undimotriz en el Golfo de México es de 60 TWh/año [9]. Lo que supone



un aprovechamiento considerable de energía para su conversión y consumo en los estados que comparten litoral en el Golfo de México.

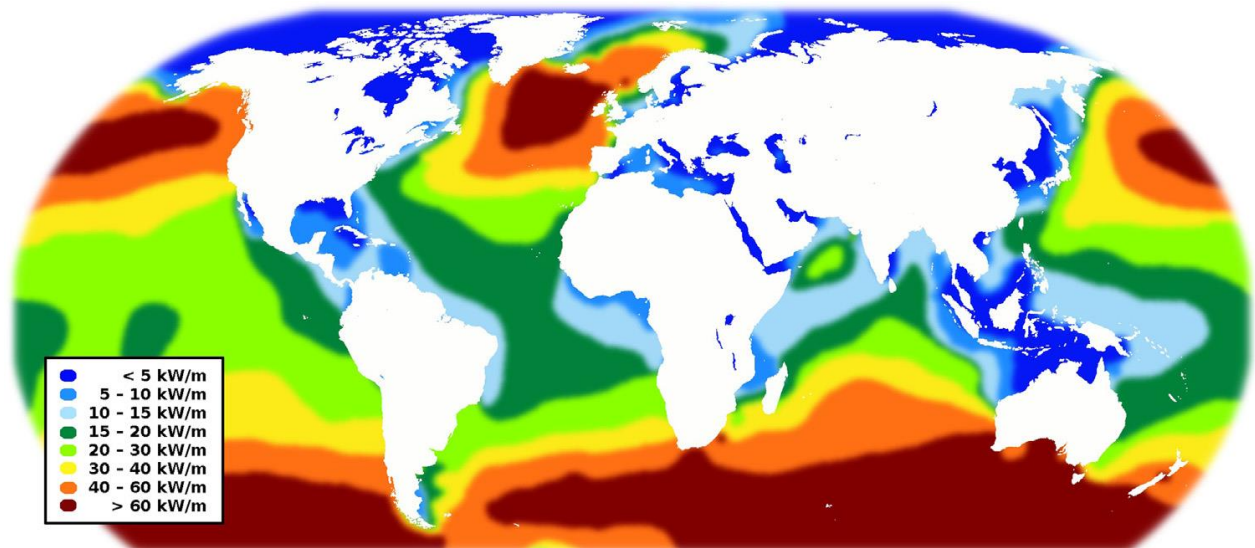


Fig. 1 Potencial undimotriz mundial en kilowatts por unidad de longitud de cresta [7].

Por otro lado, el aprovechamiento de energías oceánicas surge como una nueva alternativa de generación eléctrica a partir de la creación del Centro Mexicano de Innovación de Energías del Océano (CEMIE-Océano) y la publicación del Mapa de Ruta Tecnológica, en donde se expresan los objetivos para el aprovechamiento del recurso marino al 2030 [10]. Este documento muestra las necesidades tecnológicas y la información básica para establecer los puntos de partida de cada uno de los bloques pertenecientes a la energía oceánica. La información puede ser consultada en el documento de Cartera de Necesidades de Innovación y Desarrollo Tecnológico: Energía del Océano [11].

Actualmente, se está trabajando en el desarrollo de plataformas tecnológicas y bases de datos que puedan facilitar el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de la energía undimotriz en el país; además, se han presentado algunas licitaciones de proyectos undimotrices en el norte del país de los cuales se abordará en el siguiente tema.

## 1.2 Convertidor de Energía Undimotriz

Como se había explicado en el tema anterior, el movimiento ondulatorio de las olas genera energía mecánica que puede ser convertida a energía eléctrica. El objetivo de un convertidor de energía undimotriz o dispositivo WEC (Wave Energy Converter), es asimilar la energía cinética y/o potencial de las olas.

Existen muchas configuraciones de dispositivos WEC que han sido desarrollados desde el siglo pasado por países como Estados Unidos, Reino Unido, España, Escocia, China, entre otros.

### 1.2.1 Estado del arte

La idea de aprovechar el movimiento de las olas para generar energía eléctrica no es una idea nueva. Se ha encontrado información que data del siglo XIII en donde se muestra que las olas eran utilizadas para mover los molinos en China [12]. Sin embargo, la primera patente de registro para un convertidor de energía undimotriz fue registrada en 1799 por dos franceses conocidos como los Girard. El mecanismo desarrollado, como se muestra en la Fig. 2, consistía en una viga articulada a una estructura empotrada en la costa y una boya instalada en el otro extremo. Esta boya se encargaba de realizar el movimiento ascendente y descendente del mecanismo, que a su vez permitía el accionamiento del sistema de conversión energético.

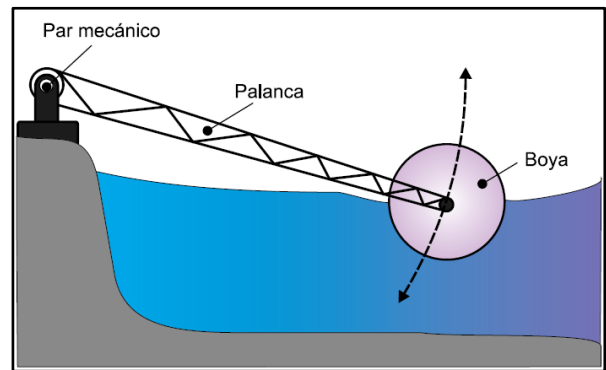


Fig. 2 Esquema del dispositivo WEC patentado por los Girard [4].

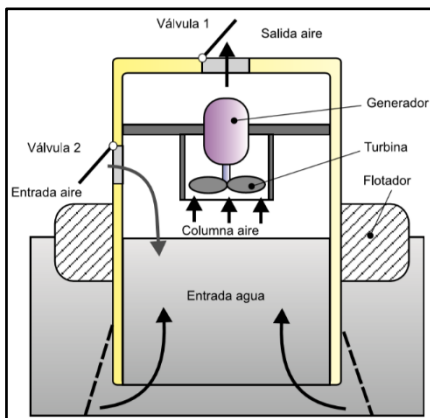


Fig. 3 Esquema del dispositivo WEC desarrollado por Yoshio Masuda [4].

No obstante, fue hasta la década de 1940 que se desarrolló el primer dispositivo WEC funcional por el profesor y comandante naval de Japón, Yoshio Masuda, probablemente considerado como el padre de la tecnología undimotriz moderna. El convertidor basaba su principio en el sistema desarrollado, algunos años atrás, por el francés Bouchaux-Praceique; consistía en aprovechar la presión ejercida por la diferencia de altura del agua en una columna de aire y que de esta forma, el aire contenido en la cámara, activase una turbina acoplada a un generador eléctrico, Fig. 3. Este es el principio

del convertidor WEC que hoy es conocido como Columna de Agua Oscilante (OWC, siglas en inglés).

La promesa de desarrollo de tecnología undimotriz llegó décadas después como una solución a la crisis de petróleo en 1973. En 1974, el Prof. Stephen Salter, de la Universidad de Edimburgo, publicó un artículo en la prestigiosa revista Nature sobre energía undimotriz que atrajo el interés de la comunidad científica internacional [13]. A partir de ese momento, países como Reino Unido,

Noruega, Japón e India comenzaron a realizar estudios e investigaciones para el desarrollo de dispositivos WEC.

Actualmente, existen miles de patentes sobre convertidores de energía undimotriz. Sin embargo, la mayor parte de los dispositivos desarrollados no son comerciales debido a la gran diferencia que existe en la relación costo-beneficio de cada uno de éstos.

Algunos de los dispositivos WEC más destacados se presentan a continuación.

**OWC** (Oscillating wave converter, por sus siglas en inglés): es un método que depende de una columna de aire y la diferencia de presiones generadas por olas [14] como puede observarse en la Fig. 4. Es similar a una turbina de viento que depende del movimiento del aire a través de una turbina. El flujo de aire es creado por el cambio de altura del agua en una columna debido a la ola.

Este cambio de altitud del agua produce una diferencia de presión, causando que el aire fluya a través de la turbina en ambas direcciones (i.e. hacia adentro y hacia afuera). Debido al flujo bidireccional del aire durante el ciclo de la ola, la turbina está destinada a rotar en una sola dirección para utilizar la energía de un ciclo completo de la ola.

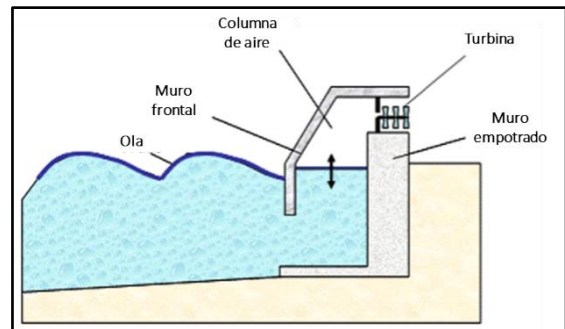


Fig. 4 Esquema general de una Columna de Agua Oscilante (OWC) [14].

**Pelamis:** es el dispositivo WEC que logró ser comercializado en forma de granja undimotriz [14]. Las secciones articuladas que conforman el dispositivo se encargan de asimilar el movimiento de las olas. La energía del movimiento relativo entre las secciones fuerza a los cilindros hidráulicos, quienes se encargan de presurizar aceite para activar un motor hidráulico y, por lo tanto, a un generador eléctrico. La forma del dispositivo, Fig. 5, adopta la apariencia de una serpiente; alargado y angosto.



Fig. 5 Representación gráfica de una granja undimotriz con dispositivos Pelamis [9].

**Wave Dragon:** es un convertidor de alta mar desarrollado en Dinamarca cuya estructura estacionariamente anclada flotante consiste en concentrar las olas entrantes, mediante sus dos reflectores, hacia una rampa doble curva, un depósito y un arreglo de turbinas hidráulicas de cabeza con altura baja [8]. Un prototipo del Wave Dragon de 57 metros de ancho fue desplegado en

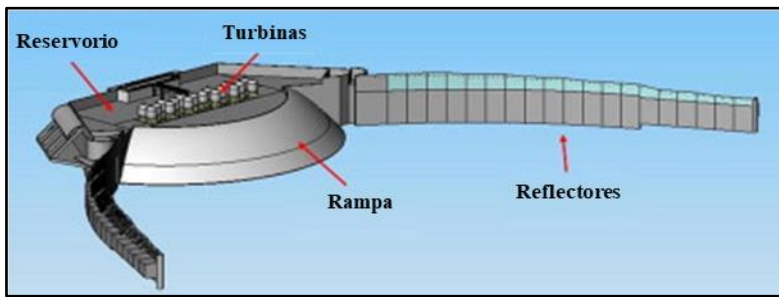


Fig. 6 Esquema general de las partes principales del Wave Dragon [15].

Nissum Bredning, Dinamarca. Su red fue conectada en Mayo de 2003 y fue probado por algunos años.

**Oyster:** se trata de un sistema de cabeceo de bisagra inferior desarrollado en 2009 por

Aquamarine Power, en Escocia. El dispositivo consistía en una solapa conectada a un deflector con bisagras ancladas al fondo del mar; la profundidad a la que estaba sometido el sistema era de alrededor de 10 metros y una distancia de la costa de medio kilómetro. Este mecanismo, que se encuentra casi completamente sumergido, realiza un movimiento de cabeceo de atrás hacia adelante y viceversa, esto, provocado por las olas costeras. Este movimiento ondulatorio del Oyster, activa dos pistones hidráulicos que se encargan de bombear agua a alta presión hacia una turbina hidroeléctrica acoplada a un generador eléctrico en la costa [15].

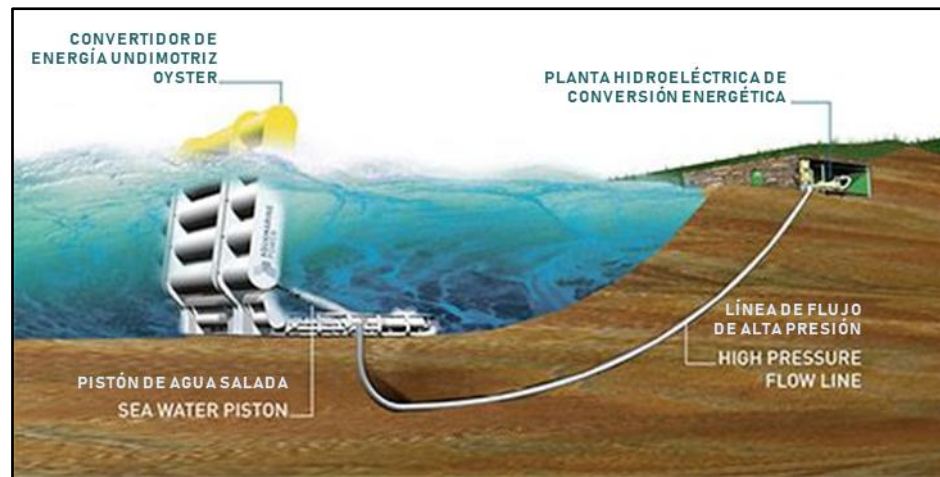


Fig. 7 Esquema de funcionamiento del Oyster 800 [9].

**The Duck:** Es, probablemente, el dispositivo de altamar más conocido de la década de 1970 y principios de 1980. Consiste en un flotador en forma de leva que mantiene un movimiento oscilatorio de cabeceo, Fig. 7. Las primeras versiones consistían en una cadena de flotadores acoplados a una columna posicionada de forma paralela a las olas del mar para terminar la acción de las olas. El convertidor contaba con un sistema de toma de poder electro-hidráulico [13].



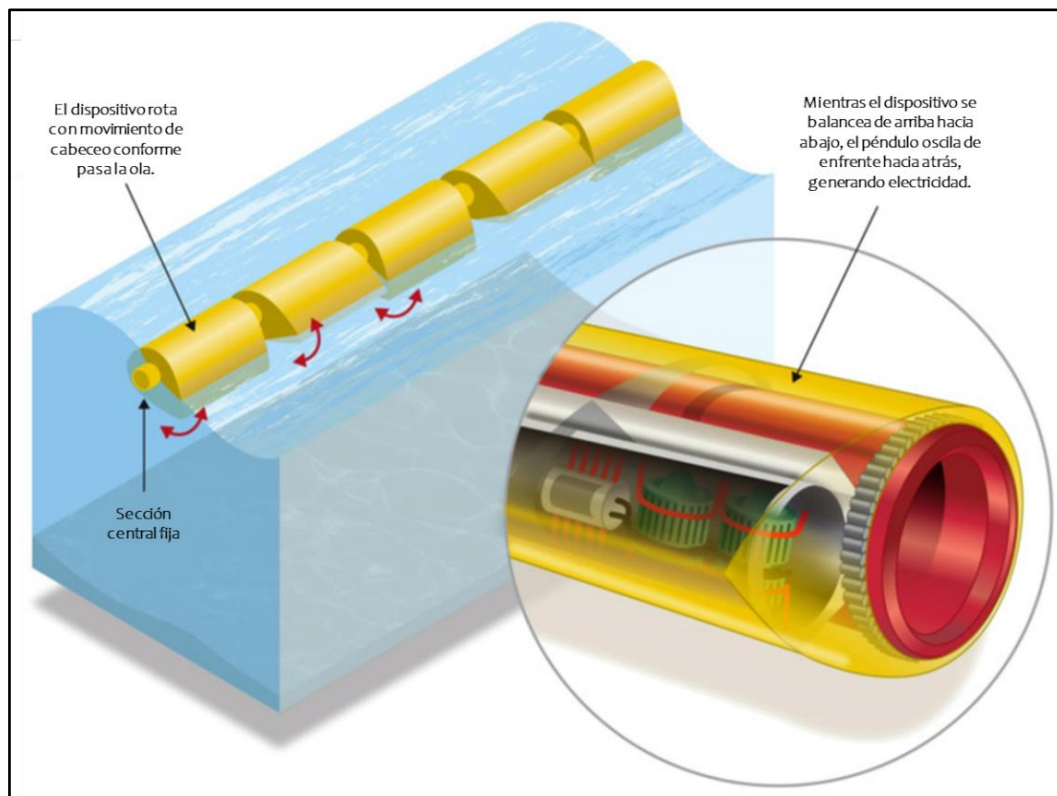


Fig. 8 Esquema del funcionamiento del dispositivo WEC "The duck". Ilustración: Al Hicks, NREL.

### 1.2.1 Convertidores de energía undimotriz en México

Como ya se había mencionado, México aún no cuenta con la infraestructura para el desarrollo de tecnologías que conviertan la energía de las olas en electricidad. Sin embargo, existen algunas propuestas de instalación de plantas generadoras de energía por medio de las olas. Algunos de estos proyectos se presentan a continuación [15].

- **Eco Wave Manzanillo:** Proyecto realizado por Eco Wave Power. Se postula como la primera planta de generación eléctrica por medio de las olas del mar a escala comercial en México y Latinoamérica. Estará situada en Manzanillo, Colima. Tendrá una capacidad instalada de 4.8 MW, con un factor de planta de 50%. La producción estimada será de 18,200 MWh por año, y la vida útil del proyecto es de 25 años.
- **Mareomotrices de Energías Renovables (MARERSA):** En 2012 ganó la licitación hecha por CFE para la construcción de una central de energía undimotriz en Rosarito, Baja California. El proyecto aún se encuentra en desarrollo desde 2012 por problemas de política en materia de energías oceánicas.

- **Energy WaveRoller:** Es un proyecto de la empresa finlandesa AW-ENERGY OY que plantea generar 20 MW. Se trata de un dispositivo de operación en costa (aproximadamente 0.3-2 km de distancia de la orilla del mar) en profundidades de entre 8 y 20 metros.
- **Sin nombre:** Proyecto realizado por investigadores de la Universidad de Mánchester, con la participación del Dr. Efraín Carpintero Moreno. Consta un dispositivo flotante que consta de tres boyas alineadas paralelamente que, con el movimiento de las olas, activan un actuador hidráulico que se encarga de transmitir la energía mecánica a un generador eléctrico. Se está estudiando la viabilidad de instalar un prototipo en las costas de Ensenada, Baja California.

# CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO



## 2.1 Conceptos Básicos

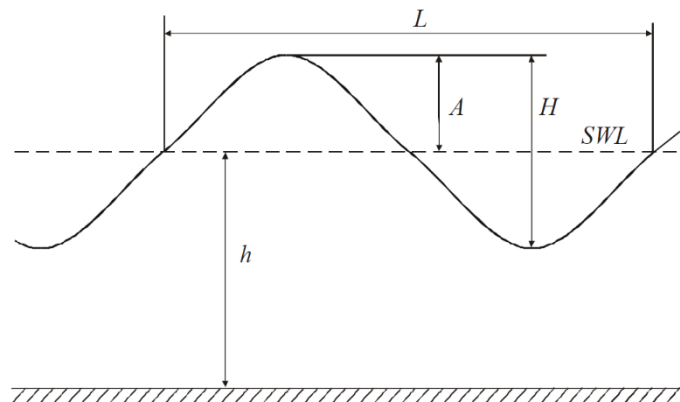
En este capítulo se abordarán los temas más esenciales para el desarrollo del presente trabajo, tales como: conceptos sobre energía undimotriz, dispositivos WEC y CFD.

### 2.1.1 Energía Undimotriz.

Recapitulando, la energía undimotriz es una energía renovable generada indirectamente por la energía solar. Gracias a la diferencia de presión y temperatura generada por el Sol, se generan corrientes de viento que soplan sobre la superficie del mar. Esa interacción provoca que se desarrollen pequeñas ondas en el mar que, eventualmente, se convierten en olas que viajan miles de kilómetros hasta romper en alguna costa [9].

Conocer las características de las olas y el potencial undimotriz disponible es un paso importante para el diseño de un dispositivo convertidor de energía undimotriz. Ambos contribuyen para establecer las características del dispositivo WEC de acuerdo al aprovechamiento de energía deseada.

La Fig. 9 y la Tabla 1 serán necesarias para entender las características físicas de las olas y la nomenclatura utilizada para el estudio de la energía undimotriz, respectivamente [16].



**Fig. 9** Características de físicas de una ola [16].

**Tabla 1** Nomenclatura utilizada en energía undimotriz.

<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades/Valor</i>
<i>SWL</i>	Nivel promedio del mar	
<i>h</i>	Profundidad debajo del SWL	<i>m</i>
$\lambda$ o <i>L</i>	Longitud de onda = $gT^2/(2\pi)$	<i>m</i>
$\rho$	Densidad del mar	1000 $kg/m^3$
<i>g</i>	Constante gravitacional	9.81 $m/s^2$
<i>A</i>	Amplitud de la ola	<i>m</i>
<i>H</i>	Altura de la ola	<i>m</i>
<i>T</i>	Periodo de la ola	<i>s</i>

En condiciones reales, las olas son difíciles de predecir y asimilar debido a que no existe un orden de formación de ondas irregulares. Por tal motivo, la mayor parte de las investigaciones se basan en modelos lineales de onda, como la teoría de ondas de Airy [9].

La energía que tiene una ola depende de la interacción que existe entre el viento y la superficie del mar [4]. Es decir, depende de la velocidad con la que sopla el viento, el tiempo de interacción entre las partículas del viento y el océano, así como el área superficial de interacción entre ambos. Existen varios métodos para calcular el potencial undimotriz existente en un determinado lugar. Sin embargo, la Ec. (1) representa el método comúnmente usado para representar el potencial existente en un determinado sitio [17]:

$$P_{\omega} = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad \text{Ec. (1)}$$

donde  $P_{\omega}$  representa el flujo energético por unidad de longitud de cresta de la ola en kW/m;  $\rho$  es la densidad del agua del mar ( $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ );  $g$  representa la aceleración de la gravedad;  $T_e$  es el periodo energético o de nivel cero; y  $H_s$ , la altura significativa de las olas.

Los dos últimos términos de la Ec. (1) son determinados gracias a la recopilación de datos ya sea por medición satelital, o por el uso de equipo especializado como las boyas utilizadas por el NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). El periodo energético  $T_e$  es determinado como el período de tiempo que transcurre entre valores sucesivos del paso de una ola dos veces consecutivas por una línea imaginaria situada a la mitad de distancia entre una cresta y un valle;

mientras que  $H_s$  se define como la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en un registro [4].

La potencia media total de un mar típico, puede ser calculada modificando la Ec. (1) como se representa en la Ec. (2).

$$P_s = 0.49T_e H_s^2 \quad \text{Ec. (2)}$$

Es importante destacar que este método es utilizado, exclusivamente, para áreas de aguas profundas.

Para el estudio de la potencia undimotriz en profundidades marítimas particulares [17], Venugopal y Reddy proponen la siguiente ecuación:

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) \cdot \bar{c}_g(f, \theta) df d\theta \quad \text{Ec. (3)}$$

donde  $S(f, \theta)$  es el espectro del estado del mar que especifica cómo la energía undimotriz, proporcional a la varianza de la elevación de la superficie, es distribuida en términos de la frecuencia  $f$  y la dirección o ángulo de propagación de la ola  $\theta$ ; y  $\bar{c}_g(f, \theta)$ , que es la celeridad o la velocidad resultante de un grupo de olas.

Para determinar el desempeño de un dispositivo WEC se calcula el factor de capacidad de éste, como se expresa en la Ec. (4).

$$C_f = 100 \cdot \frac{P_e}{R_p} \quad \text{Ec. (4)}$$

donde  $P_e$  representa la energía eléctrica extraída por un dispositivo WEC y  $R_p$  la potencia nominal de cada uno de los sistemas.

Los sitios en donde se puede extraer la energía de las olas con mayor potencial energético, se encuentran entre las latitudes de 30° y 60° en ambos hemisferios. Esto se debe a que los vientos existentes en estas regiones soplan con mayor regularidad, lo que provoca que la actividad undimotriz se vea incrementada en un gran porcentaje. Por ejemplo [4], Los vientos procedentes del golfo de México, que soplan con una dirección predominante del noreste, cruzan el Atlántico y tienen varios miles de kilómetros para transferir energía al océano Atlántico. Estos vientos crean grandes olas que llegan a las líneas de costa de Europa.

La mayor parte de la energía contenida en las olas se encuentra prácticamente en la superficie de los océanos, como se muestra en la Fig. 10.

De esta forma, el diseñador deberá tomar en cuenta que el 95% de la energía contenida por las olas se encuentra entre el límite comprendido entre el nivel promedio del mar, o en su caso la superficie, y una profundidad especificada de una cuarta parte de la longitud de onda de las olas.

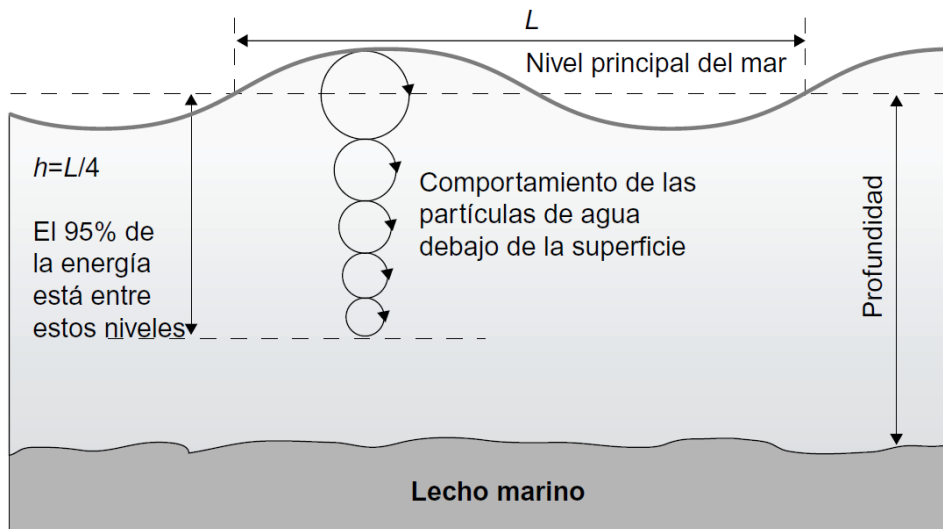


Fig. 10 Ilustración de los límites de aprovechamiento energético undimotriz [4].

Sin embargo, la energía de las olas se ve disminuida al irse aproximando gradualmente a la costa. Esto se debe a que la interacción que existe entre las partículas del lecho marino y las partículas de agua genera una fricción, teniendo mayor impacto cuando la profundidad es menor a  $L/4$ .

Conforme las olas avanzan hacia la costa, la velocidad de avance y la longitud de onda disminuyen, y su altura aumenta hasta que la velocidad de las partículas del fluido excede la velocidad de avance de la ola (velocidad de fase), Fig. 11. Esto provoca que la ola se vuelva inestable y rompa en la costa.

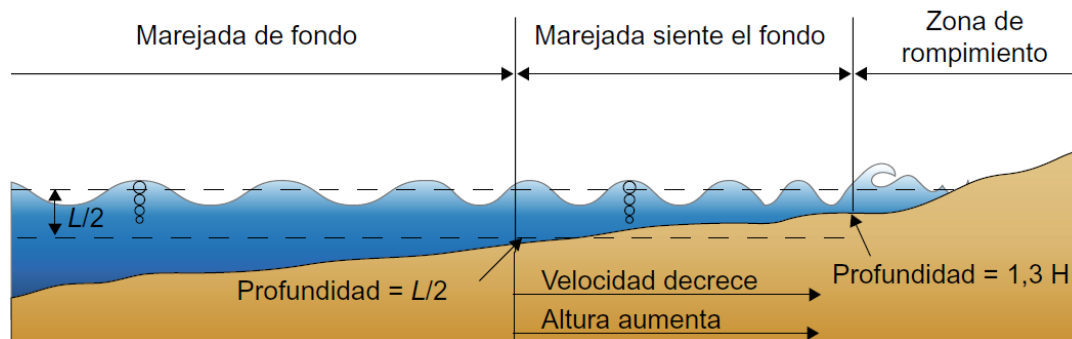


Fig. 11 Esquema conceptual del rompimiento de las olas en la costa [4].

### 2.1.2 Convertidor Energía Undimotriz.

Un dispositivo WEC es una máquina o mecanismo que tiene como fin el extraer la energía proveniente de las olas y convertirla en energía aprovechable [18].

La extracción de la energía generada por las olas puede llevarse a cabo de forma mecánica, neumática o hidráulica. Estos métodos de obtención de energía son usualmente llamados sistemas de toma de poder (PTO, en inglés power take-off) y pueden ser divididos en etapas dependiendo del dispositivo WEC [19], Fig. 12. Estas etapas se dividen de la siguiente forma:

- *Conversión primaria:* encargada de asimilar la energía proveniente de las olas a través de sistemas mecánicos, hidráulicos y/o neumáticos. El objetivo de esta etapa reside en convertir el movimiento oscilatorio de baja frecuencia de las olas en un movimiento rápido.
- *Conversión secundaria:* encargada de convertir la energía mecánica asimilada en la etapa anterior, en energía eléctrica. Dentro de los elementos empleados para llevar a cabo el objetivo de esta etapa se encuentran las turbinas hidráulicas y neumáticas, cilindros hidráulicos de alta presión, generadores lineales, entre otros.
- *Conversión terciaria:* esta etapa representa el conjunto de sistemas de conexión de los dispositivos WEC con la red eléctrica. Estos sistemas se encargan de elevar la potencia eléctrica generada por los convertidores y establecen la señal adecuada para el aprovechamiento del recurso. En granjas undimotrices de altamar se llevan a cabo dos niveles de conversión de voltaje, como se muestra en la Fig. 13.

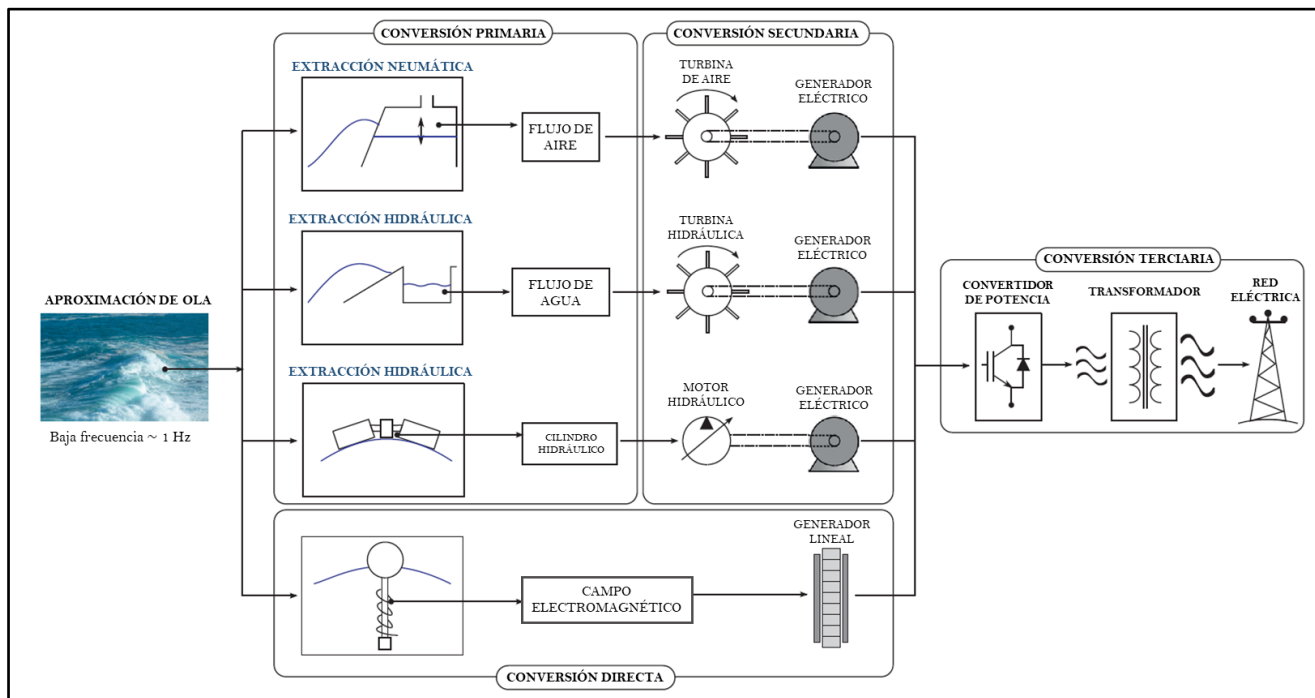


Fig. 12 Etapas de conversión energética [19].

- Conversión directa:* Este tipo de conversión energética resume las tareas de las dos primeras etapas anteriormente mencionadas. Consiste en el acoplamiento de un generador lineal eléctrico a un cilindro vertical. Este tipo de topología no necesita la

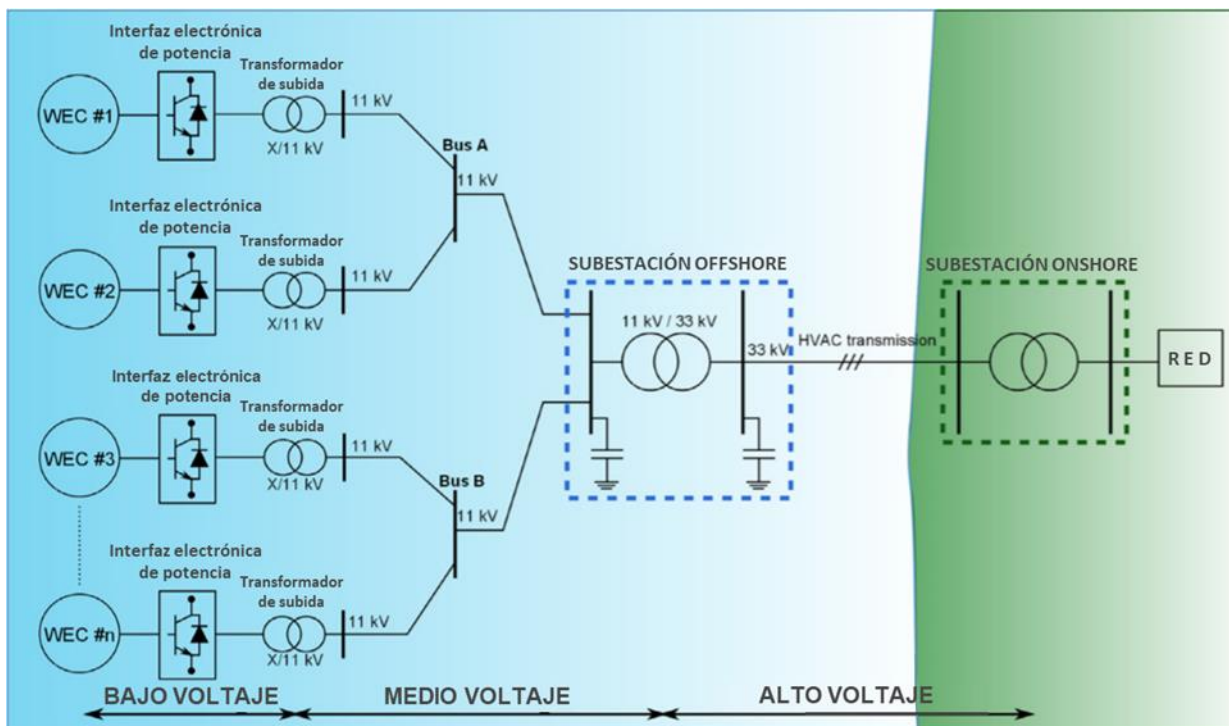


Fig. 13 Diagrama eléctrico general de una granja de dispositivos undimotrices HVAC [19].

intervención de sistemas mecánicos, por lo que presenta una estructura menos compleja que los sistemas de generadores eléctricos rotacionales.

Actualmente existen miles de patentes registradas de dispositivos WEC, de las cuales, cientos han sido desarrollados con el fin de realizar pruebas experimentales, prototipos de estudio, así como dispositivos comerciales para la generación de energía eléctrica. Esta tecnología, en general, puede ser clasificada de acuerdo a tres características principales: localización, principio de trabajo y tamaño [12, 20, 21].

#### Clasificación por Localización

Los dispositivos WEC son clasificados de acuerdo a su localización en función de la distancia que guardan respecto a la costa y la profundidad como se muestra en la Fig. 14. Esta clasificación se divide en los siguientes tres puntos [20]:

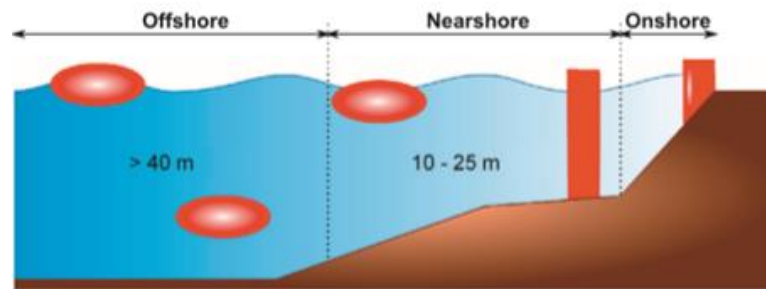


Fig. 14 Representación gráfica de la clasificación por localización de los convertidores de energía undimotriz.

- *Onshore*: Dispositivos en costa. Este tipo de dispositivos suelen encontrarse en nodos costeros con profundidades no mayores a 10 metros, esto permite que la instalación y el mantenimiento de éstos sea una tarea relativamente fácil. Estos convertidores suelen ser colocados sobre la superficie del mar para aprovechar el movimiento lineal y ondulatorio de las olas, o por la diferencia de altura de las mismas. Así mismo, pueden ser utilizados como rompeolas ya sea como presa o anclado en acantilados. Como desventaja, se presenta la dificultad del diseño para un mayor aprovechamiento de energía undimotriz, ya que existe una pérdida de energía por parte de las olas conforme éstas acortan distancia con la costa. Además, representa un cambio medioambientalista provocado por la aparición de estos dispositivos.
- *Nearshore*: Dispositivos cercanos a la costa. Los convertidores que se encuentran en esta clasificación suelen encontrarse a distancias de algunos cientos de metros y



profundidades de hasta 25 metros. Esto permite que los convertidores puedan aprovechar de una mejor manera la energía proporcionada por el movimiento de las olas. Estos dispositivos suelen encontrarse en el lecho marino, sin embargo, también pueden encontrarse dispositivos flotantes con algunos sistemas de amarre o anclaje, además de contar con una estructura adecuada que sea capaz de resistir las presiones ejercidas por las olas cuando sobrepasen el dispositivo.

- *Offshore*: Dispositivos de altamar. En este tipo de dispositivos suelen existir grandes ventajas sobre los demás, ya que es en donde se encuentra la mayor cantidad de energía undimotriz para su conversión. Por otro lado, los convertidores de este tipo presentan grandes desafíos debido a la carga que tienen que soportar por el amplio poder que tiene el mar y las condiciones climatológicas que suelen presentarse. De modo que la construcción del dispositivo WEC debe ser capaz de sobrevivir por sí mismo en las impredecibles condiciones en las que se encuentra y brindar confiabilidad de trabajo para la conversión de energía. Éstos, por lo general, suelen encontrarse en la superficie del mar en localizaciones de más de 40 metros de profundidad.

#### Clasificación por Principio de Trabajo

Debido al rápido crecimiento de las tecnologías undimotrices a nivel mundial, la clasificación de estos dispositivos por medio de su principio de trabajo se ha ido modificando a través de los años ya que el entendimiento por parte de diferentes autores, ha permitido expandir el panorama de una forma más exacta [20]. Esto ha permitido asignarle a cada prototipo y patente existente una clasificación adecuada.

Para lograr esto, algunos autores como Alexandra Price [21] y Jochem W. Weber [22] han realizado una diferente interpretación de la clasificación de los WEC, logrando incluso clasificar algunos dispositivos que no están correctamente situados en la clasificación general.

Sin embargo, la normalización de estas tecnologías todavía deja hueco a la imaginación para seguir mejorando la información existente sobre la clasificación de convertidores de energía undimotriz.

La clasificación general por su principio de trabajo, como se muestra en la Fig. 15 se divide en las siguientes categorías [20]:

- **Diferencial de presión:** Este tipo de convertidores utiliza el Principio de Arquímedes. Suelen encontrarse debajo del mar anclados al lecho marino; lo que permite evitar daños por fenómenos como tsunamis, tormentas, entre otras. Por otro lado, el mantenimiento se vuelve una tarea difícil por el limitado acceso existente. El dispositivo aprovecha la diferencia de presiones que existe entre la superficie del cuerpo y la cresta de las olas. Esto quiere decir, que cuando la ola se encuentra sobre el cuerpo, ejercerá una presión sobre el dispositivo que provocará que baje y comprima el aire que se encuentra del mismo. Así mismo, puede tratarse de un sistema neumático y mecánico para la conversión de energía. Un ejemplo es el ya conocido AWS Ocean.
- **OWC: Columna de agua oscilante.** Este tipo de dispositivo es una extensión de la rama anterior. Consiste en una columna hueca parcialmente sumergida con una salida abierta en la parte superior. Dentro de la columna hueca, se forma una cámara por donde puede entrar el agua del mar, esta cámara puede tener paredes verticales o inclinadas. El agua que se encuentra dentro de la columna se encarga de ejercer presión y succión de aire por la diferencia de altura que gana el agua debido al movimiento de las olas. El aire a su vez provoca el movimiento de una turbina eólica acoplada en el otro extremo de la columna. Este tipo de WEC son uno de los primeros dispositivos en convertir la energía undimotriz para su aprovechamiento. También puede ser una estructura flotante del tipo OWC con el mismo principio de funcionamiento.

- Estructuras flotantes: Suelen ser una representación de una boya que aprovecha el movimiento inducido por las olas. La captación de energía se da de diferentes formas, ya sea una oscilación vertical, horizontal, de cabeceo o una combinación de éstas. Algunos de éstos pueden aprovechar de una mejor manera la energía undimotriz aplicando un control que ayude a disminuir las perturbaciones no deseadas por el movimiento natural de la boya. Ejemplo de este tipo de convertidores son el Pelamis, The Duck (por el profesor Stephen Salter), entre otros.



Fig. 15 Representación gráfica de la clasificación de dispositivos undimotrices por su principio de funcionamiento y localización (términos generales).

- Dispositivos de desborde: Por lo general, consisten en una estructura inclinada que obliga que las olas sobrepasen parte o el dispositivo completo, de esta manera se puede aprovechar la energía potencial, cinética, o ambas por el movimiento de las olas. Este tipo de dispositivos suelen tener contenedores en donde se almacena temporalmente el agua; se crea una cabecera estática de agua en dichos contenedores, mientras que en la parte inferior se encuentra una turbina hidráulica por donde el agua fluirá de regreso al mar. Un ejemplo de estos es el ya conocido Wave Dragon.

- Dispositivos de impacto: Un ejemplo de estos convertidores es el mencionado con anterioridad, el WaveRoller. La estructura que distingue a estos dispositivos, por lo general, suele ser una paleta con una superficie plana o curva acoplada con una bisagra a una base anclada o fija al lecho marino. El principio de funcionamiento es sencillo, pues consiste en el cabeceo de la solapa para activar un generador eléctrico acoplado a la bisagra. Suelen ser colocados en cerca de la orilla o a unos cuantos metros de ésta. Otro ejemplo es el mundialmente conocido Aquamarine Power Oyster.

Algunos ejemplos también son señalados en la Fig. 16.

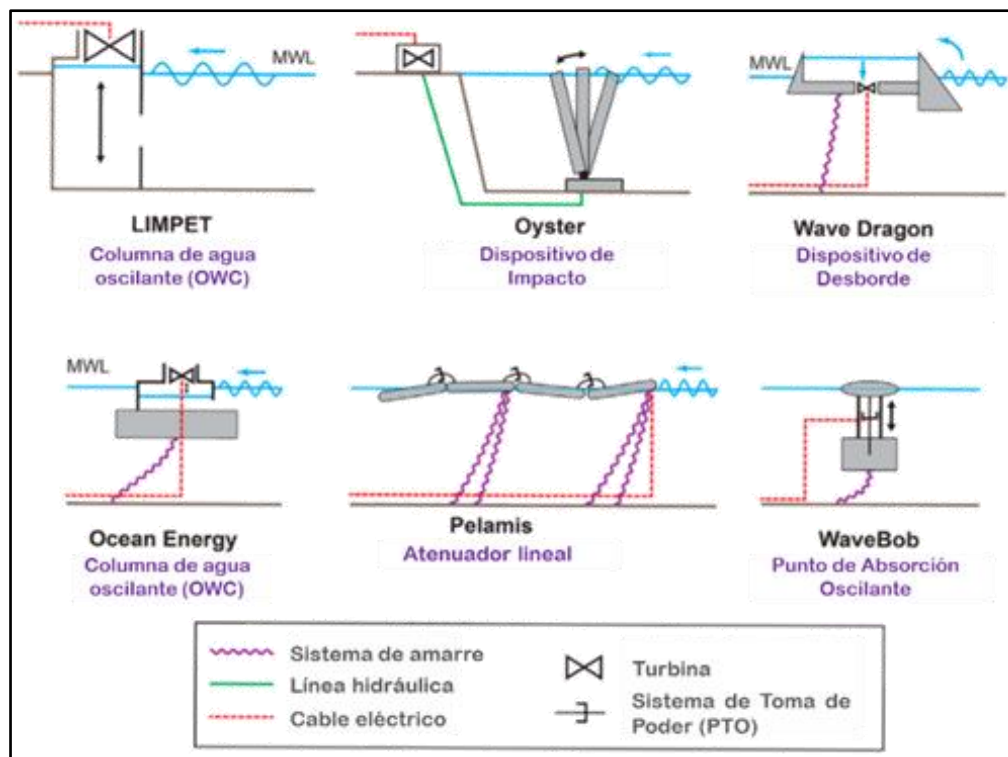


Fig. 16 Representación gráfica de algunos sistemas undimotrices con diferentes principios de trabajo.

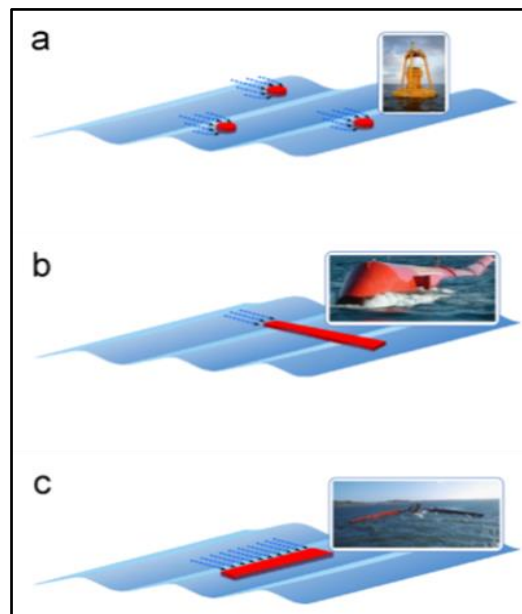
### Clasificación por Tamaño del Dispositivo y su Interacción con las Olas.

En esta clasificación se combinan dos características que guardan una relación importante entre ellas; tamaño y dirección de la ola. A continuación, se presenta la lista de esta clasificación (ver Fig. 17):

- Atenuador: En esta clasificación, los dispositivos undimotrices son alineados de acuerdo a la dirección incidente de la ola longitudinalmente. El tamaño de estos

convertidores, por lo general, es considerable debido a la posición que adopta para la conversión de energía. Uno de los ejemplos más destacados es el Pelamis.

- Terminadores: Al igual que la clasificación anterior, el tamaño de estos igual es considerable. Sin embargo, la posición que adoptan con respecto a la ola es ahora transversal, de modo que, al momento de la intercepción de la ola, esta se propaga. En esencia, la “termina”. Un ejemplo muy conocido es, nuevamente, el Wave Dragon.
- Puntos de absorción: A comparación de los anteriores, en esta clasificación los dispositivos undimotrices son pequeños en comparación al tamaño que guardan los demás. Además, la forma en la que recolecta la energía no se limita a una posición longitudinal o transversal, sino que puede ser en cualquier dirección debido al movimiento de las olas. Un ejemplo de estos dispositivos es el PowerBouy.



**Fig. 17** Clasificación por tamaño del dispositivo y dirección de la ola. (a) Punto de Absorción: OPT, (b) Atenuador: Pelamis, y (c) Terminador: Wave Dragon.

Para evitar que los dispositivos *offshore* y *nearshore* tengan movimientos de desplazamiento frontal o lateral, así como movimiento rotacional de viraje, se utilizan sistemas de amarre que actúen como una fuerza externa de restablecimiento con el fin de que el dispositivo WEC regrese a su posición de equilibrio.

Los dos requerimientos más importantes para un sistema de amarre son la resistencia a las condiciones medioambientales y las fuerzas involucradas en mantener el dispositivo WEC en

posición. Aunque muchas veces el sistema de amarre es considerado como un elemento de costo adicional en el presupuesto general del dispositivo WEC, el diseño de este tipo de sistemas debería ser tomado en consideración como un atributo dentro del esquema general de diseño que ayuda a mejorar la eficiencia de extracción energética de las olas.

Los sistemas de amarre depurados deben ser diseñados de tal forma que mantengan los dispositivos WEC en una orientación óptima, relativa a la incidencia con las olas y que puedan ser también una parte importante para un sistema de control óptimo [24].

Existen normas, guías y regulaciones para el diseño e instalación de sistemas de amarre marítimo, como los estándares de DNVGL-OS-E301 [25] y API RP 2SK [26], que regulan las instalaciones flotantes de altamar de industria petrolera y gas. Los estándares más estrictos tienen regulaciones dentro del diseño, análisis y mantenimiento debido al riesgo existente de pérdidas humanas y contaminación ambiental producido por una falla del sistema.

Sin embargo, los dispositivos WEC flotantes operan sin la presencia de tripulación y el riesgo de contaminación ambiental es considerablemente menor. Por lo que las guías y regulaciones están mayormente condicionadas por el costo general y las consecuencias de contaminación debido a una falla del sistema de amarre.

Una estrategia para mejorar el esquema económico general de un convertidor [24], reside en la instalación de varios dispositivos WEC en una zona en particular. Esto permite que el costo de conexión eléctrica por dispositivos sea reducido, además que se presenta la ventaja de una mayor producción.

Algunas de los requerimientos a considerar en sistemas de amarre para convertidores de energía undimotriz se muestran a continuación, junto con algunas configuraciones de sistemas de amarre [24], Tabla 2.

- El objetivo principal del sistema de amarre radica en mantener la estructura flotante en su posición establecida, con tolerancias especificadas bajo operación normal de cargas y cagas sujetas a condiciones extremas por tormentas.
- El movimiento del dispositivo no debe permitir fuerzas de tensión en los cables de transmisión eléctrica y debe permitir distancias de separación adecuadas entre los dispositivos en casos de instalaciones múltiples.

- Todos los componentes deben tener una buena resistencia mecánica general y durabilidad para la vida operacional del dispositivo, así como por el crecimiento marino y la corrosión.
- El sistema de amarre deberá permitir la desinstalación de un solo dispositivo sin afectar el amarre de los demás.
- La desinstalación de las líneas de amarre para su inspección y mantenimiento debe ser factible.
- El sistema de amarre no debe permitir el contacto entre sus líneas de conexión.
- El sistema de amarre no debe afectar, negativamente, la eficiencia del dispositivo. Si el sistema de amarre forma parte del sistema de control activo del dispositivo, este deberá ser diseñado dinámicamente como un elemento del sistema WEC general.

**Tabla 2** Configuraciones posibles de sistemas de amarre existentes y su el grado de compatibilidad con dispositivos WEC.

Configuración de sistema de amarre	Características	Compatibilidad del WEC
<b><i>Amarres de dispersión</i></b>		
<i>Sistema de amarre catenario</i>	Las líneas de amarre de suspensión libre del sistema de amarre de cadena son colocadas de forma horizontal al lecho marino, de modo que el punto de anclaje solo sea sometido a cargas horizontales. Las fuerzas de restablecimiento son principalmente generadas por el peso de las líneas de amarre para mantener el sistema en equilibrio.	Alta
<i>Sistema de amarre catenario múltiple</i>	Las líneas de amarre catenario incorporan pesos y boyas para formas en “S” o diferente configuraciones de dispositivos WEC. Puntos de inclinación y de contacto suave son permitidos.	Alta
<i>Amarre de dispersión tirante</i>	Las líneas de amarre de este sistema están instaladas, típicamente, con un determinado ángulo del lecho marino de modo que el punto de anclaje sea capaz de resistir las fuerzas horizontales y verticales involucradas. Las fuerzas de restablecimiento son principalmente generadas por la elasticidad de la línea de amarre.	Baja
<b><i>Amarre de un solo punto</i></b>		



<i>Amarre de torreta</i>	Un sistema de amarre de torreta catenario, interno o externo, conectado a una estructura flotante permite el desplazamiento alrededor de la torreta.	Baja
<i>Sistema de amarre catenario con anclaje de pierna (CALM)</i>	La estructura flotante es amarrada a un sistema de amarre catenario con boya y es capaz desplazarse alrededor del flotador de amarre.	Alta
<i>Amarre único de anclaje de pierna (SALM)</i>	La estructura flotante es amarrada a un sistema de amarre único con torreta de anclaje y es capaz desplazarse alrededor del flotador de amarre.	Alta
<i>Columna de cargas articuladas (ALC)</i>	La estructura flotante es amarrada es capaz de desplazarse alrededor de una columna de anclaje al lecho marino, el cuál tiene un sistema de giro por encima del nivel del agua.	Media
<i>Sistema de amarre de un solo punto y reservorio (SPAR)</i>	Un sistema de anclaje catenario SPAR permite el almacenamiento de medios (aceite, hidrógeno, etc.) y el giro de la estructura flotante alrededor del punto de amarre.	Media
<i>Sistema de amarre de torre de anclaje</i>	Una torre anclada al lecho marino permite el giro de la estructura flotante alrededor del punto de amarre.	Media
<b><i>Posicionamiento Dinámico</i></b>		
<i>Sistema de amarre activo</i>	Esta técnica consiste en líneas de amarre que son dispersadas alrededor de la estructura flotante, donde los extremos de cada una de las líneas de amarre, están sujetas a un cabestrante controlado por servomotores.	Baja
<i>Propulsión</i>	Esta técnica consiste en el posicionamiento de la estructura flotante sobre un punto de anclaje al lecho marino, por medio del uso de propulsores o hélices que son controlados desde un centro de comando.	Baja



# **CAPÍTULO III:**

# **DISEÑO MECÁNICO**

En este capítulo se muestra cada una de las etapas efectuadas para el desarrollo del diseño conceptual del dispositivo WEC, así como el desarrollo del modelo dinámico del mismo. El diseño mecánico del presente trabajo, abarca los siguientes temas: diseño conceptual, diseño a detalle y modelo dinámico del sistema.

Puesto que se necesita establecer el correcto funcionamiento del dispositivo, se realizó un análisis de las tecnologías existentes a nivel internacional, en materia de energía undimotriz, con el fin de conocer los diferentes tipos de configuraciones, principios de trabajo, sistemas de anclaje o amarre, consideraciones ambientales, entre otras. Este análisis permitió la definición asertiva de las necesidades más importantes para el correcto desarrollo de la metodología de diseño del convertidor de energía undimotriz.

### 3.1 Diseño conceptual

Para cubrir todas las necesidades existentes del diseño del sistema WEC se empleó la metodología de diseño desarrollada por Nigel Cross [27]. Por lo que esta sección será dividida en cada una de las etapas que conforman a este método.

Es importante destacar que esta sección contempla exclusivamente el desarrollo del diseño preliminar o conceptual del convertidor.

#### 3.1.1 Clarificación de Objetivos

El punto de partida para un buen diseño empieza por proponer algunos métodos o recursos para conseguir el resultado deseado. Por lo tanto, un paso importante dentro del diseño es el establecimiento de los objetivos de diseño.

Es importante tener en una idea clara de los objetivos en todas y cada una de las etapas de diseño; sin importar que éstos puedan ir modificándose durante el proceso general del diseño. La finalidad es ir clarificando los objetivos conforme se va adquiriendo un mejor entendimiento del problema a solucionar.

El método utilizado para el establecimiento y clarificación de los objetivos es denominado *árbol de objetivos*. Este método permite decretar los objetivos y métodos para conseguirlos; establecer la forma en que éstos se relacionan; así como jerarquizar los objetivos dependiendo de su nivel de importancia.

A continuación, se muestra el procedimiento completo que se llevó cabo, que contempla el listado de los objetivos de diseño, jerarquización y diagrama de árbol de objetivos.

1. Identificación de objetivos.

- Que la máquina/mecanismo aproveche la energía undimotriz para su conversión en electricidad.
- Que la máquina/mecanismo sea de instalación sencilla.
- Que la máquina/mecanismo contemple un mantenimiento sencillo.
- Que la máquina/mecanismo sea segura.
- Que la máquina/mecanismo garantice su durabilidad.

2. Jerarquización de objetivos.

- Que la máquina/mecanismo aproveche la energía undimotriz para su conversión en electricidad.
- Que la máquina/mecanismo sea seguro.
- Que la máquina/mecanismo sea resistente a tensiones mecánicas provocadas por las olas.
- Que la máquina/mecanismo garantice su funcionamiento.
- Que la máquina/mecanismo sea de instalación sencilla.
- Que la máquina/mecanismo contemple un mantenimiento sencillo.
- Que la máquina/mecanismo tenga buena durabilidad.
- Estandarización de componentes.

3. Árbol de objetivos, Fig. 18.

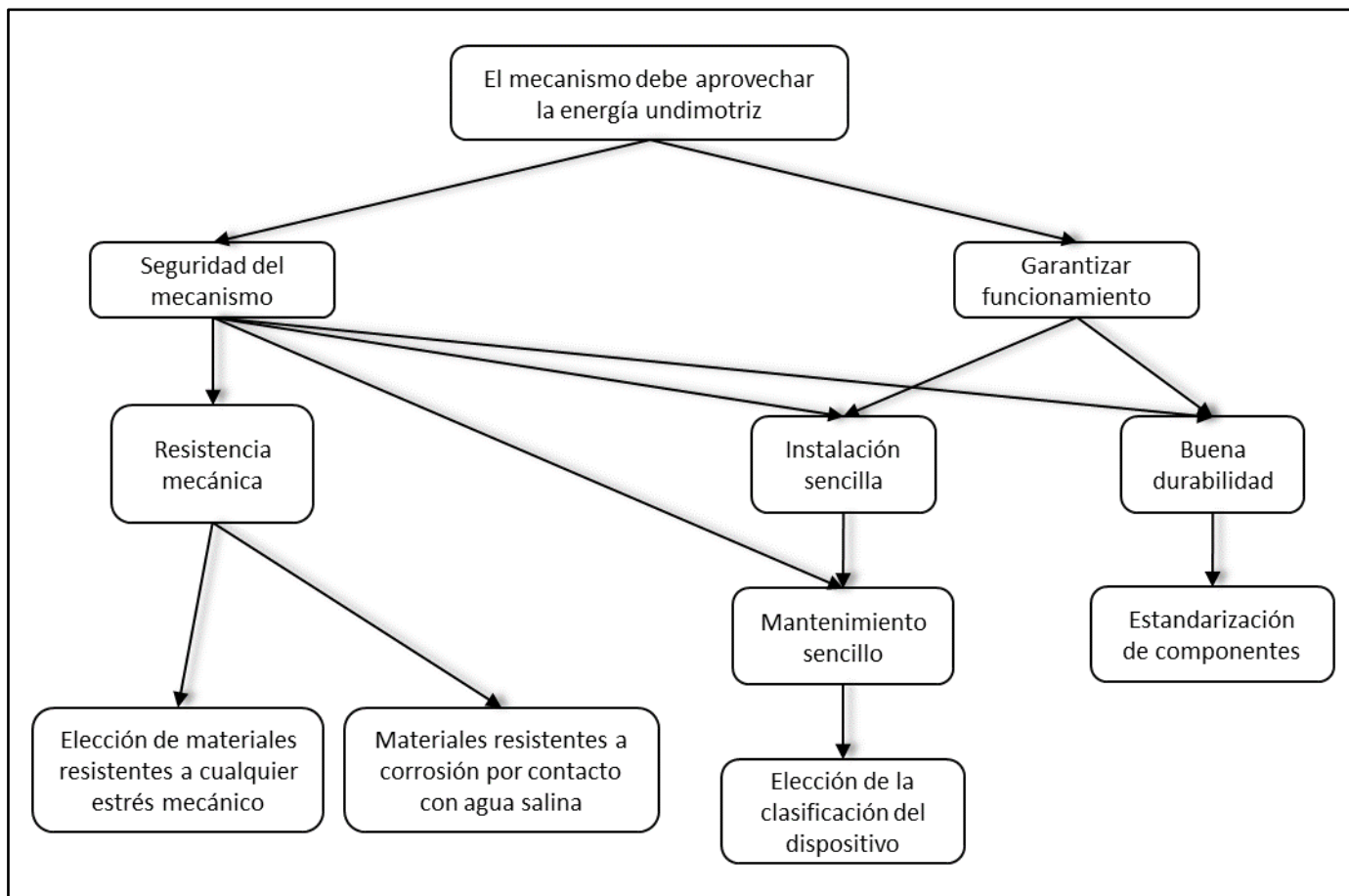


Fig. 18 Diagrama de árbol de objetivos.

### 3.1.2 Establecimiento de funciones

El análisis funcional es un método que permite encontrar las funciones esenciales de la máquina o sistema a diseñar. Las funciones esenciales, básicamente, son las tareas principales que la máquina o sistema tiene que satisfacer sin importar los componentes mecánicos que lo involucren.

El primer paso para el desarrollo del análisis funcional consistió en establecer el funcionamiento general del diseño en términos de entradas y salidas con el sistema de caja negra, como se muestra en la Fig. 19.



Fig. 19 Esquema de caja negra.

Los siguientes pasos consistieron en el desglosamiento del sistema de caja negra en subfunciones importantes y su relación entre las mismas; así como la delimitación del sistema como se muestra en la Fig. 20.

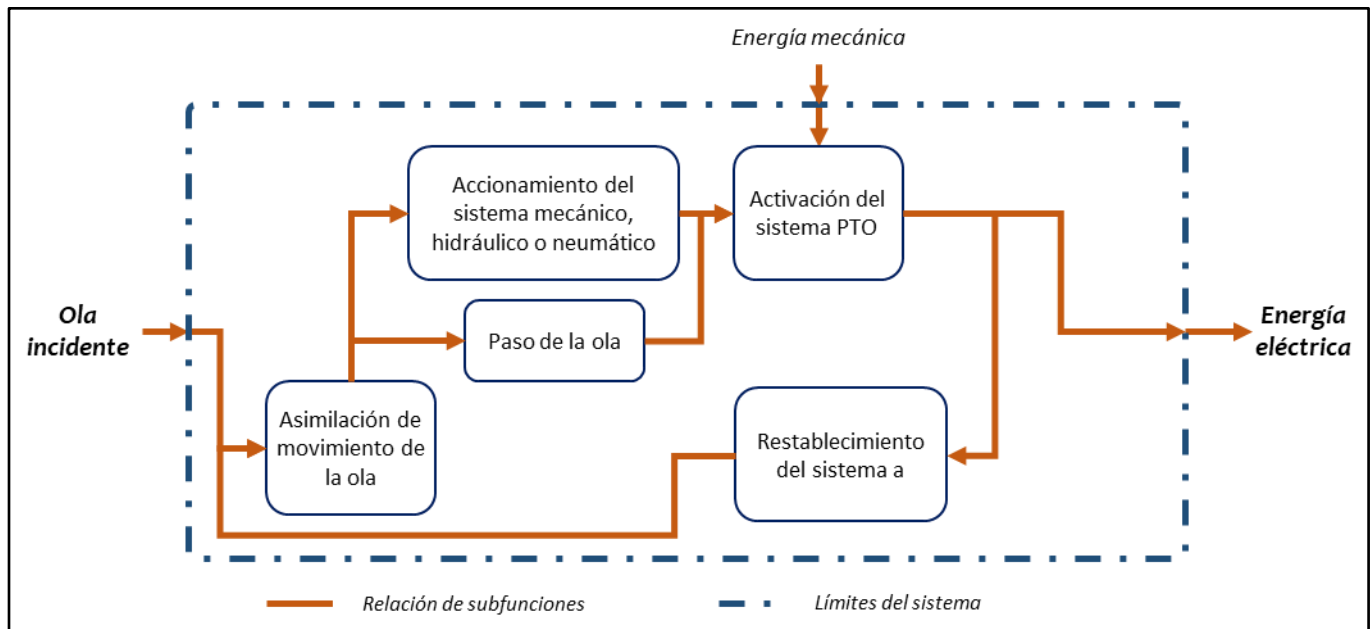


Fig. 20 Análisis funcional del dispositivo WEC - "Caja transparente".

### 3.1.3 Fijación de requerimientos

El establecimiento de los objetivos y funciones ayuda a esclarecer lo que el diseño debe hacer o lograr. Sin embargo, estos puntos no son establecidos con base en términos de precisión a comparación de un documento de especificaciones de funcionamiento.

Para determinar las características necesarias que van a dar solución al problema planteado, se llevó a cabo el método de especificaciones de funcionamiento. Este método permitió definir los diferentes niveles de generalidad en los que se dividieron los requerimientos, y posteriormente, se establecieron los atributos requeridos de desempeño del dispositivo tomando en cuenta que no debían ser soluciones particulares, sino especificaciones establecidas en términos cuantitativos y con identificación de rango de límites.

En la Fig. 21 se muestra la hoja de especificaciones realizada con el fin de ir acotando las posibles soluciones de diseño.

<b>E S P E C I F I C A C I O N E S</b>			
Convertidor de Energía Undimotriz			
Cambios	E/D	Requerimientos	Encargado
		<b>C A R A C T E R Í S T I C A S D E F U N C I O N A M I E N T O</b>	
	D	Dispositivo undimotriz flotante.	
	E	Capacidad de producción energética incluso con ángulo de incidencia entre las olas y el convertidor	
	D	Dispositivo compatible con sistemas de granjas undimotrices.	
	E	Diseño amigable con el medio ambiente.	
	E	Funcionamiento de dispositivo con frecuencias bajas ~ 1 Hz.	
	D	Sistema de conexión eléctrica anclada al lecho marino.	
	D	Sistema compatible con sistema de granja undimotriz.	
		<b>M A T E R I A L</b>	
	E	Resistencia a la corrosión por contacto con agua salina .	
	E	Resistencia mecánica por impacto y fatiga.	
	E	Baja densidad del material para la labor de flotación y rotación.	
	D	Resistencia a cambios bruscos de temperatura.	
		Materiales a considerar para el flotador:	
		Polipropileno	
		Polietertercetona	
		Delrin	
	E	Material a considerar para la estructura:	
		AISI 316	
		<b>I N S T A L A C I Ó N Y M A N T E N I M I E N T O</b>	
	D	El dispositivo debe contemplar una instalación por personal no especializado.	
	E	Los componentes deben ser reemplazables .	
	D	Mantenimiento sencillo y libre de conocimiento de especialización.	
	E	El dispositivo deberá contar con un sistema de fijación que no permita grandes oscilaciones de la estructura general del dispositivo WEC.	
		<b>P R O D U C C I Ó N E N E R G É T I C A</b>	
	E	El dispositivo deberá aprovechar el potencial undimotriz de la zona específica en donde sea instalado.	
		Rango de producción de potencial eléctrico:	
	E	5-10 kW	
	D	10-15 kW	
	D	15-20 kW	
<b>NOTA</b>		E – Exigencia D – Deseable	

Fig. 21 Método de especificaciones de funcionamiento – Hoja de especificaciones o requerimientos.

### 3.1.4 Determinación de características

Los requerimientos del cliente representan una parte importante dentro del diseño. Por lo tanto, es conveniente traducir esos atributos en características de ingeniería para darle solución a las necesidades del cliente.

Para la determinación de características de ingeniería, se empleó el método de Despliegue de la Función de Calidad (QFD, en inglés *Quality Function Deployment*) con el objetivo de convertir los requerimientos del cliente en determinación de características de ingeniería.

El procedimiento desarrollado para la creación de la matriz QFD es como se muestra continuación:

1. Identificación de atributos que el cliente desea en el producto. Requerimientos del cliente.
2. Determinación de la importancia relativa de cada uno de los atributos deseados por el cliente.
3. Dibujo de la matriz de los atributos del producto contra las características de ingeniería.
4. Identificación y valoración de las relaciones entre los atributos del producto y características de ingeniería.
5. Identificación de las relaciones o interacciones existentes entre las características de ingeniería.

La matriz QFD terminada es la que se muestra en la Fig. 22

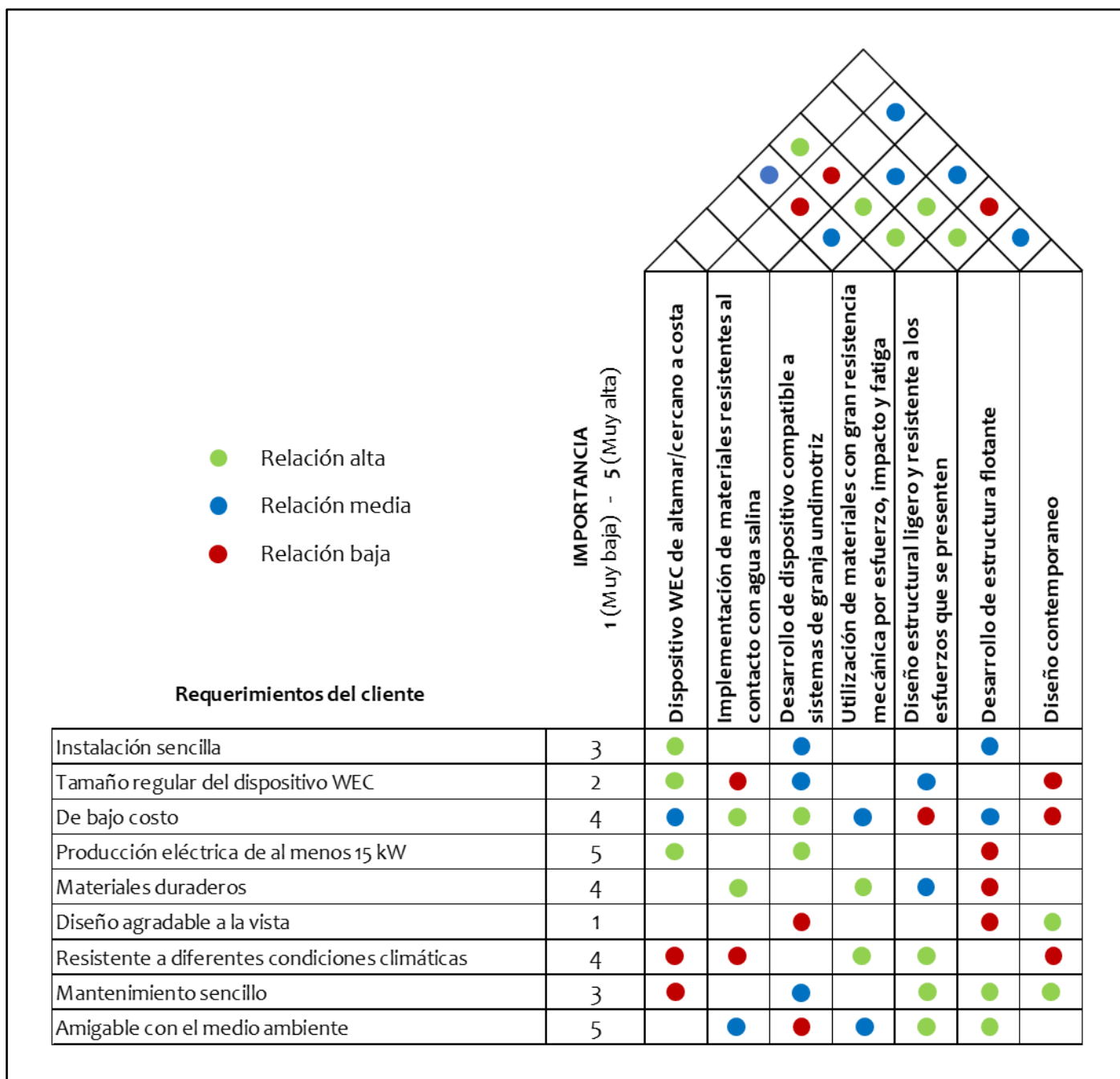


Fig. 22 Matriz de relación entre los requerimientos del cliente y características de ingeniería. Despliegue de la Función de Calidad (QFD).

### 3.1.5 Generación de alternativas

El aspecto central dentro del diseño es la generación de soluciones, por lo que realizar variaciones en diferentes aspectos resulta de gran beneficio a la hora de diseñar.

Para esta sección se utilizó el método de la tabla morfológica, cuyo propósito es el de generar un rango completo de alternativas que puedan ser una solución en el diseño del producto.



A continuación, se muestra el procedimiento completo que se llevó cabo para esta sección.

1. Lista de características y/o funciones esenciales.
  - Asimilación de energía undimotriz
  - Transmisión de energía mecánica al generador.
  - Potencia nominal de 10-15kW.
  - Resistencia mecánica por impacto, fatiga y desgaste.
2. Establecimiento de los posibles métodos para lograr las funciones esenciales.
  - Asimilación de energía undimotriz por localización.
    - a. Onshore.
    - b. Nearshore
    - c. Offshore.
  - Asimilación de energía undimotriz por principio de trabajo.
    - a. Diferencia de alturas con aerogenerador (OWC flotante).
    - b. Estructura parcialmente sumergida anclada y flotadores de rotación superficiales.
    - c. Dispositivo flotante de desborde.
    - d. Estructura superficial anclada con flotadores con movimiento rotacional.
    - e. Diferencia de presiones con flotador superficial
  - Transmisión de energía mecánica al generador.
    - a. Mecánica.
    - b. Hidráulica.
    - c. Neumática.
  - Potencia nominal de 10-15kW.
    - a. Sistema robusto del dispositivo WEC.

b. Sistema de granja undimotriz

- Resistencia mecánica por impacto, fatiga y desgaste.
  - a. Materiales con buena resistencia mecánica y corrosión por contacto con agua salina.
  - b. Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento especial para el contacto con agua salina.
  - c. Estructura de acero reforzada con flotadores retraibles.

3. Dibujo de la tabla morfológica con todas las posibles soluciones Fig. 23.

Características/funciones esenciales		Posibles soluciones o subfunciones				
		A	B	C	D	E
1	Método de asimilación de energía undimotriz	 Diferencia de alturas con aerogenerador flotante	 Estructura parcialmente sumergida anclada y flotadores de rotación superficiales	 Dispositivo flotante de desborde	 Estructura superficial anclada con flotadores con movimiento rotacional	 Dispositivo de impacto
2	Sistema de transmisión de energía al generador	 Mecánico	 Hidráulico	 Neumático		
3	Sistema de toma de potencia (PTO)	 Turbina hidráulica	 Turbina neumática	 Cilindros hidráulicos	Acoplamiento directo a generador	
4	Clasificación del dispositivo WEC por su localización	 Onshore (En la costa)	 Nearshore (Cerca a la costa)	 Offshore (Altamar)		
5	Producción eléctrica de 10-15 kW	 Sistemas robustos de generación eléctrica	 Sistema de granja undimotriz			
6	Resistencia mecánica	Materiales con buena resistencia mecánica y corrosión por contacto con agua salina	Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento especial para el contacto con agua salina	Estructura de acero reforzada con flotadores retraibles		

Fig. 23 Representación gráfica de la tabla morfológica para la generación de alternativas.

4. Identificación de las combinaciones factibles de las posibles soluciones.

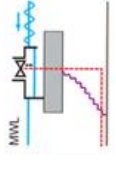

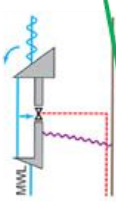

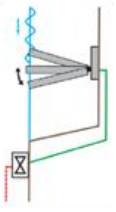

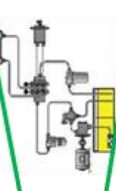
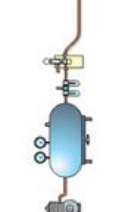
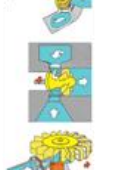



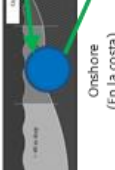

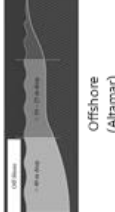

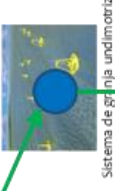
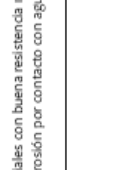
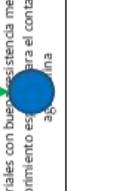
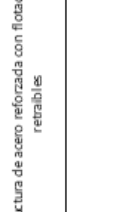
Características/funciones esenciales		Posibles soluciones o subfunciones				
		A	B	C	D	E
1	Método de asimilación de energía undimotriz	Diferencia de alturas con aerogenerador flotante 	Estructura parcialmente sumergida anclada y flotadores de rotación superficiales 	Dispositivo flotante de desborde 	Estructura superficial anclada con flotadores con movimiento rotacional 	Dispositivo de impacto 
2	Sistema de transmisión de energía al generador	Mecánico 	Hidráulico 	Neumático 		
3	Sistema de toma de potencia (PTO)					
4	Clasificación del dispositivo WEC por su localización	Turbina hidráulica 	Turbina neumática 	Offshore (Altamar) 		
5	Producción eléctrica de 10-15 kW	Onshore (En la costa) 	Nearshore (Cerca a la costa) 			
6	Resistencia mecánica	Sistemas robustos de generación eléctrica 	Sistema de grúa undimotriz 	Estructura de acero reforzada con flotadores retraíbles 		

Fig. 24 Esquema de selección de alternativa No. 1.



Fig. 25 Esquema de la primera propuesta de diseño.

El diseño de la primera combinación de posibles soluciones se basó en la patente registrada por los franceses Girard, como se mencionó en el capítulo anterior. El dispositivo consistía de un brazo articulado acoplado a bases empotradas en la costa, en un extremo, y en el otro extremo una boya instalada, como se muestra en la Fig. 25. La boya sería el elemento encargado de asimilar el movimiento oscilatorio de las olas que, conjuntamente con el brazo, traducirían ese movimiento ondulatorio en un par de torsión para activar el generador eléctrico y de esta forma, generar energía eléctrica.

Características/funciones esenciales		Posibles soluciones o subfunciones				
		A	B	C	D	E
1	Método de asimilación de energía undimotriz	 Diferencia de alturas con aerogenerador flotante	 Estructura parcialmente sumergida anclada y flotadores de rotación superficiales	 Dispositivo flotante de desborde	 Estructura superficial anclada con flotadores con movimiento rotacional	 Dispositivo de impacto
2	Sistema de transmisión de energía al generador	 Mecánico	 Hidráulico	 Neumático		
3	Sistema de toma de potencia (PTO)	 Turbina hidráulica	 Turbina neumática	 Cilindros hidráulicos		
4	Clasificación del dispositivo WEC por su localización	 Onshore (En la costa)	 Nearshore (Cerca a la costa)	 Offshore (Altamar)		
5	Producción eléctrica de 10-15 KW	 Sistemas robustos de generación eléctrica				
6	Resistencia mecánica	 Materiales con buena resistencia mecánica y corrosión por contacto con agua salina	 Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento especial para el contacto con agua salina	 Estructura de acero reforzada con flotadores retraíbles		

Fig. 26 Esquema de selección de alternativa No. 2.

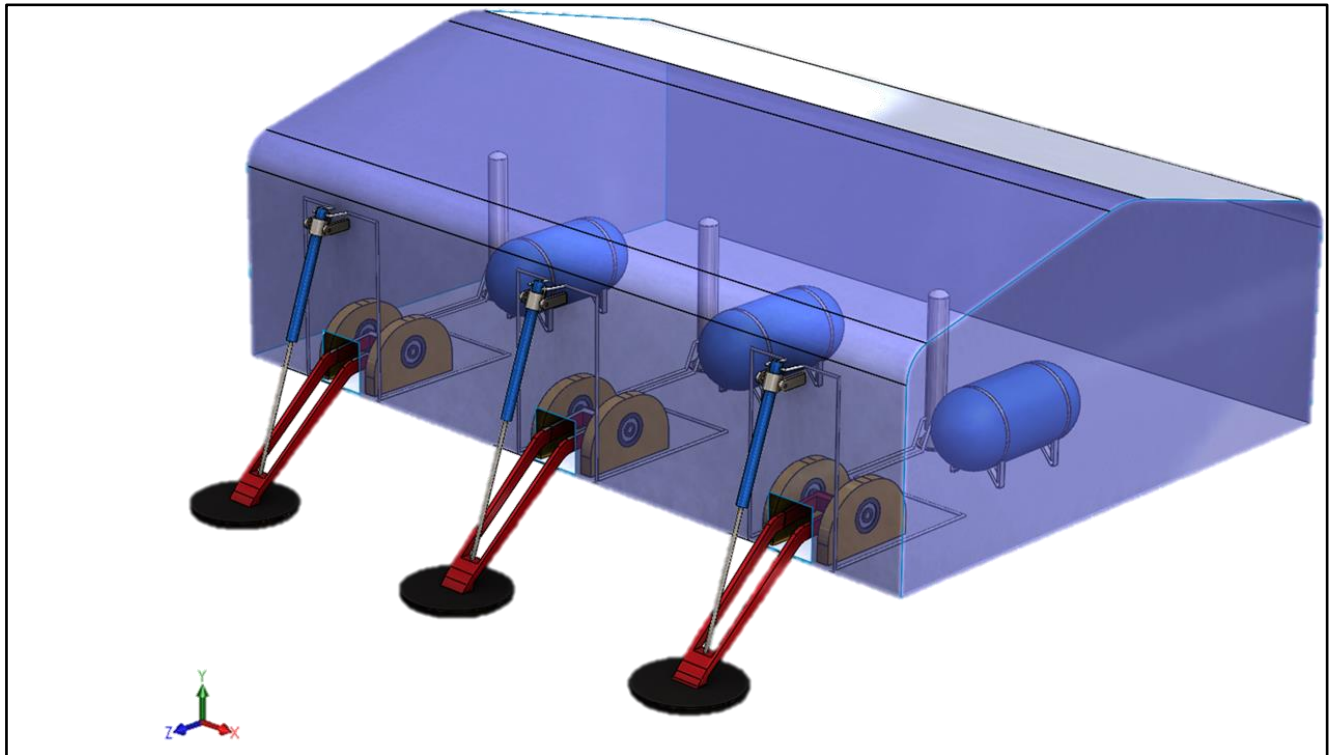
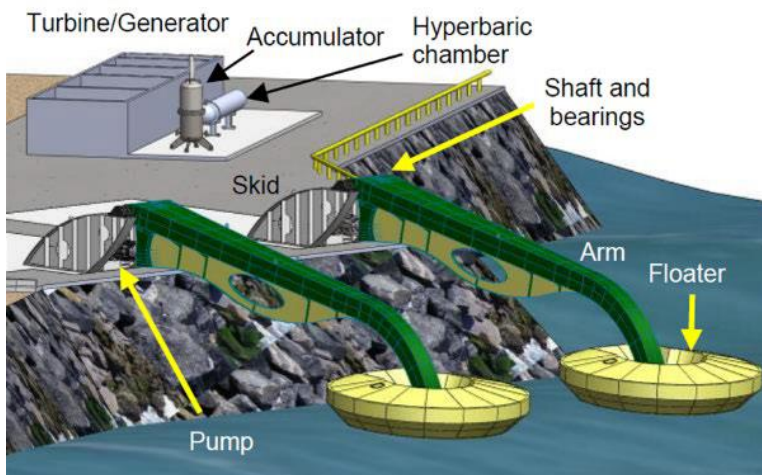


Fig. 27 Representación gráfica de la segunda propuesta de diseño.

Para la segunda propuesta de diseño se consideró el uso de un sistema hidráulico cerrado. El convertidor undimotriz consistía en módulos de bombeo donde cada uno de éstos tenía un cuerpo flotante unido a la bomba hidráulica a través de una barra de brazo. El movimiento vertical del cuerpo debido a la acción de la ola, inducía al actuador de la bomba a desplazar el agua, que era obtenida desde un circuito cerrado, a un acumulador hidráulico. Después, el flujo de agua del acumulador era expulsado en forma de chorro para que a su vez, este activara una turbina hidráulica acoplada a un generador eléctrico.



El diseño se basaba en el principio de funcionamiento del dispositivo undimotriz instalado en el puerto Pecem, Brasil [28], Fig. 28.

Fig. 28 Esquema del ensamblaje de componentes de la planta piloto en Pecem Port, Brasil.



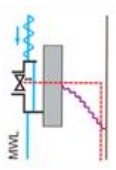
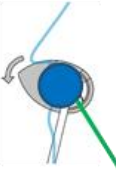
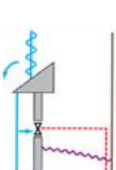
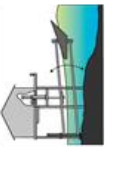
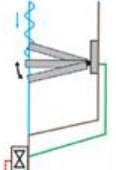

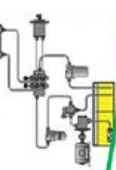




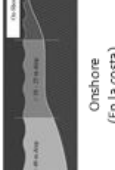
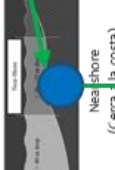
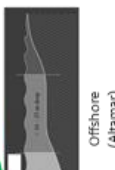
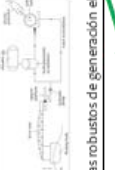

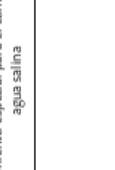

Características/funciones esenciales		Posibles soluciones o subfunciones				
		A	B	C	D	E
1	Método de asimilación de energía undimotriz	 Diferencia de alturas con aerogenerador flotante	 Estructura parcialmente sumergida anclada y flotadores de rotación superficiales	 Dispositivo flotante de desborde	 Estructura superficial anclada con flotadores con movimiento rotacional	 Dispositivo de impacto
2	Sistema de transmisión de energía al generador	 Mecánico	 Hidráulico	 Neumático		
3	Sistema de toma de potencia (PTO)	 Turbina hidráulica	 Turbina neumática	 Cilindros hidráulicos		
4	Clasificación del dispositivo WEC por su localización	 Onshore (En la costa)	 Nearshore (Cerca a la costa)	 Offshore (Altamar)		
5	Producción eléctrica de 10-15 KW	 Sistemas robustos de generación eléctrica				
6	Resistencia mecánica	 Materiales con buena resistencia mecánica y corrosión por contacto con agua salina	 Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento espacial para el contacto con agua salina	 Estructura de acero reforzada con flotadores retraíbles		

Fig. 29 Esquema de selección de alternativa No. 3.

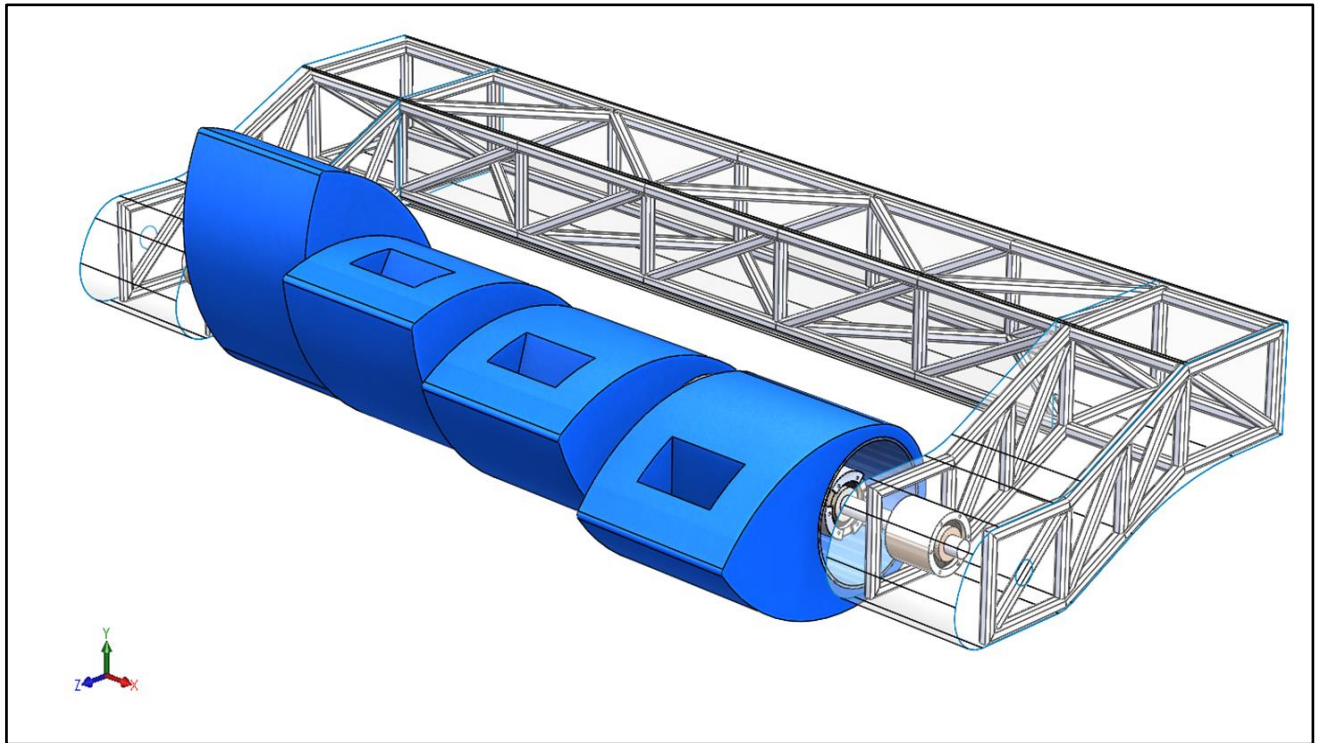


Fig. 30 Representación gráfica de la tercera propuesta de diseño.

El diseño de esta última propuesta se basa en el modelo desarrollado por el Profesor Stephen Salter, el Pato de Salter [13]; y también en el modelo desarrollado por la compañía danesa WEPTOS.

Los flotadores del dispositivo adoptan la figura en forma de pato, como el modelo tradicional del Prof. Salter, de modo que se consiga un contacto suave entre la ola incidente y la superficie del flotador.

A diferencia del Pato de Salter, que cuenta con un sistema hidráulico cerrado dentro del flotador, el dispositivo WEC propuesto traduce el movimiento oscilatorio de las olas en un par de torsión que activa un eje sobre el cual van montados los flotadores. El eje será el encargado de transmitir el torque generado por los flotadores hacia el generador eléctrico.

Este principio también es utilizado por la compañía WEPTOS.



### 3.1.6 Evaluación de alternativas

Para asegurar que se eligió la combinación o alternativa de diseño correcta, se realiza una evaluación de la misma con base en el listado de objetivos del dispositivo WEC.

El procedimiento utilizado para esta sección es el método de objetivos ponderados. Este método permite evaluar cada una de las alternativas de diseño generadas en la sección anterior, por medio de la determinación de valores para cada una de las características o funciones inherentes de los dispositivos WEC y asignando un factor de peso al objetivo a lograr.

El principio de evaluación se basó en la relación de los valores de peso asignados a los objetivos y la calificación de evaluación de la sub-solución planteada. A continuación, se muestra el procedimiento que se realizó para la evaluación de la alternativa seleccionada.

1. Identificación de objetivos.
2. Jerarquización de objetivos.
3. Desarrollo de dibujo de tabla del método de objetivos ponderados.
4. Establecimiento de principios de evaluación.
5. Asignación de valor porcentual de cada una de las características a cumplir en relación a los objetivos planteados.
6. Asignación de valor de la sub-solución en función al principio de evaluación.
7. Relación de valores para asignación de calificación total y elección de la mejor opción (Multiplicación de valores).

Es importante mencionar que los objetivos utilizados para el desarrollo de esta etapa son los mismos establecidos en la clarificación de objetivos.





	Características/funciones esenciales	Encargado función	Principio de evaluación	factor de peso	Propuesta 1
A	Método de asimilación de energía undimotriz	Principio de trabajo Estructura física del convertidor	Potencial undimotriz aprovechable por el dispositivo	0.08	 7
B	Sistema de transmisión de energía al generador	Elementos mecánicos, hidráulicos y/o neumáticos	Capacidad de transición mecánica a generador eléctrico	0.08	 8
C	Sistema de toma de potencia (PTO)	Actuadores	Eficiencia del sistema	0.15	Acoplamiento directo a generador
D	Localización de dispositivo WEC	N/A	Potencial undimotriz disponible por área	0.08	 5
E	Producción eléctrica de 10-15 kW	Sistema PTO Localización del dispositivo Cantidad de dispositivos instalados	Cantidad de potencial eléctrico generado Eficiencia del dispositivo WEC	0.2	 9
E	Resistencia mecánica	Estudio de cargas involucradas en el proceso de conversión	Resistencia a corrosión, fatiga y fallas mecánicas	0.16	Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento especial para el contacto con agua salina
F	Evaluación de seguridad del sistema			0.15	8
G	Costo de manufactura total			0.1	9
H			Puntuación total	1	7.99

Fig. 31 Evaluación de la alternativa de diseño No. 1.




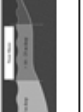

	Características/funciones esenciales	Encargado función	Principio de evaluación	factor de peso	Propuesta 2
A	Método de asimilación de energía undimotriz	Principio de trabajo Estructura física del convertidor	Potencial undimotriz aprovechable por el dispositivo	0.08	
B	Sistema de transmisión de energía al generador	Elementos mecánicos, hidráulicos y/o neumáticos	Capacidad de transmisión mecánica a generador eléctrico	0.08	
C	Sistema de toma de potencia (PTO)	Actuadores	Eficiencia del sistema	0.15	
D	Localización de dispositivo WEC	N/A	Potencial undimotriz disponible por área	0.08	
E	Producción eléctrica de 10-15 kW	Sistema PTO Localización del dispositivo Cantidad de dispositivos instalados	Cantidad de potencial eléctrico generado Eficiencia del dispositivo WEC	0.2	
E	Resistencia mecánica	Estudio de cargas involucradas en el proceso de conversión	Resistencia a corrosión, fatiga y fallas mecánicas	0.16	Materiales con buena resistencia mecánica y recubrimiento especial para el contacto con agua salina
F	Evaluación de seguridad del sistema			0.15	9
G	Costo de manufactura total			0.1	6
H	Puntuación total			1	8.03

Fig. 32 Evaluación de la alternativa de diseño No. 2.





	Características/funciones esenciales	Encargado función	Principio de evaluación	factor de peso	Propuesta 1
A	Método de asimilación de energía undimotriz	Principio de trabajo Estructura física del convertidor	Potencial undimotriz aprovechable por el dispositivo	0.08	
B	Sistema de transmisión de energía al generador	Elementos mecánicos, hidráulicos y/o neumáticos	Capacidad de transmisión mecánica a generador eléctrico	0.08	
C	Sistema de toma de potencia (PTO)	Actuadores	Eficiencia del sistema	0.15	Acoplamiento directo a generador
D	Localización de dispositivo WEC	N/A	Potencial undimotriz disponible por área	0.08	
E	Producción eléctrica de 10-15 kW	Sistema PTO Localización del dispositivo Cantidad de dispositivos instalados	Cantidad de potencial eléctrico generado Eficiencia del dispositivo WEC	0.2	
E	Resistencia mecánica	Estudio de cargas involucradas en el proceso de conversión	Resistencia a corrosión, fatiga y fallas mecánicas	0.16	Materiales con buena resistencia mecánica y corrosión por contacto con agua salina
F	Evaluación de seguridad del sistema			0.15	9
G	Costo de manufactura total			0.1	8
H	Puntuación total			1	8.6

Fig. 33 Evaluación de la alternativa de diseño No. 3.

La alternativa de diseño seleccionada, de acuerdo al valor total de evaluación, es la presentada en la Fig. 33, con una calificación total de 8.6.

Es importante notar la relación entre las evaluaciones de cada una de las propuestas con la finalidad de observar los puntos fuertes y débiles de cada diseño. De esta forma, se puede mejorar el diseño general del dispositivo WEC al adoptar las características positivas o fuertes de los otros diseños.

Como ejemplo, la segunda propuesta de diseño tiene la mejor calificación en las sub-soluciones de sistema de transmisión de energía y la característica del sistema de toma de potencia. Esto se debe a que los sistemas hidráulicos tienen una mayor eficiencia general de trabajo a comparación de los sistemas de acoplamiento directo. Por lo que el diseño seleccionado puede adoptar un sistema de transmisión hidráulica para mejorar su funcionamiento en un futuro.

### 3.2 Diseño Estructural

En esta sección se mostrará el diseño y selección de cada uno de los componentes que conforman el ensamblaje general del convertidor undimotriz. Para este propósito, se realizó una serie de cambios a lo largo del proceso de diseño a detalle del dispositivo WEC, los cuales serán presentados a continuación.

Para asegurar que el diseño general, propuesto con anterioridad, cumpliera con su objetivo de buena resistencia mecánica frente a diversas situaciones climáticas, se desarrolló una base de armadura estructural tipo Pratt - Warren de acero inoxidable para resistir las cargas ejercidas por las olas del mar.

Para asegurar que la flecha cumpliera con su objetivo de manera satisfactoria, se realizó el estudio de fatiga de ésta con condiciones iniciales de fuerza de una ola basadas en un estudio realizado por L. Sjökvist [29]. Para este estudio se propuso una fuerza máxima  $F_{w_{máx}} = 12 \text{ kN}$  y una fuerza mínima  $F_{w_{mín}} = 0.6 \cdot F_{w_{máx}}$ .

Observaciones y acciones realizadas:

- Los resultados del estudio arrojaron un número de ciclos de trabajo de la flecha muy poco confiable, por lo que, parámetros como la longitud y el diámetro fueron modificados con respecto a los valores propuestos inicialmente.
- La longitud resultó ser un problema en conjunto con el peso del flotador. El peso de los flotadores distribuido a lo largo de la flecha suponía un gran

esfuerzo sobre ésta. Por lo que se redujo el tamaño de los flotadores y, por lo tanto, sus componentes de ensamble.

- Debido a que el ensamble general del flotador y la flecha tenían que ser sometidos a rediseño, se eligió un rodamiento antirretroceso compatible con las nuevas medidas adoptadas por la flecha y el eje.
- Como consecuencia del rediseño de los componentes anteriormente mencionados, el soporte de anclaje de los rodamientos y otros elementos, también fueron modificados para propósitos generales debido a la disminución en las medidas del convertidor.

Teniendo en cuenta que la mayor parte de los componentes serían modificados, se propuso mejorar el diseño general del dispositivo. De modo que se lograra mejorar la distribución de los componentes que lo conforman; mejorar la interacción de las olas con la superficie del convertidor; y establecer un diseño compatible con un sistema de granjas undimotrices.

Gracias a la disminución en las medidas de los componentes modificados, se propuso cambiar la figura de la base estructural con dos propósitos. El primero, lograr que las fuerzas undimotrices se concentren principalmente en el sistema PTO del dispositivo WEC y que la interacción entre las olas y la base del convertidor, no afectase de manera significativa el funcionamiento general del sistema; y segundo, que la base estructural sea capaz de soportar satisfactoriamente las cargas propuestas en el estudio de fatiga anteriormente mencionado.

A continuación, se muestra el proceso de diseño de los componentes, los materiales de construcción; la descripción y medidas de cada uno de los componentes; y la memoria de cálculo realizada para la flecha o eje de transmisión.

### 3.2.1 Diseño de componentes

Para establecer qué componentes deberían estar involucrados en el funcionamiento del convertidor de energía undimotriz, se realizó una serie de procesos, señalados en el apartado anterior del presente capítulo, que condujeron a realizar un diseño conceptual del convertidor undimotriz.

Dentro del diseño conceptual se realizaron bosquejos del dispositivo que ayudaran a determinar qué componentes estarían involucrados en el proceso de trabajo del convertidor y su probable ubicación exacta. La Fig. 34, muestra el primer diseño conceptual desarrollado.

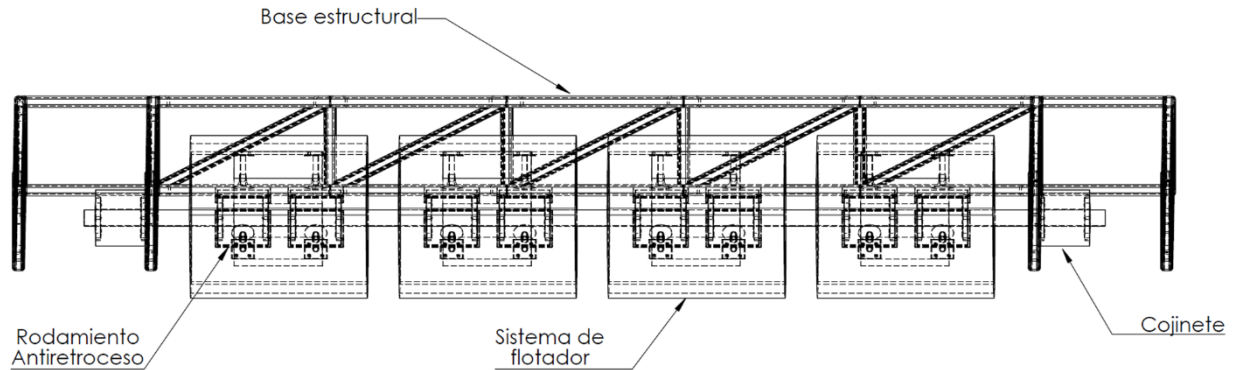


Fig. 34 Esquema del primer diseño conceptual desarrollado.

De esta forma, se establecieron los componentes principales del sistema y las posiciones que adoptarían con respecto al eje.

Dentro del diseño a detalle, se propuso la utilización de componentes estandarizados o comerciales puesto que el impacto económico es un bloque muy importante dentro del diseño. Con base en esto, se propuso un eje de transmisión similar al que fue desarrollado por la compañía WEPTOS, como se había mencionado con anterioridad; a partir de esta etapa, los componentes como rodamientos y cojinetes fueron seleccionados con base en las necesidades antes establecidas por los demás componentes.

El flotador fue diseñado con base en las figuras adaptadas en los dispositivos desarrollados por el profesor Salter y WEPTOS. Las medidas implementadas en el diseño del flotador son completamente arbitrarias de acuerdo a la figura que se quería lograr.

Es importante destacar que el ángulo de impacto entre el flotador y la cresta de la ola del mar es importante dentro del análisis mecánico, por lo tanto, la figura del flotador es un factor importante a considerar. Sin embargo, para los fines del presente trabajo, no se realizará un estudio para determinar el mejor ángulo de impacto o la relación de contacto entre la cara del flotador y la ola.

Para comprobar que el dispositivo no fallara prematuramente debido a la variable interacción con las olas y los altos ciclos de trabajo, se realizaron los estudios de análisis estático correspondientes de la flecha puesto que es el elemento con mayor interacción de energía y que es uno de los

elementos principales de transmisión. Los cálculos desarrollados se encuentran de manera representativa en el apartado de memoria de cálculos.

Debido a que las medidas del eje fueron propuestas con base en otros dispositivos, los resultados correspondientes a fatiga arrojaron datos poco confiables; por lo que se realizó un rediseño del mismo dispositivo en donde se propusieron nuevas medidas generales de los componentes del dispositivo.

La evolución del diseño del dispositivo debido a cuestiones de rediseño por cálculos, se encuentra en la Fig. 35.

Algunos de los elementos diseñados como las bases o soportes, fueron diseñados de acuerdo a las necesidades en función de las medidas de los componentes principales. Por supuesto, estos componentes fueron diseñados con el mismo material que la base estructural y el eje debido sus propiedades físicas y químicas en relación con el contacto con ambientes marinos.

La base de soporte del generador seleccionado, se diseñó de acuerdo a las medidas de la base de la carcasa del motor/generador. El generador y los demás componentes se encuentran en la sección 3.2.3 del presente trabajo.

Debido a que el generador debe mantener una velocidad promedio para la generación de energía eléctrica y que la velocidad angular entregada por el dispositivo es muy baja, se optó por la implementación de un sistema de transmisión mecánica por medio de poleas.

Para el sistema de transmisión por polea, así como con otros componentes, se seleccionaron las poleas correspondientes para la conexión de la flecha de transmisión con el generador eléctrico. El proceso de selección se puede observar en el apartado 3.2.4.



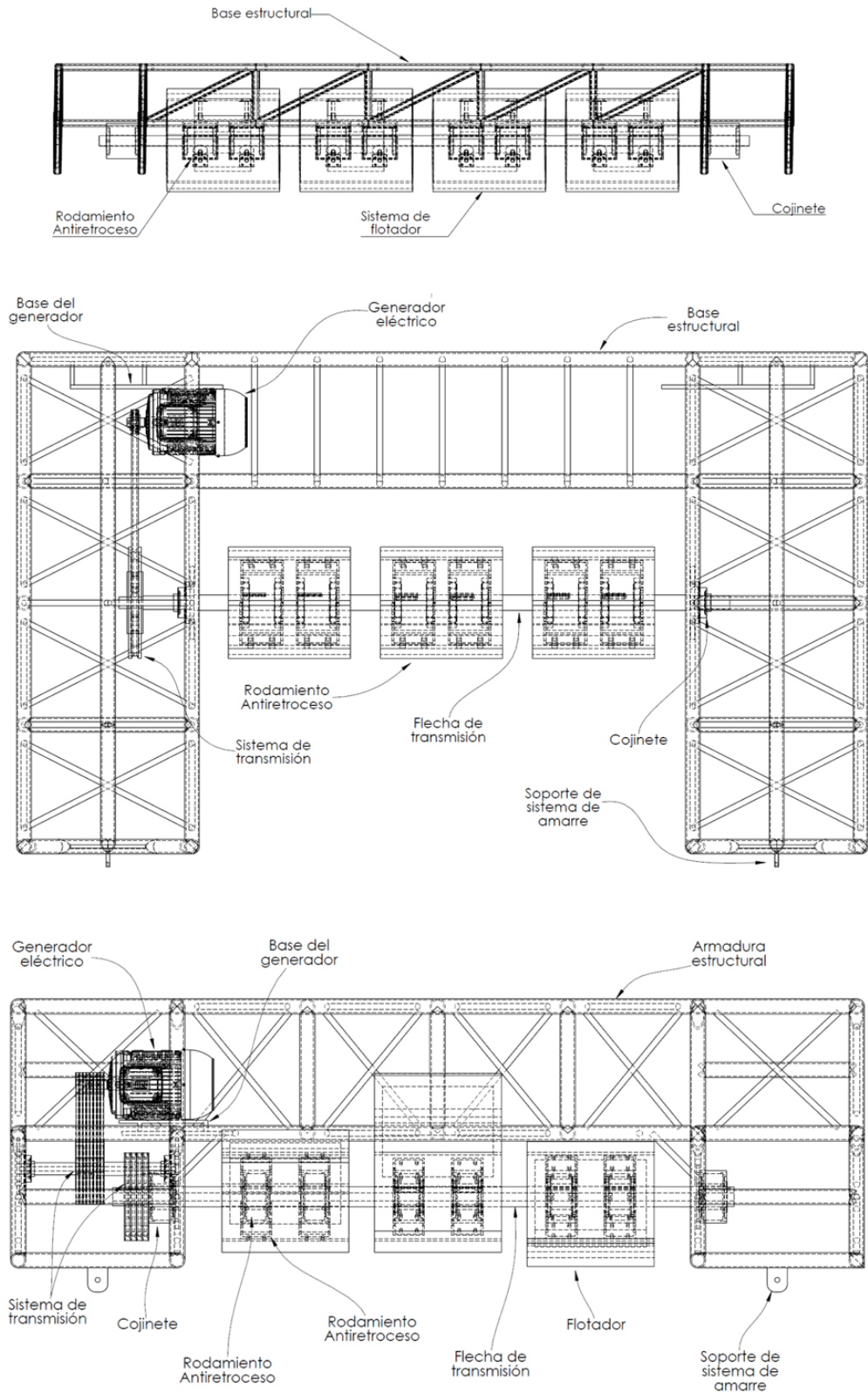


Fig. 35 Evolución del esquema de diseño del dispositivo WEC, en forma descendente.

### 3.2.2 Materiales

En esta sección se dará a conocer los materiales elegidos para el diseño de cada componente y una breve descripción de sus características.

#### *Plásticos*

Para el diseño del flotador y la cubierta superficial se propuso el uso de un plástico que no tuviera un impacto ecológico negativo sobre cualquier ambiente marino. Por lo que el Polioximetileno Delrin fue elegido, gracias a su gran capacidad de resistencia a corrosión y casi nula absorción de agua. En la Tabla 3 se muestra información más completa sobre este material.

**Tabla 3** Panorama descriptivo del plástico seleccionado para el diseño de componentes.

<b>Material:</b>	<b>Delrin – POM (Polioximetileno)</b>
<b>Descripción:</b>	Termoplástico con unas características muy superiores a todos los demás, por cuanto posee una extraordinaria resistencia al impacto y es capaz de recuperar su elasticidad. Conocido también por su casi nula absorción de agua, incluso en ambientes marinos, por sus buenas propiedades antifricción y su estabilidad dimensional, así como su resistencia a altas temperaturas. Denominado también Acetal, Acetron, Ensita, Ertacetal, Hydrel, Tecaform, Poliactal, entre otros.
<b>Aplicaciones industriales:</b>	Rodamientos, ruedas dentadas, casquillos, válvulas, cojinetes y engranajes para trabajos en contacto con agua o bajo condiciones de humedad muy variables, rodillos, palancas, entre otros.
<b>Propiedades:</b>	

Densidad	Temperatura máxima de utilización continua	Absorción por agua	Coefficiente de rozamiento	Resistencia a la tracción	Resistencia al impacto	Resistencia a la flexión
Gr/cm <sup>3</sup>	°C	100%HR	μ	Mpa	Kj/cm <sup>2</sup>	Mpa
1,42	105	0,6	0,5-0,35	45-55	6,5-7,5	70-90

### Aceros

Uno de los objetivos principales de una tecnología que produce energía a partir de energías renovables es, precisamente, no generar contaminación ambiental. Esto quiere decir que los materiales que se tienen que contemplar al momento de diseñar una de estas tecnologías tienen que tener propiedades mecánicas que eviten o disminuyan el desgaste y/o corrosión del mismo.

Con base en lo anteriormente descrito, se propuso la utilización del acero AISI 316L por su gran capacidad de resistencia a la corrosión por el contacto con ambientes marinos. Los componentes que están diseñados con este material son: base estructural, anillo de soporte, placa de soporte de rodamientos, soportes y flecha de transmisión.

En la Tabla 4 se muestra más información sobre este material

*Tabla 4 Panorama descriptivo del acero seleccionado para el diseño de componentes.*

<b>Material:</b>	<b>ACERO INOXIDABLE AUSTENÍTICO AL Cr-Ni-Mo ACX 240</b>	
<b>Designación</b>	1.4401	X2CrNiMo17-12-2
<b>EN:</b>	1.4404	
<b>Designación</b>	316	S31603
<b>ASTM:</b>	316L	
<b>Descripción:</b>	Los aceros inoxidable austeníticos del grupo Cr-Ni-Mo contienen Mo para incrementar la resistencia a la corrosión por picaduras. Los del tipo L (bajo contenido en C) tienen, además, menor susceptibilidad a la corrosión intergranular, porque se evita la precipitación de carburos de Cr en aplicaciones que impliquen su uso a temperaturas de sensibilización, como soldaduras.	
<b>Aplicaciones industriales:</b>	Industria química y petroquímica; industria alimentaria; farmacéutica y textil; adornos arquitectónicos; aplicaciones con soldadura; Cisternas de vehículos; aplicaciones marinas; tratamiento de agua, entre otras.	
<b>Propiedades físicas:</b>		

A 20°C presenta una densidad de 8 kg/dm<sup>3</sup> y un calor específico de 500 J/kg·K

	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
Módulo de elasticidad (GPa)	200	194	186	179	172	165
Coefficiente medio dilatación térmica entre 20°C ( $10^{-6} \times K^{-1}$ ) y	-	16	16,5	17	17,5	18
Conductividad térmica (W/m·K)	15	16	17,5	19	21	22,5
Resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot mm^2/m$ )	0,75	0,82	0,95	1,05	1,12	1,19

### 3.2.3 Componentes de ensamblaje

#### *Flotador*

Como ya se había mencionado anteriormente, la forma que adoptó el flotador del convertidor de energía undimotriz está basado en el Pato de Salter. El propósito del flotador es asimilar la energía liberada por las olas frontales incidentes, para convertir el movimiento oscilatorio de la ola en un movimiento rotacional que, posteriormente, será traducido en un par de torsión ejercido sobre un eje.

El esquema general del flotador diseñado se muestra en la Fig. 36.

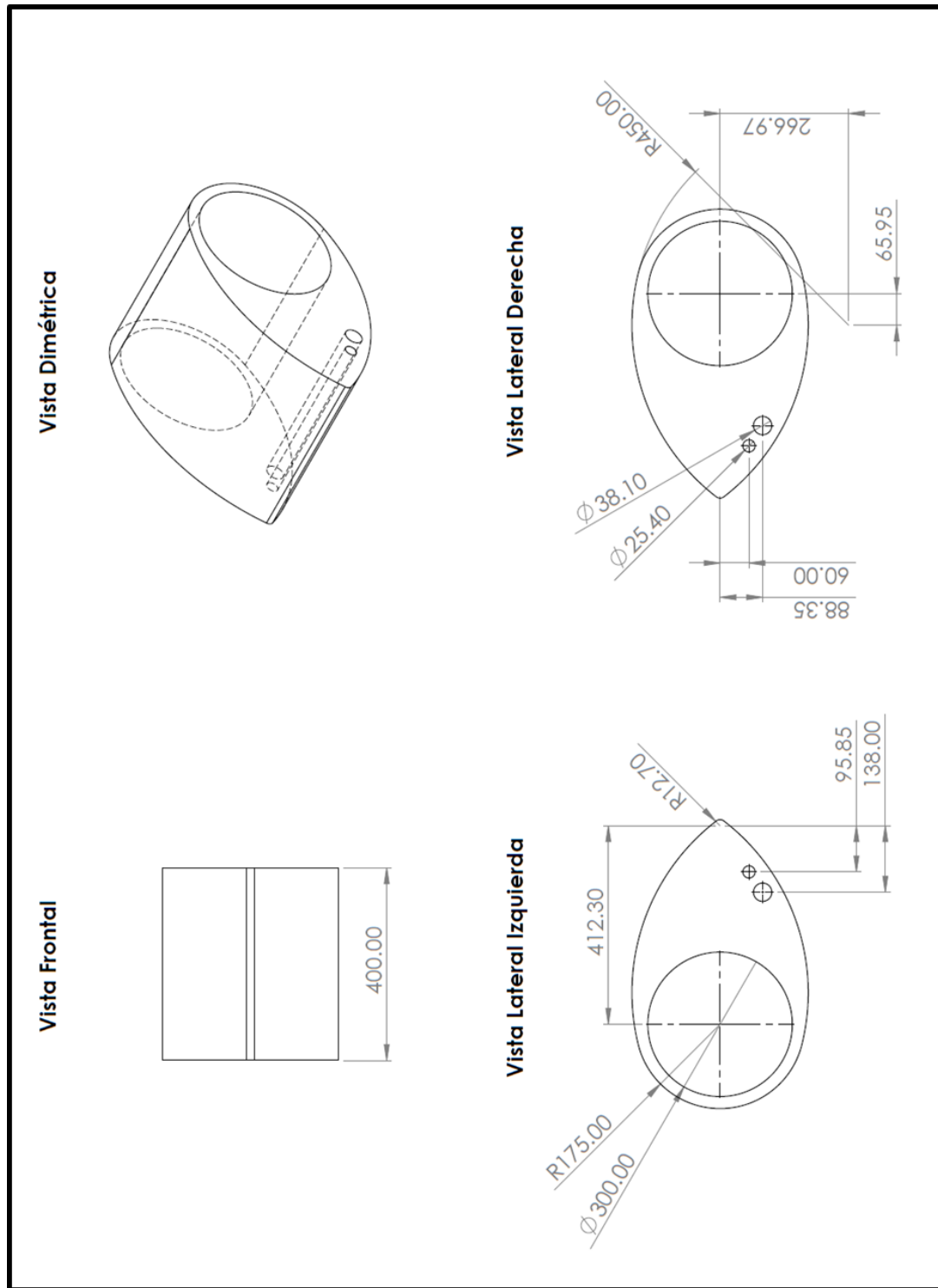


Fig. 36 Medidas generales del flotador, en mm.

*Anillo de soporte*

Esta pieza será fundamental en la unión del flotador, pues el anillo se encargará de conectar al flotador con el sistema del rodamiento antirretroceso. Este componente irá atornillado al flotador para mantener su posición fija y que favorezca la transmisión del torque provocada por la interacción de la ola incidente con la superficie del flotador

El esquema general del anillo de soporte se muestra en la Fig. 35.

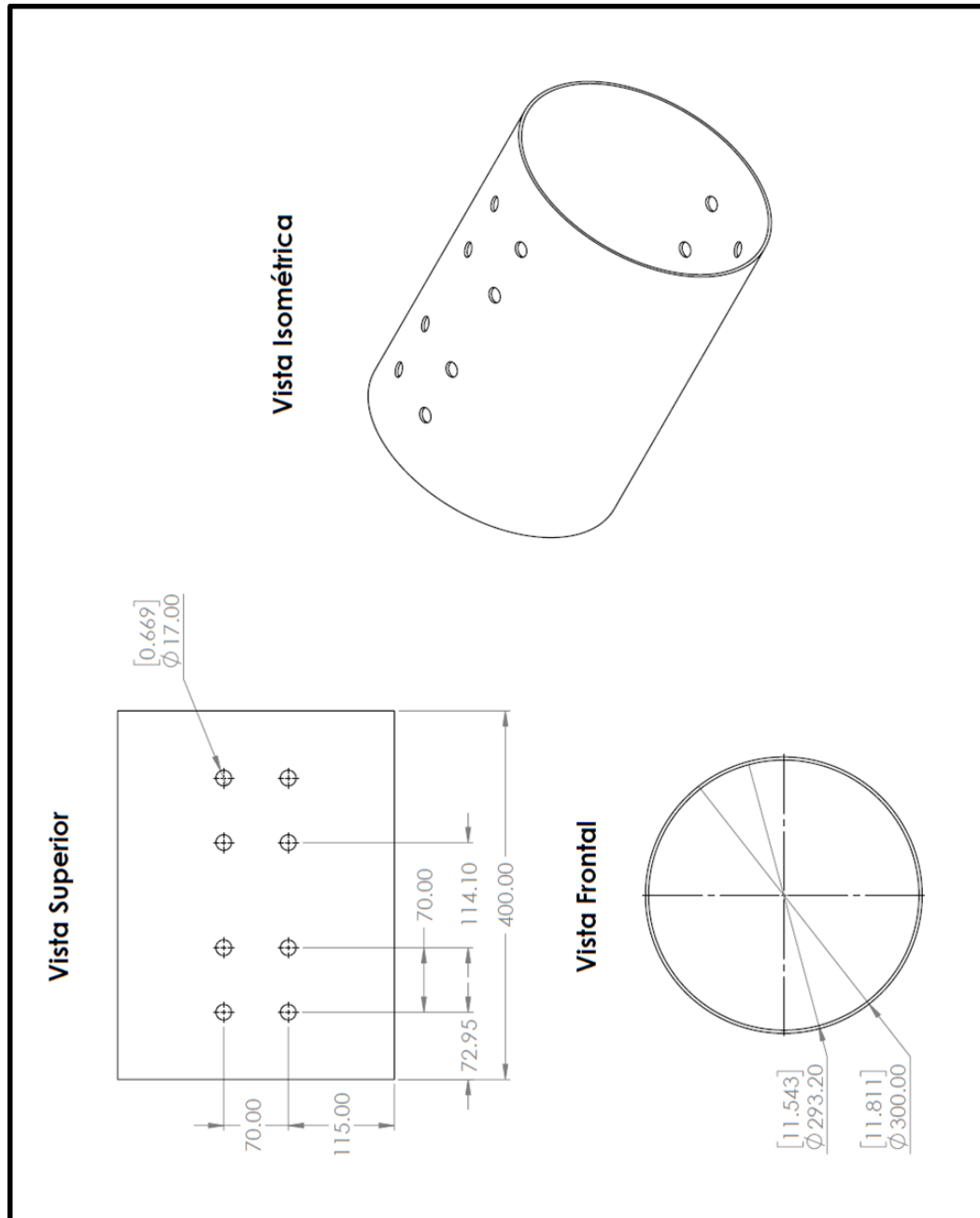


Fig. 37 Medidas generales del anillo de soporte, en mm.

### Placa de soporte de sistema PTO

Este componente es el encargado de conectar al sistema mecánico, con la base estructural y el sistema PTO. Para realizar el ensamble del sistema de transmisión mecánica, se deben instalar antes estas placas en ambos costados interiores del convertidor.

El esquema general de la placa de soporte se muestra en la Fig. 36.

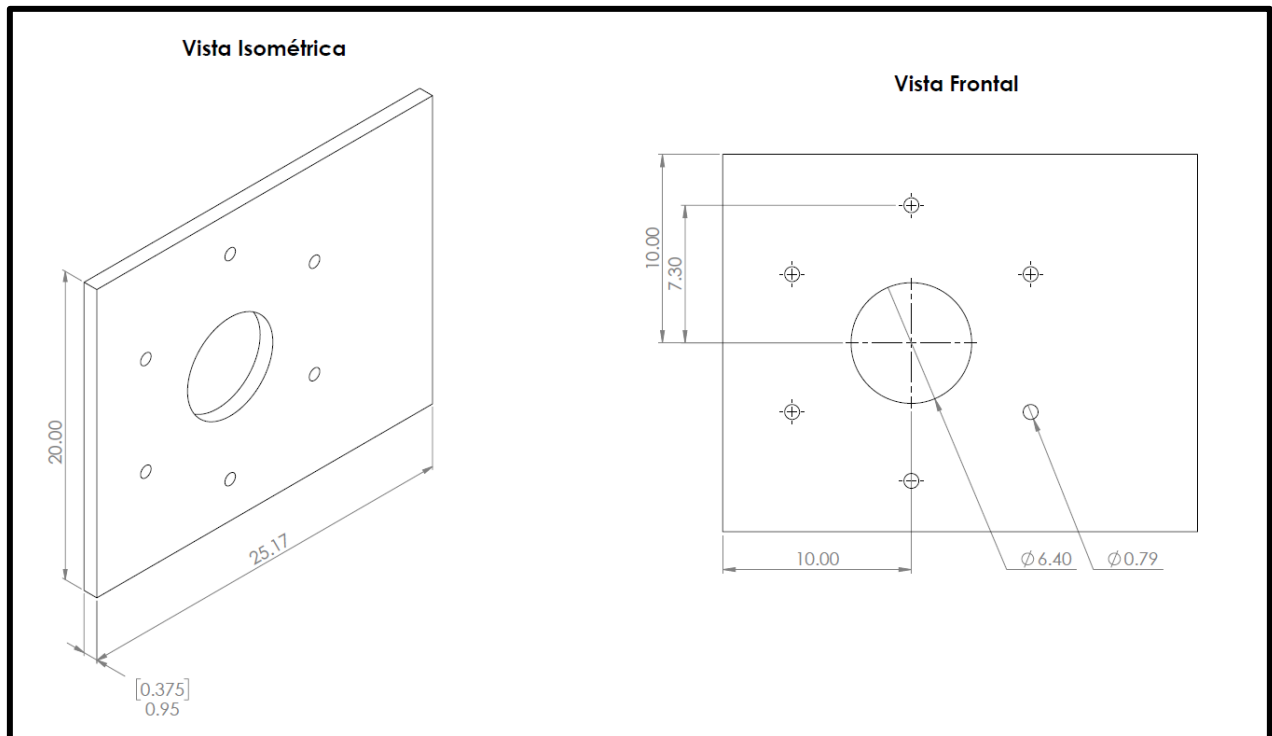


Fig. 38 Medidas generales de la placa de soporte para sistema PTO, en cm.

### *Flecha o eje de transmisión*

La flecha es el componente principal en la transmisión de energía mecánica hacia el generador eléctrico. Esta pieza fue diseñada a partir de factores como: la obtención de datos sobre fuerzas de oleaje y el material de construcción para ambientes marinos. Fue diseñada para soportar las cargas ejercidas por las olas en el proceso de trabajo del dispositivo WEC con condiciones específicas.

La flecha cuenta con dos hombros que tienen diferentes propósitos. El primer hombro tiene como función el alojamiento del sistema de transmisión por bandas del dispositivo; el sistema de transmisión es posicionado contra este primer hombro para mantener su ubicación exacta y fija. El segundo hombro cumple con la finalidad de alojar los cojinetes que sostienen al eje y determinar la separación del diámetro más grande, en donde se ubicarán el sistema de flotadores, con respecto a la base soporte de los cojinetes.

Los chaveteros en el eje son los siguientes:

Chaveta A 16x10x85.73 DIN 6885 – Localizado en el diámetro menor de la flecha. Encargado de transmitir el par a las poleas.

Chaveta A 18x11x92.88 DIN 6885 – Es el encargado de alojar a los cojinetes del sistema PTO.

Chaveta A 18x11x95.25 DIN 6885 – Encargados de transmitir el par ejercidos por los rodamientos antirretroceso.

El esquema general de la flecha de transmisión se muestra en la Fig. 37.



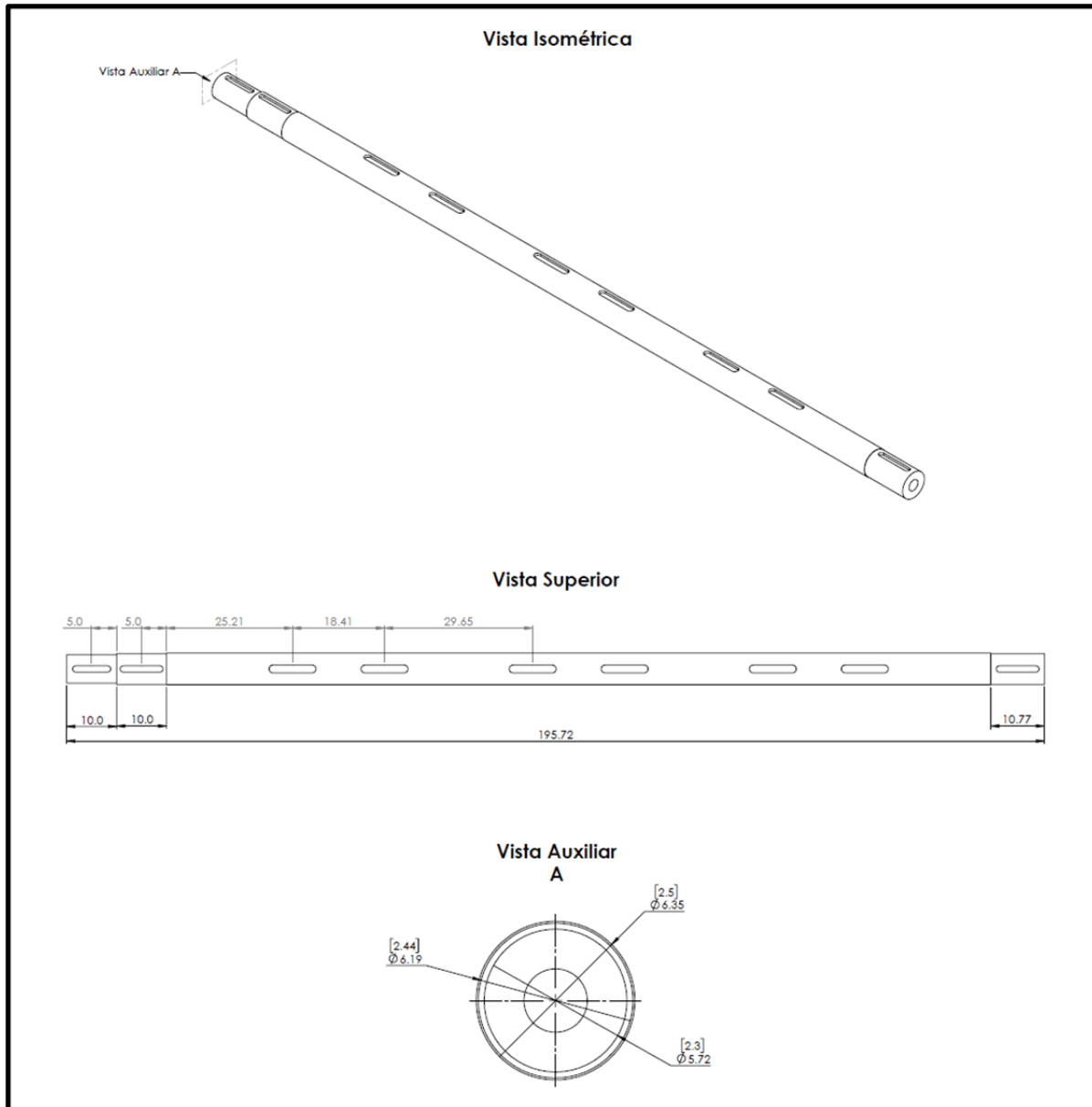
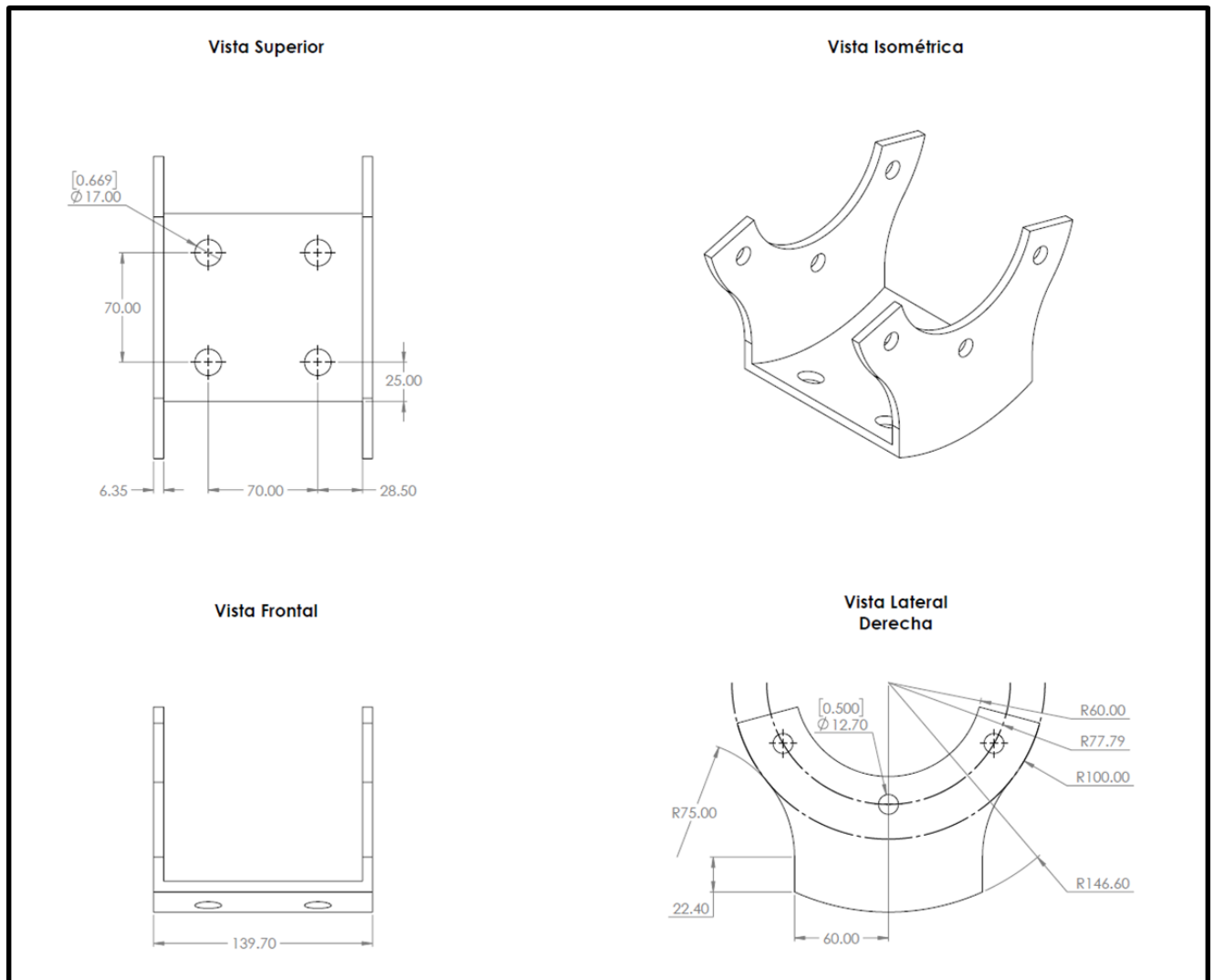


Fig. 39 Medidas generales de la flecha de transmisión, en cm.

*Soporte de rodamiento antirretroceso*

Este componente es el encargado de sujetar a los rodamientos antirretroceso de cada uno de los flotadores. Tiene como función, como complemento del anillo de soporte, la transmisión del par de torsión efectuado por la interacción entre las olas y los flotadores, así como establecer una posición fija para el ensamble del flotador con el eje y rodamientos.

El esquema general del soporte de rodamiento antirretroceso se muestra en la Fig. 40.



**Fig. 40** Medidas generales del Soporte de rodamiento antirretroceso, en mm.

### *Armadura estructural*

La armadura estructural tiene como objetivo proteger al sistema PTO para la conversión de energía eléctrica; resistir las diferentes condiciones climáticas que se presenten y mantener su integridad física en un estado óptimo; y sostener el sistema mecánico que se encargará de la absorción energética undimotriz.

Para estos efectos, la base fue diseñada con tubería DN40 AISI 316L que conforman los marcos principales de la estructura; y barras del mismo material que fungen como conexión entre los marcos del dispositivo, además de brindar una mayor protección a la hora de distribuir los esfuerzos provocados por las fuerzas generadas por las olas entrantes. Se eligió una configuración para las barras del tipo rectangular de “N’s” o tipo Pratt para lograr este propósito. La distancia que tienen las varillas de acero con respecto al marco tubular en el que se encuentra es de 1.5 in. Esto permite reducir la probabilidad de falla en la estructura debido a esfuerzos concentrados provocados en el proceso de soldadura.

La armadura consta de dos estructuras trapezoidales que se encargan de alojar al sistema de transmisión y al sistema PTO. A su vez, estas dos estructuras están unidas gracias a un armazón rectangular que se encuentra soldado sobre sus bases menores, y que también, es el encargado de alojar al generador eléctrico.

Esta configuración permite limitar el giro de los flotadores, de modo que se puede asegurar el funcionamiento correcto de éstos y que no queden inmovilizados debido a un sobregiro.

El esquema general de la base estructural se muestra en la Fig. 41.

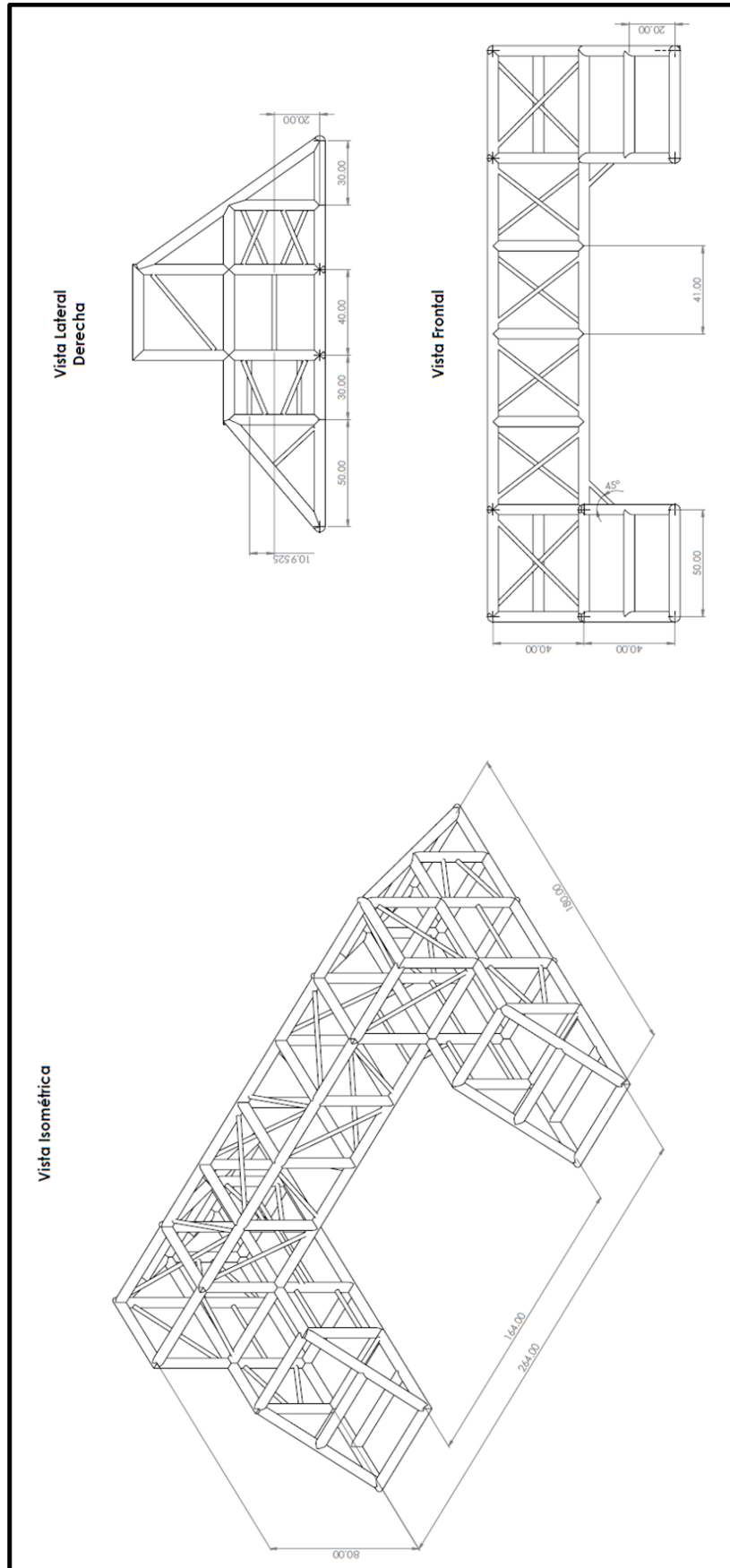


Fig. 41 Medidas generales de la base estructural, en cm.

Rodamiento Antirretroceso

El rodamiento elegido para realizar la tarea de transmisión de energía mecánica del flotador hacia el eje de transmisión. Según las medidas seleccionadas para la flecha, el flotador y el anillo de soporte, se eligió el rodamiento Rueda libre completa FR 650 RINGSPAN.

El esquema general del rodamiento antirretroceso elegido se muestra en la Fig. 42.

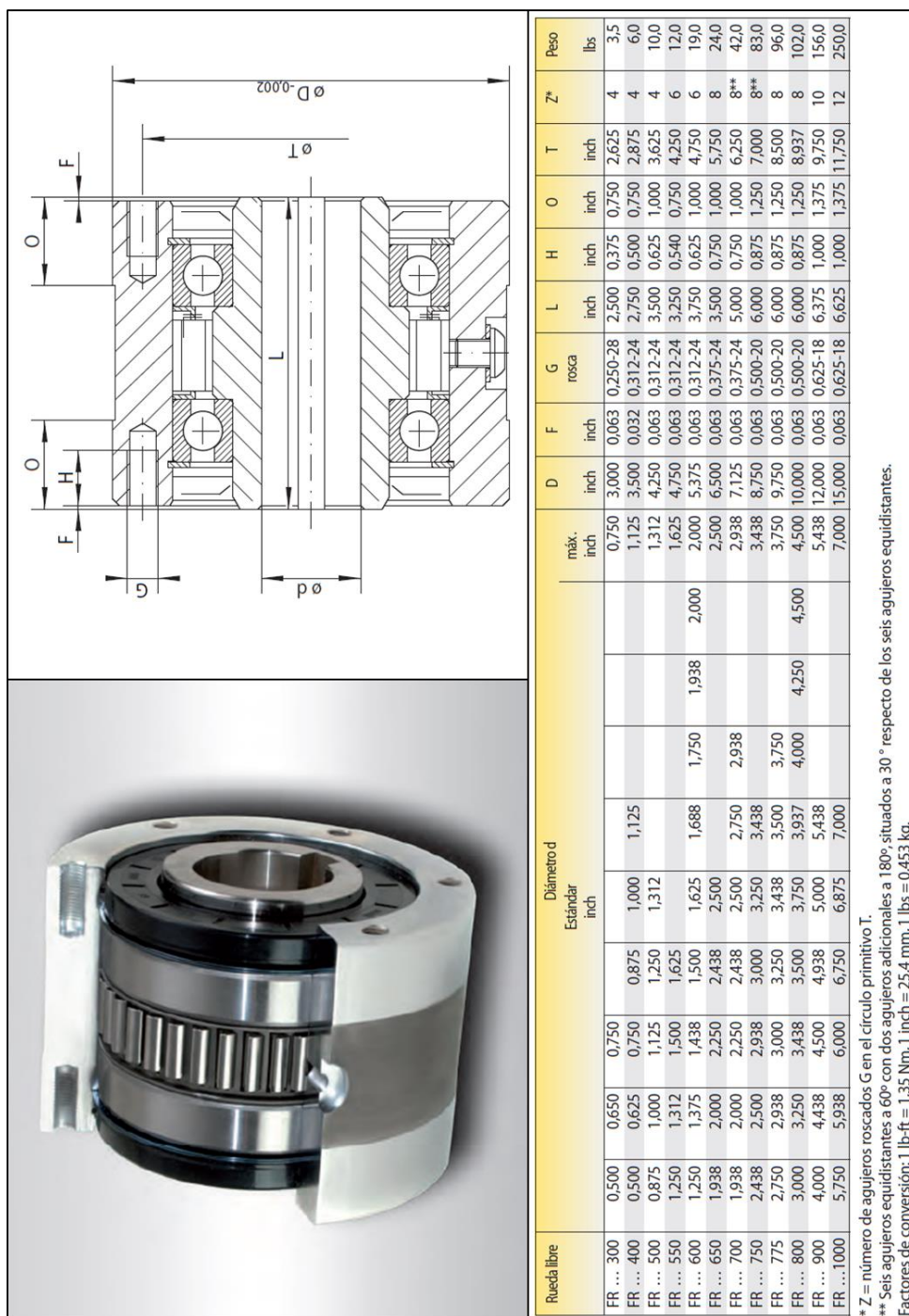
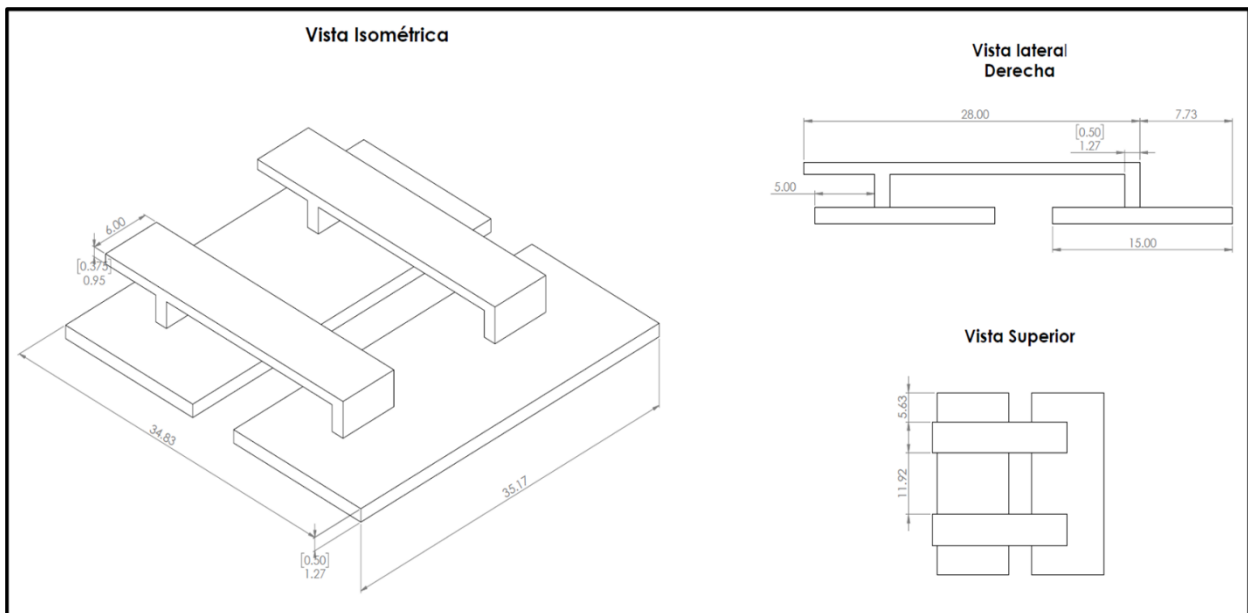


Fig. 42 Esquema general e información del rodamiento de la familia FR.

### *Base de soporte de generador eléctrico*

Este elemento funge como una base de instalación para el generador eléctrico del dispositivo WEC. Consta de dos placas de acero AISI 316L de 1/2" unidas por medio de soldadura a la estructura, las cuales a su vez se encargan de alojar a las dos bases que aloja al generador eléctrico. Estas bases están hechas con placas de 3/8" del mismo material e construcción. Este componente, como se puede observar en la Fig. 43, cuentan con diferentes tamaños de placas propuestas de acuerdo a las medidas generales del generador y la armadura estructural. El espesor de placa fue seleccionado para soportar el peso del motor. De esta manera, se asegura que la base cuente con una prolongada vida de servicio.

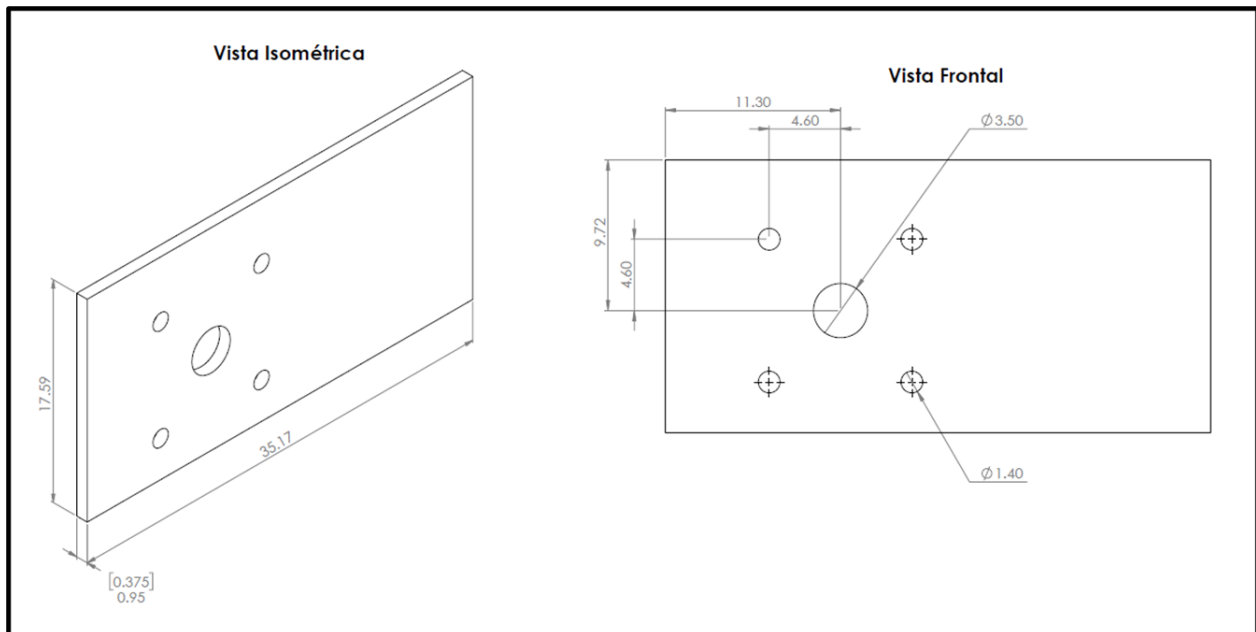


**Fig. 43** Medidas generales de la Base de soporte de generador eléctrico, en cm.

*Placa de soporte para sistema de transmisión*

Esta placa asume la tarea de sostener a los cojinetes de cuatro puntos y al eje de transmisión, correspondientes al sistema de transmisión. Consta de una placa de acero AISI 316L de 3/8 de pulgada y cinco perforaciones, de las cuales cuatro sirven para posicionar y sostener a los cojinetes de cuatro puntos; mientras que el orificio con mayor diámetro solamente permite el paso del eje para su instalación. Este componente debe ser soldado a la estructura entre las varillas que cuentan con la misma geometría y medidas.

En la Fig. 44 se puede apreciar el esquema general de este componente.



**Fig. 44** Medidas generales de la placa de soporte para sistema de transmisión, en cm.

### *Eje de sistema de transmisión por bandas*

Este componente tiene el propósito de alojar a las poleas intermedias del sistema de transmisión por bandas y transmitir el par ejercido por el sistema PTO.

El material de construcción es el mismo con el que fue diseñada la flecha de transmisión.

En la Fig. 45 se puede observar el esquema general de este componente.

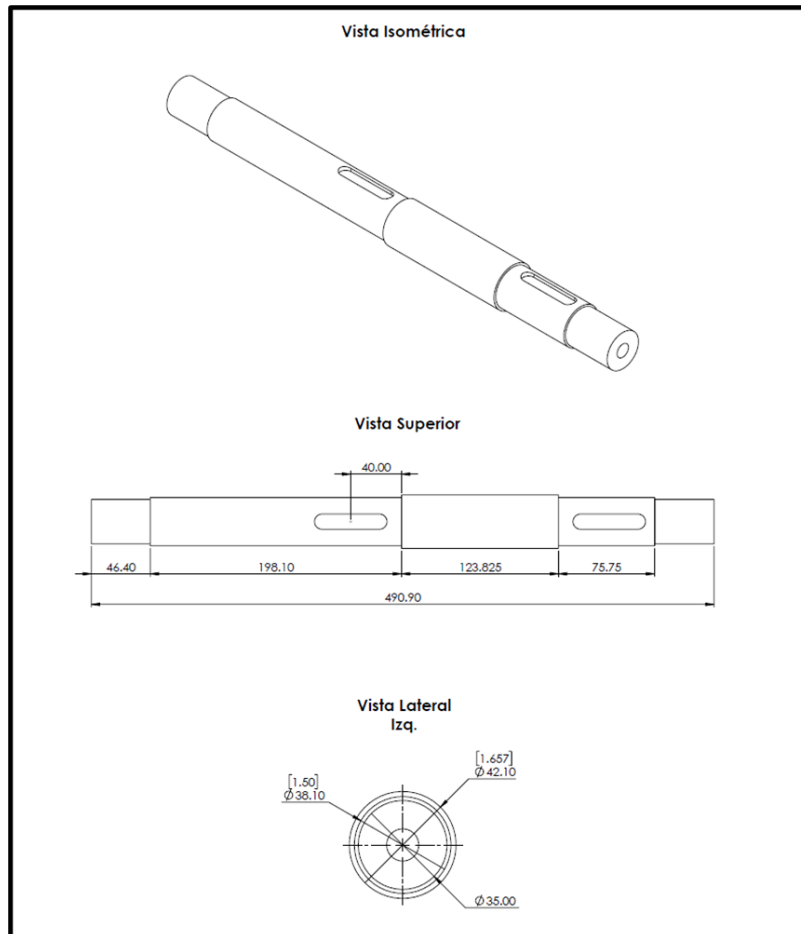


Fig. 45 Medidas generales de la flecha de transmisión, en cm.



*Generador eléctrico*

En cuanto al sistema de toma de poder (PTO) se consideró el uso de un generador eléctrico de baja frecuencia. Esto se debe a que la frecuencia promedio de las olas del mar es de  $\sim 1$  Hz. En la Fig. 45, se muestra el generador eléctrico elegido junto con algunas características.

<b>Generador eléctrico - Series GDF para energías renovables (GREEF)</b>	
<b>Modelo:</b>	GDF-180
<b>Potencia:</b>	12 kW
<b>Velocidad nominal:</b>	450 rpm
<b>Tensión nominal:</b>	240 V
<b>Torque inicial:</b>	3.9
<b>Enfriamiento:</b>	Aire o agua.

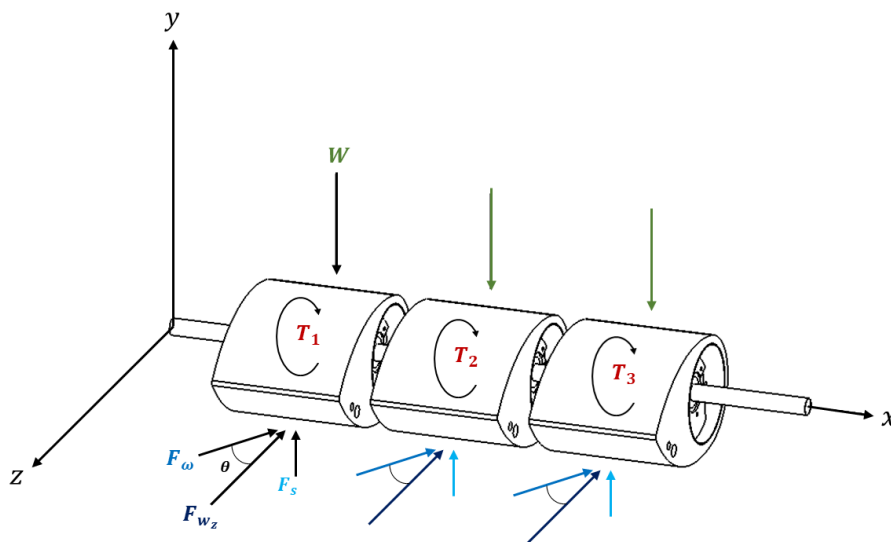


**Fig. 46** Generador eléctrico para aplicaciones de energía renovable de la empresa Qingdao Greef New Energy Equipment Co., Ltd.

### 3.2.4 Memoria de Cálculo

<b>MEMORIA DE CÁLCULO</b>		
Unidades: SI	<b>Cálculo de número de ciclos de trabajo:</b>  <i>FLECHA</i>  <u>Análisis estático</u>	ITP CONACyT
Realizó: Eddy León Ramírez		<b>RESULTADOS</b>
Fecha: 22/feb/2020		
<p>Como se mencionó al principio de esta sección, se ocuparán las siguientes fuerzas de olas.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>F_{W_{máx}} = 12 \text{ kN}</math></li> <li>○ <math>F_{W_{mín}} = 0.6 \cdot F_{W_{mín}}</math></li> </ul> <p>Datos conocidos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Masa del flotador <math>\rightarrow m_f = 101 \text{ kg}</math></li> <li>○ AISI 316L <math>\rightarrow S_{ut} = 593 \text{ MPa}</math> ; <math>S_y = 290 \text{ MPa}</math></li> <li>○ <math>\phi_e = 2.5 \text{ in} = 0.0635 \text{ m}</math></li> <li>○ <math>\phi_i = 1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}</math></li> </ul> <p>Medidas generales (en metros) de los puntos de interés en el eje.</p> <div style="text-align: center; margin: 10px 0;"> <p style="font-size: small; margin: 0;">0.2965249    0.1841    0.2965249    0.1841    0.2965249    0.1841    0.2965249</p> <p style="font-size: small; margin: 0;">a            b            a            b            a            b            a</p> </div> <p>Para el siguiente estudio, el primer paso consistirá en realizar un diagrama de cuerpo libre que ayudará a identificar las fuerzas que interactúan en la flecha de transmisión.</p> <p>Es importante mencionar que, como condición inicial, el dispositivo WEC deberá mantener un ángulo <math>\theta</math> con respecto de la ola incidente o frontal. Como se explicó en la sección anterior, el objetivo de mantener un ángulo entre el convertidor undimotriz y la ola, es que la interacción entre la ola incidente y cada uno de los flotadores se lleve a cabo de forma escalonada.</p>		$F_{W_{mín}} = 7.2 \text{ kN}$

Diagrama de cuerpo libre:



Se obtendrán las componentes necesarias de las fuerzas para proceder con el estudio.

Para  $F_{w_{m\acute{a}x}} = 12 \text{ kN}$

$$\begin{aligned} F_{w_{zm\acute{a}x}} &= F_w \cos \theta \\ &= 12 \text{ kN} \cos (20^\circ) \\ &= 11.276 \text{ kN} \approx 11.3 \text{ kN} \end{aligned}$$

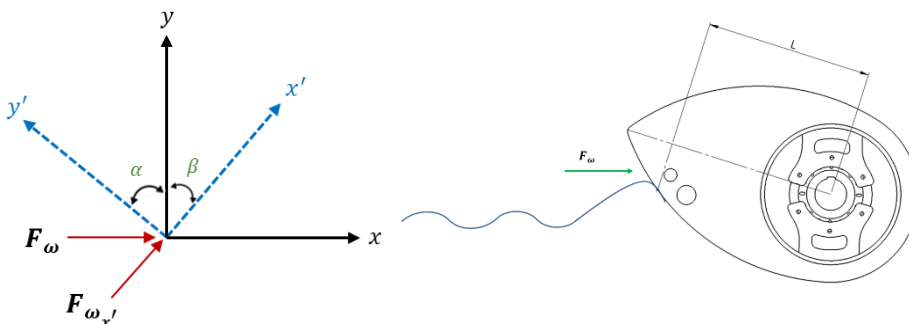
Para  $F_{w_{m\acute{i}n}} = 7.2 \text{ kN}$

$$\begin{aligned} F_{w_{zm\acute{i}n}} &= F_w \cos \theta \\ &= 7.2 \text{ kN} \cos (20^\circ) \\ &= 6.765 \text{ kN} \approx 6.8 \text{ kN} \end{aligned}$$

$$F_{w_{zm\acute{a}x}} = 11.3 \text{ kN}$$

$$F_{w_{zm\acute{i}n}} = 6.8 \text{ kN}$$

Para calcular el torque ejercido por la ola incidente, se obtendrá la componente de  $F_{w_z}$  de acuerdo al ángulo de impacto de dicha fuerza con respecto de la superficie del flotador.



La componente  $y'$  del plano, representa la línea existente entre el origen de la flecha de transmisión y la punta del flotador. Para este estudio, se

considerará un desplazamiento angular del flotador, de  $60^\circ$  con respecto al plano normal  $xy$ .

$$L = 0.3382 \text{ m}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

$$\beta = 90^\circ - \alpha = 30^\circ$$

Componentes de fuerzas:

○ Para  $F_{W_{zmáx}} = 11.3 \text{ kN}$

$$\begin{aligned} F_{W_{xmáx}} &= F_W \cos \alpha \\ &= 11.3 \text{ kN} \cos(60^\circ) \end{aligned}$$

$$F_{W_{xmáx}} = 5650 \text{ N}$$

○ Para  $F_{W_{zmin}} = 6.8 \text{ kN}$

$$\begin{aligned} F_{W_{xmin}} &= F_W \cos \alpha \\ &= 6.8 \text{ kN} \cos (60^\circ) \end{aligned}$$

$$F_{W_{xmin}} = 3400 \text{ N}$$

Cálculo del torque:

$$T_{máx} = F_{\omega_{xmáx}} \cdot L = 5650 \text{ N}(0.3382 \text{ m})$$

$$T_{mín} = F_{\omega_{xmin}} \cdot L = 3400 \text{ N}(0.3382 \text{ m})$$

$$T_{máx} = 1910.83 \text{ Nm}$$

$$T_{mín} = 1149.88 \text{ Nm}$$

Para este estudio, las cargas ejercidas por el peso de los flotadores ( $W$ ) y la fuerza de sustentación ( $F_s$ ), debido al fenómeno de flotación en el mar, se considerarán como iguales y contrarias. Por lo que,  $W - F_s = 0$ . Este razonamiento se define de una mejor forma en la sección del modelo dinámico del sistema.

### *Plano $xz$ – Flotador 1*

$$\sum_+ M_A = 0$$

$$-R_B(a) - R_C(a + b) + R_D(4a + 3b) = 0$$

$$R_D = \frac{R_{eq}(2a+b)}{(4a+3b)}$$

$$\uparrow_+ \sum F_y = 0$$

$$A - B - C + D = 0$$

$$R_A = 2R_{eq} - R_D$$

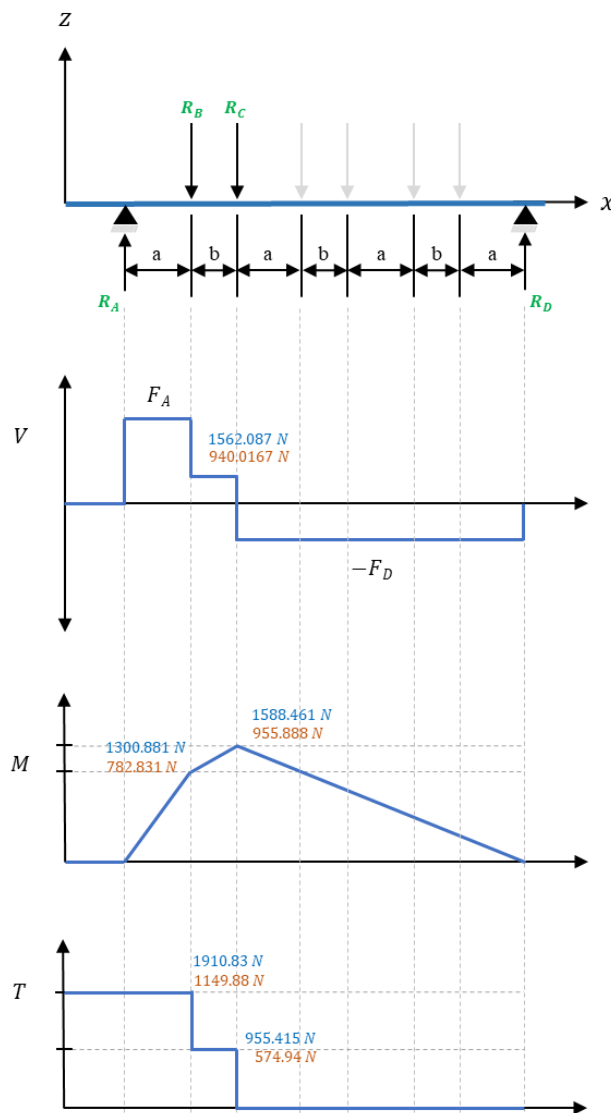
$$R_B = R_C = R_{eq} = 2825 \text{ N}$$

$$R_B = R_C = R_{eq} = 1700 \text{ N}$$

$$a = 0.2965249 \text{ m}$$

$$b = 0.1841 \text{ m}$$

Los resultados resaltados con color azul y color naranja pertenecen al estudio para las fuerzas  $F_{\omega_{x\text{máx}}}$  y  $F_{\omega_{x\text{mín}}}$ , respectivamente.



*Plano xz – Flotador 2*

$$\sum_{+} M_A = 0$$

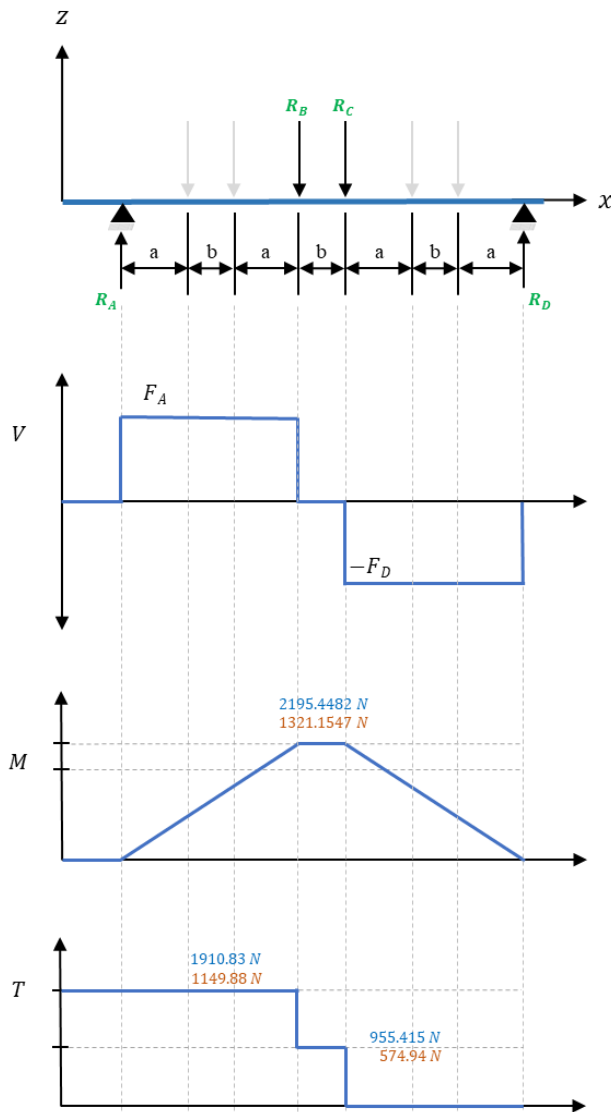
$$-R_B(2a + b) - R_C(2a + 2b) + R_D(4a + 3b) = 0$$

$$R_D = \frac{R_{eq}(4a+3b)}{(4a+3b)}$$

$$\uparrow_{+} \sum F_y = 0$$

$$R_A - R_B - R_C + R_D = 0$$

$$R_A = 2R_{eq} - R_{eq}$$



*Plano xz – Flotador 3*

$$\sum_{+} M_A = 0$$

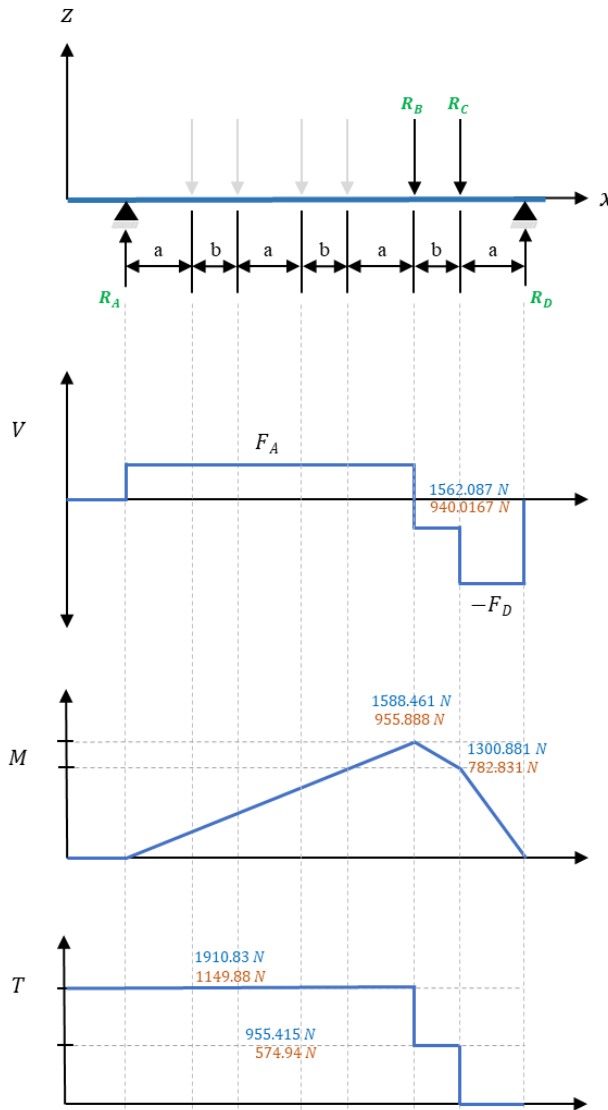
$$-R_B(3a + 2b) - R_C(3a + 3b) + R_D(4a + 3b) = 0$$

$$R_D = \frac{R_{eq}(6a+5b)}{(4a+3b)}$$

$$\sum_{+} F_y = 0$$

$$R_A - R_B - R_C + R_D = 0$$

$$R_A = 2R_{eq} - R_{eq}$$



Se realizará el estudio en cada uno de los puntos de interés, es decir, en cada uno de los cuñeros en donde se encuentran los flotadores. A continuación, se muestra el procedimiento desarrollado para el estudio de fatiga con el criterio de Gerber, recomendado para materiales dúctiles.

**Cuña 1**

$$M_{m\acute{a}x} = 1300.881 \text{ Nm}$$

$$M_{m\acute{i}n} = 782.831 \text{ Nm}$$

$$T_{m\acute{a}x} = 1910.83 \text{ Nm}$$

$$T_{m\acute{i}n} = 1149.88 \text{ Nm}$$

$$M_m = \frac{M_{m\acute{a}x} + M_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$T_m = \frac{T_{m\acute{a}x} + T_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$M_a = \frac{M_{m\acute{a}x} - M_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$T_a = \frac{T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n}}{2}$$

$$I_x = \frac{\pi}{64} [D^4 - d^4] = \frac{\pi}{64} [(0.0635m)^4 - (0.0254m)^4]$$

$$J_x = \frac{\pi}{32} [D^4 - d^4] = \frac{\pi}{32} [(0.0635m)^4 - (0.0254m)^4]$$

Para calcular los esfuerzos máximos alternantes y medios correspondientes, se calculará el factor de concentración del esfuerzo por fatiga  $K_f$  y  $K_{fs}$ , tomando los siguientes valores de  $K_t$  y  $K_{ts}$  presentados en la tabla 7-1 [Shigley 8va ed.]

Para cuñero fresado  $(r/d) = 0.021$ :

$$K_t = 2.14$$

$$K_{ts} = 3.0$$

Se utilizará la ecuación de Neuber para determinar  $K_f$  y  $K_{fs}$ .

Es importante mencionar que los valores utilizados para resolver esta sección, deben encontrarse en unidades del Sistema inglés. Por supuesto,

$$M_m = 1042 \text{ Nm}$$

$$M_a = 259 \text{ Nm}$$

$$T_m = 1530 \text{ Nm}$$

$$T_a = 380.5 \text{ Nm}$$

$$I_x = 0.77768e^{-6}m^4$$

$$J_x = 1.55536e^{-6}m^4$$



el resultado no será afectado ya que los valores a utilizar son adimensionales.

A continuación, se muestra el procedimiento desarrollado.

Ecuación de Neuber, 
$$K_f = 1 + \frac{K_t - 1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}} \quad ; \quad K_{fs} = 1 + \frac{K_{ts} - 1}{1 + \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{r}}}$$

en donde  $\sqrt{a}$  = número de Neuber

$r$  = es el radio de la muesca

$d$  representa el diámetro de la sección transversal del eje.

Entonces,

$$r = 0.021 \cdot d = 0.021(2.5 \text{ in})$$

$$r = 0.0525 \text{ in}$$

El número de Neuber se calcula diferente para cada uno de los factores de concentración del esfuerzo por fatiga.

*Flexión:*

$$\sqrt{a} = 0.246 - 3.08(10^{-3})S_{ut} + 1.51(10^{-5})S_{ut}^2 - 2.67(10^{-8})S_{ut}^3$$

$$\sqrt{a} = 0.246 - 3.08(10^{-3})(86.0073 \text{ kpsi}) + 1.51(10^{-5})(86.0073 \text{ kpsi})^2 - 2.67(10^{-8})(86.0073 \text{ kpsi})^3$$

$$\sqrt{a} = 0.0758 \sqrt{\text{in}}$$

$$K_f = 1 + \frac{(2.14) - 1}{1 + \frac{0.0758\sqrt{\text{in}}}{\sqrt{0.0525 \text{ in}}}}$$

$$K_f = 1.857$$

*Torsión:*

$$\sqrt{a} = 0.190 - 2.51(10^{-3})S_{ut} + 1.35(10^{-5})S_{ut}^2 - 2.67(10^{-8})S_{ut}^3$$

$$\sqrt{a} = 0.190 - 2.51(10^{-3})(86.0073 \text{ kpsi}) + 1.35(10^{-5})(86.0073 \text{ kpsi})^2 - 2.67(10^{-8})(86.0073 \text{ kpsi})^3$$

$$\sqrt{a} = 0.05699 \sqrt{\text{in}}$$

$$K_{fs} = 1 + \frac{(3.0) - 1}{1 + \frac{0.05699\sqrt{\text{in}}}{\sqrt{0.0525 \text{ in}}}}$$

$$K_{fs} = 2.602$$

Ahora, se procede a resolver los valores de los esfuerzos alternantes y medios.

$$\sigma_a = K_f \cdot \frac{M_a \cdot c}{I} = (1.857) \frac{259 \text{ Nm}(0.0254 \text{ m})}{0.77768e^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_a = 19.638 \text{ MPa}$$

$$\tau_a = K_{fs} \cdot \frac{T_a \cdot c}{J} = (2.602) \frac{380.5 \text{ Nm}(0.0254 \text{ m})}{1.5553e^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\sigma_m = 78.98 \text{ MPa}$$

$$\sigma_m = K_f \cdot \frac{M_m \cdot c}{I} = (1.857) \frac{1042 \text{ Nm}(0.0254 \text{ m})}{0.77768e^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\tau_a = 20.21 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = K_{fs} \cdot \frac{T_m \cdot c}{J} = (2.602) \frac{1530 \text{ Nm}(0.0254 \text{ m})}{1.5553e^{-6} \text{ m}^4}$$

$$\tau_m = 81.285 \text{ MPa}$$

Mediante el método de esfuerzos combinados de von Mises se obtiene:

$$\sigma'_a = (\sigma_a^2 + 3\tau_a^2)^{1/2} = [(19.638 \text{ MPa})^2 + 3(20.21 \text{ MPa})^2]$$

$$\sigma'_a = 40.135 \text{ MPa}$$

$$\sigma'_m = (\sigma_m^2 + 3\tau_m^2)^{1/2} = [(78.98 \text{ MPa})^2 + 3(81.285 \text{ MPa})^2]$$

$$\sigma'_m = 161.434 \text{ MPa}$$

Posteriormente, se obtienen los valores de modificación del límite de resistencia a la fatiga.

$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

$$k_a = a S_{sut}^b$$

$$k_b = 1.51 d^{-0.157}$$

$$k_d = S_T / S_{RT}$$

$$a = 57.7$$

$$= 1.51 (63.5 \text{ mm})^{-0.157}$$

$$= 1.0033$$

$$k_a = 0.589$$

$$b = -0.718$$

$$= 0.787$$

$$k_e = 1$$

$$k_b = 0.787$$

$$\therefore k_a = 0.589$$

$$k_c = 1 \text{ (flexión y torsión)}$$

$$k_f = 1$$

$$S'_e = 296.5 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} = 0.5 (593 \text{ MPa})$$

$$\therefore S_e = 137.89$$

Para calcular el número de ciclos se utiliza la siguiente ecuación:

$$N = \left( \frac{\sigma_{inv}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

De la Fig. 6-18 [Shigley 8va ed.]  $\rightarrow f = 0.86912$

$$a = \frac{(fS_{ut})^2}{S_e} = \frac{[0.86912(593 \text{ MPa})]^2}{137.89 \text{ MPa}}$$

$$a = 1.92629 \text{ GPa}$$

$$b = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{fS_{ut}}{S_e} \right) = -\frac{1}{3} \log \left( \frac{0.86912(593 \text{ MPa})}{137.89 \text{ MPa}} \right)$$

$$b = -0.19086$$

### Determinación del factor de seguridad de fatiga $n_f$ .

Criterio de Gerber

$$n_f = \frac{1}{2} \left( \frac{S_{ut}}{\sigma'_m} \right)^2 \frac{\sigma'_a}{S_e} \left[ -1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2\sigma'_m S_e}{S_{ut} \sigma'_a} \right)^2} \right]$$

$$n_f = 2.202$$

### Cálculo del esfuerzo inverso $\sigma_{inv}$ .

Para este propósito, se sustituirá  $S_e$  por el esfuerzo inverso  $\sigma_{inv}$

Criterio de Gerber

$$\frac{1}{n_f} = \frac{8A}{\pi d^3 \sigma_{inv}} \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{2B\sigma_{inv}}{AS_{ut}} \right)^2} \right]$$

$$A = \sqrt{4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2}$$

$$\sigma_{inv} = 39.1334 \text{ MPa}$$

$$B = \sqrt{4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2}$$

### Cálculo del número de ciclos de trabajo $N$ de la flecha.

$$N = \left( \frac{\sigma_{inv}}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

$$N = 734.3764 \times 10^6$$

ciclos

<p>El procedimiento se repite para cada uno de los cuñeros. Por lo tanto, los resultados del análisis de fatiga para los demás puntos de interés son los siguientes.</p> <p><b>Cuña 2</b></p> <p><math>M_{m\acute{a}x} = 1588.461 Nm</math>  <math>M_{m\acute{i}n} = 955.888 Nm</math>  <math>T_{m\acute{a}x} = 955.415 Nm</math>  <math>T_{m\acute{i}n} = 574.94 Nm</math></p> <p><b>Cuña 3</b></p> <p><math>M_{m\acute{a}x} = 2195.4482 Nm</math>  <math>M_{m\acute{i}n} = 1321.1547 Nm</math>  <math>T_{m\acute{a}x} = 1910.83 Nm</math>  <math>T_{m\acute{i}n} = 1149.88 Nm</math></p> <p><b>Cuña 4</b></p> <p><math>M_{m\acute{a}x} = 2195.4482 Nm</math>  <math>M_{m\acute{i}n} = 1321.1547 Nm</math>  <math>T_{m\acute{a}x} = 955.415 Nm</math>  <math>T_{m\acute{i}n} = 574.94 Nm</math></p> <p><b>Cuña 5</b></p> <p><math>M_{m\acute{a}x} = 1588.461 Nm</math>  <math>M_{m\acute{i}n} = 955.888 Nm</math>  <math>T_{m\acute{a}x} = 1910.83 Nm</math>  <math>T_{m\acute{i}n} = 1149.88 Nm</math></p> <p><b>Cuña 6</b></p> <p><math>M_{m\acute{a}x} = 1300.881 Nm</math>  <math>M_{m\acute{i}n} = 782.831 Nm</math>  <math>T_{m\acute{a}x} = 955.415 Nm</math>  <math>T_{m\acute{i}n} = 574.94 Nm</math></p>	<p><math>n_f = 2.976</math>  <math>N = 314.809 \times 10^6</math>  <i>ciclos</i></p> <p><math>n_f = 1.833</math>  <math>N = 444.0647 \times 10^6</math>  <i>ciclos</i></p> <p><math>n_f = 2.358</math>  <math>N = 250.2868 \times 10^6</math>  <i>ciclos</i></p> <p><math>n_f = 2.083</math>  <math>N = 612.8787 \times 10^6</math>  <i>ciclos</i></p> <p><math>n_f = 3.359</math>  <math>N = 376.12956 \times 10^6</math>  <i>Ciclos</i></p>
---	---

<b>MEMORIA DE CÁLCULO</b>		
Unidades: SI	<b>Determinación de la selección de transmisión por bandas</b>	ITP CONACyT
Realizó: Eddy León Ramírez		<b>RESULTADOS</b>
Fecha: 1/mayo/2020		
<p>Para el desarrollo de esta sección, se realizó el procedimiento de selección para transmisiones especiales brindado por la compañía Martin Sprocket &amp; Gear [30].</p> <p>A continuación, se muestra el procedimiento desarrollado. Las tablas que se mencionan en el procedimiento serán presentadas en los anexos.</p> <p>1) Antes de seleccionar una transmisión es necesario conocer la siguiente información:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Potencia y tipo del motor.</li> <li>• RPM del motor.</li> <li>• RPM y tipo de la máquina impulsada.</li> <li>• Distancia aproximada entre centros de los ejes.</li> <li>• Diámetros de los ejes de ambas unidades.</li> <li>• Horas promedio de operación al día</li> </ul> <p>Para este propósito, se propondrá una potencia de operación de motor de 8 kW, equivalente a 10.73 HP</p> <p>Frecuencia de operación <math>f = \sim 1 \text{ Hz}</math></p> <p>Velocidad angular <math>\omega</math></p> $\omega = 2\pi f$ <p>RPM nominal del motor:</p> <p>Distancia aproximada entre los ejes: desconocida</p>		$P = 8 \text{ kW}$ $\approx 10.73 \text{ HP}$ $\omega = 6.2832 \text{ rad/s}$ $\approx 60 \text{ rpm}$ $450 \text{ rpm}$



3. Determinar la relación de velocidad.

Debido a que la velocidad angular de la polea motriz es de 60 rpm y la velocidad a conseguir es de 450 rpm para producir 12kW, se realizará el procedimiento para dos sistemas de bandas. El objetivo es reducir la relación de velocidad y con esto, reducir los diámetros de las poleas.

$$K_1 = \frac{N_{(eje\ más\ rápido)}}{n_{(eje\ más\ lento)}} = \frac{150\ rpm}{60\ rpm}$$

$$K_2 = \frac{N_{(eje\ más\ rápido)}}{n_{(eje\ más\ lento)}} = \frac{400\ rpm}{150\ rpm}$$

$$K_1 = 2.5$$

$$K_2 = 2.6667$$

4. Selección de diámetros de las poleas.

De las Tablas de Selección de Transmisión en Existencia 5V con una relación de velocidad de 2.5, se obtiene la siguiente combinación de poleas

Polea motriz	Polea impulsada
$D_e = 10.9\ in$	$D_e = 4.4\ in$

De las Tablas de Selección de Transmisión en Existencia 3V con una relación de velocidad de 2.69, se obtiene la siguiente combinación de poleas

Polea motriz	Polea impulsada
$D_e = 8\ in$	$D_e = 3\ in$

5. Determinar la distancia entre centros y el largo de la banda.

Cuando no se especifique la distancia entre centros, utilice  $(D + 3d)/2$ , donde  $D = D_E$  de la polea impulsada, y  $d = D_E$  de la polea motriz.

Distancia entre centros

$$C_1 = \frac{D_e + 3d_e}{2} = \frac{10.9 \text{ in} + 3(4.4 \text{ in})}{2}$$

$$C_1 = 12.05 \text{ in}$$

$$C_2 = \frac{D_e + 3d_e}{2} = \frac{8 \text{ in} + 3(3 \text{ in})}{2}$$

$$C_2 = 8.5 \text{ in}$$

Longitud de la banda  $L$

$$L_1 = 2C + 1.57(D_e + d_e) + \frac{(D_e - d_e)^2}{4C}$$

$$L_1 = 48.9975 \text{ in}$$

$$L_2 = 2C + 1.57(D_e + d_e) + \frac{(D_e - d_e)^2}{4C}$$

$$L_2 = 37.8288 \text{ in}$$

La Tabla 10 muestra el largo efectivo de cada una de las bandas existentes y su factor de corrección. Se escogerá el valor más próximo al obtenido anteriormente.

*Largo efectivo 1*                       $L_1 = 50 \text{ in}$

$$L_1 = 50 \text{ in}$$

*Factor de correccion* = 0.85

*Largo efectivo 2*                       $L_2 = 40 \text{ in}$

$$L_2 = 40 \text{ in}$$

*Factor de correccion* = 0.92

Una vez que se conoce la longitud efectiva de la banda, se procede a conocerla distancia entre centros corregida.

$$C_{c1} = \frac{L_1 - 1.57(D_e + d_e) - \frac{(D_e - d_e)^2}{1.57(L_1 - K)}}{2}$$





Calcular la Potencia de Banda Corregida. Para este paso, se debe multiplicar la potencia por banda por el Factor de corrección por longitud, por el Factor de corrección por arco “G”

$$P_{B1} = 2.85 * 0.85 * 0.927688$$

$$P_{B2} = 1.53 * 0.92 * 0.935170$$

Para encontrar el número de bandas requeridas para cada uno de las dos transmisiones, se divide la potencia de diseño por la potencia por banda corregida.

$$N_{B1} = \frac{15.022 \text{ HP}}{2.2473 \text{ HP}} = 6.6843 \quad \mathbf{8 \text{ bandas}}$$

$$N_{B2} = \frac{15.022 \text{ HP}}{1.316345} = 11.411 \quad \mathbf{10 \text{ bandas}}$$

Finalmente, las transmisiones seleccionadas son las siguientes:

Transmisión 1

Polea motriz	Polea impulsada
<b>10 5V 1090 TB</b>	<b>4 5V 440 TB</b>
No. de Banda	
<b>5VX 500</b>	

Transmisión 2

Polea motriz	Polea impulsada
<b>10 3V 800 TB</b>	<b>4 3V 300 TB</b>
No. de Banda	
<b>3VX 400</b>	

### 3.2.5 Análisis de fatiga en CAE

En esta sección se mostrará el desarrollo del estudio de fatiga realizado a la flecha de transmisión del sistema PTO, como se había mencionado en apartados anteriores. Este componente fue seleccionado para el presente análisis debido a la interacción energética que mantiene debido a la interacción con los flotadores y las olas del mar; y por su importancia dentro del sistema de toma de potencia.

Debido a que las condiciones en las que se encuentra inmerso el dispositivo WEC fluctúan debido al comportamiento dinámico del oleaje, es importante realizar un estudio que permita predecir una falla o fractura de cualquiera de sus componentes. De esta manera, se pueden establecer controles o estrategias que puedan aumentar la vida útil del componente de estudio y/o proponer un cambio del componente antes de que se produzca la falla.

La finalidad del presente estudio radica en determinar el número de ciclos de trabajo efectivo de la flecha de transmisión y su factor de seguridad de fatiga, de acuerdo a las condiciones de frontera establecidas desde un inicio. Es decir, la selección del material, longitud del eje, diámetros, posicionamiento de los flotadores, cargas involucradas, entre otros.

La plataforma utilizada para el desarrollo del análisis de elemento finito en la presente sección es ANSYS Workbench. Al igual que el estudio de fatiga realizado en la sección anterior, el análisis se desarrolló de forma estática debido a que las cargas dinámicas involucradas, y presentadas en el modelo dinámico del sistema, se desconocen y estas dependen del lugar específico en donde se planea desarrollar el prototipo.

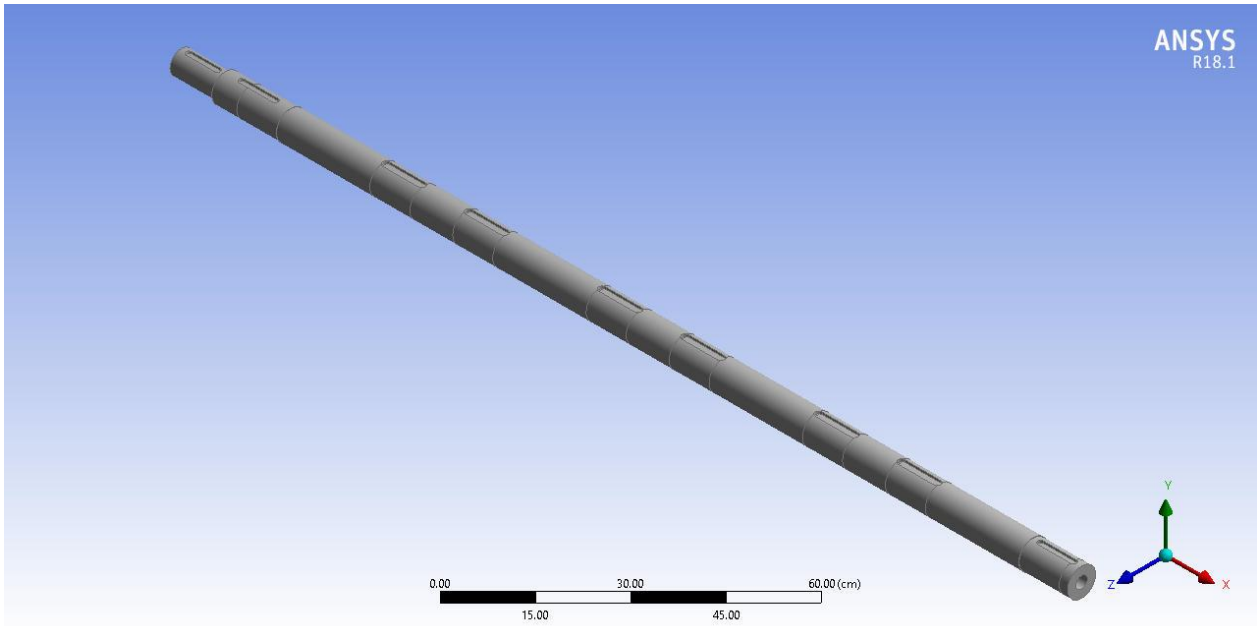
El diseño de la flecha en 3D se llevó a cabo en el software especializado en CAE, SolidWorks. El componente fue exportado a Design Modeler, la plataforma de diseño CAE de ANSYS, con el objetivo de definir las caras de contacto de los rodamientos acoplados en los flotadores, y las caras en donde se encuentran posicionados los cojinetes del sistema PTO, como se muestra en la Fig. 46.

A continuación, se describe el procedimiento desarrollado para el estudio de fatiga a la flecha de transmisión.

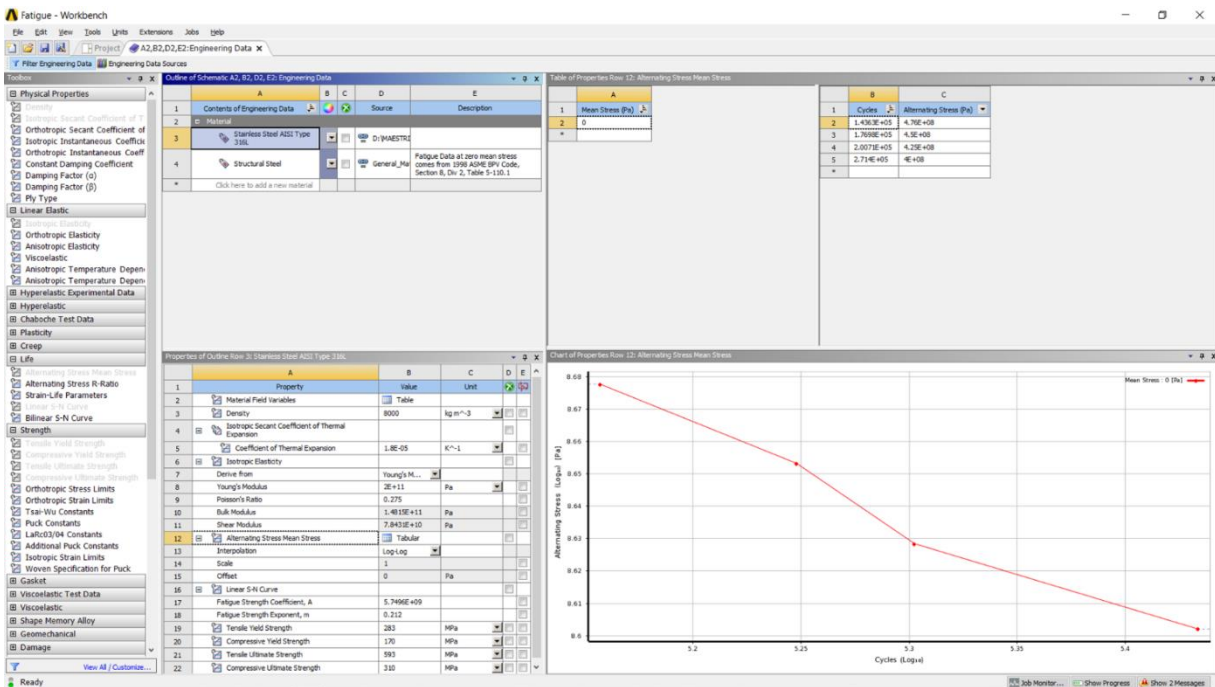
Dentro de la interfaz de Workbench, se seleccionó el bloque “*Static Structural*” que permite el desarrollo de estudios con un enfoque de forma estática.

El material seleccionado para la flecha de transmisión es un acero inoxidable bajo en carbón AISI tipo 316L. Este material no está definido dentro de la librería de ANSYS, por lo que se tuvo que

configurar manualmente con un bloque “Engineering Data”. En la Fig. 47 se muestran las propiedades físicas configuradas en la librería para el desarrollo del estudio.



**Fig. 47** Pieza de estudio finalizada: Flecha de transmisión.



**Fig. 48** Configuración de acero tipo 316L.

Una vez configurado el componente de estudio y el material de construcción, se continuó con el preprocesamiento, es decir, el mallado de la pieza y el establecimiento de cargas.

Para la obtención de mejores resultados, se realizaron pruebas de distintos tipos de malla aplicados a la pieza. El criterio de elección del tipo de malla final estuvo dado por el promedio de la calidad por elemento de mallado.

Algunos de los métodos utilizados para el mallado fueron el método de barrido (*Sweep*), hexaedros y tetraedros. El primer método fue descartado debido a la deformación de sus elementos conforme la aproximación de aristas o superficies más pequeñas. El promedio de calidad del elemento en este método se encontraba por debajo de 0.4.

El método de hexaedros suponía un mejor mallado con respecto al método de barrido. Sin embargo, a pesar de los diferentes tipos de métodos utilizados para el refinamiento de la malla en ciertas zonas, la cantidad de nodos utilizados para lograr un promedio de calidad de elemento de aproximadamente 0.75, superaba a la cantidad de elementos existentes. Es decir, la relación de elementos respecto a los nodos existentes. El método utilizado fue de hexaedros de 20 nodos.

Finalmente, el método de mallado utilizado en el proceso fue de hexaedros de 10 nodos. Este método resultó ser el mejor en cuanto a la calidad de los elementos existentes y con una buena relación de elementos versus nodos. En promedio, la mayor parte de los elementos existentes se encuentran en una calidad de aproximadamente 0.9, lo que supone un buen mallado. El promedio general de calidad por elemento es de 0.83639, como se ilustra en la Fig. 48.

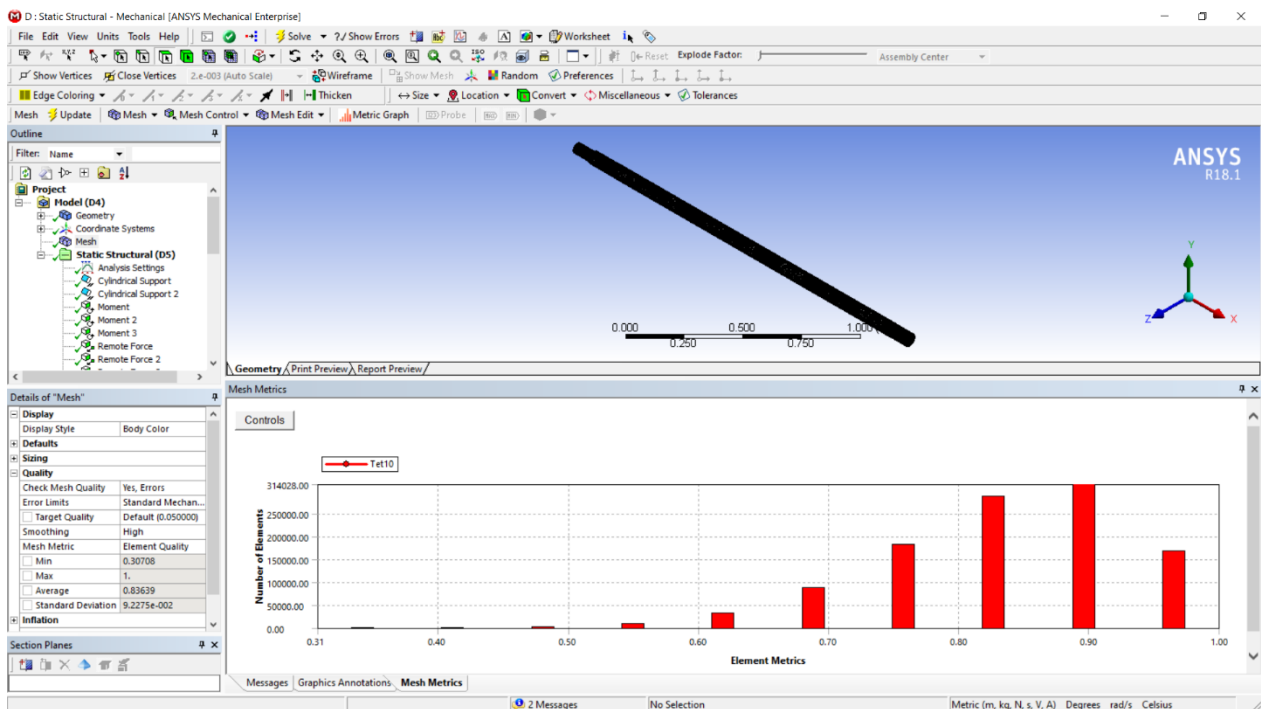


Fig. 49 Proceso de mallado: Resultados de calidad de los elementos de la malla.

El mallado de la flecha se observa en la Fig. 49. Se puede apreciar que existe un refinamiento a las zonas de interés. Es decir, en los cuñeros y aquellas áreas en donde existe una reducción de diámetro.

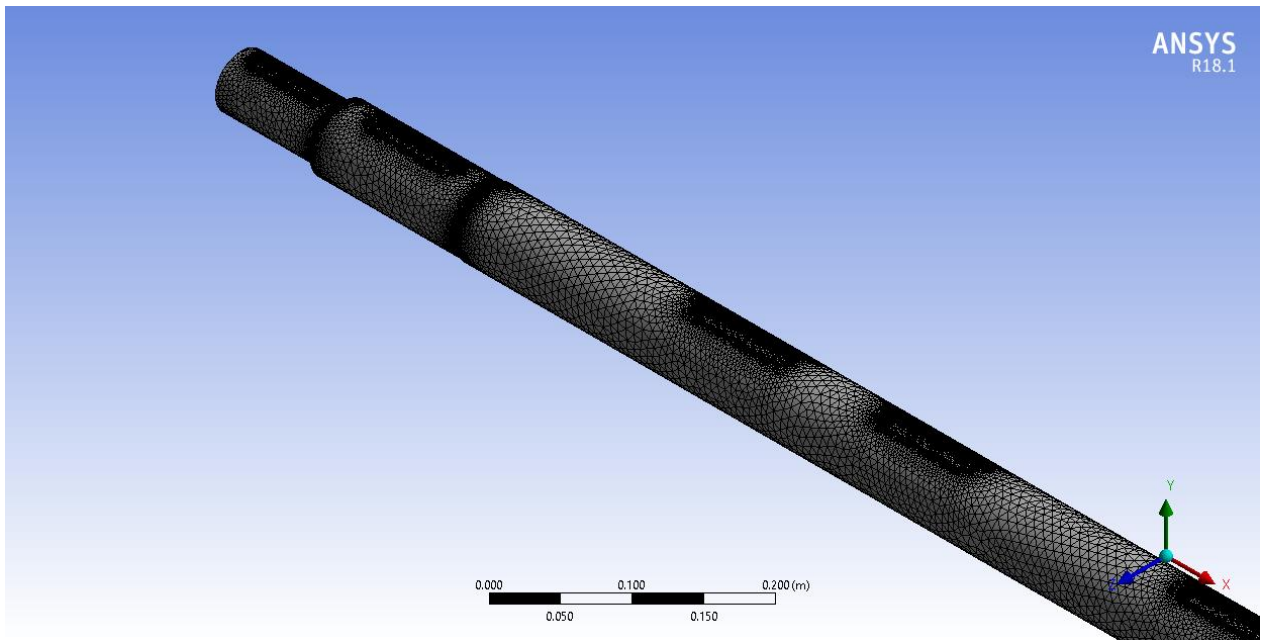


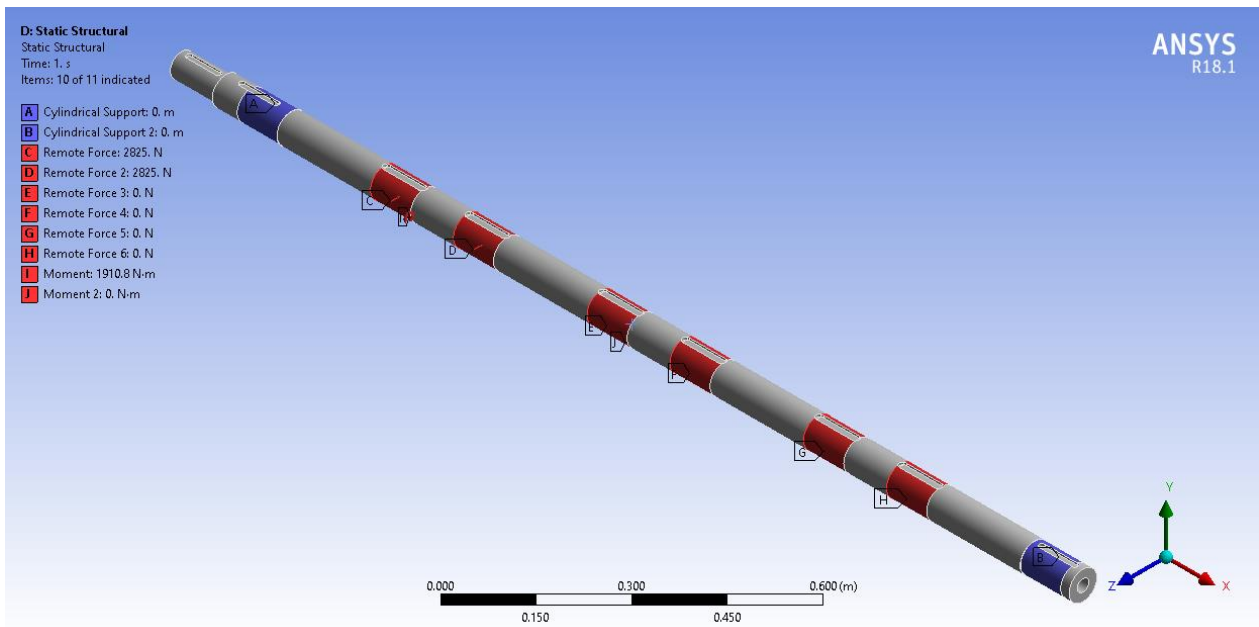
Fig. 50 Estudio de Fatiga en Ansys Workbench: Resultado de la malla configurada al eje.

Para el establecimiento de las cargas, dentro de la configuración del análisis, se establecieron tres pasos con el fin de simular el contacto de la ola con cada uno de los flotadores. De esta forma se puede observar el comportamiento del eje en cada uno de los pasos por separado.

El primer paso fue establecer los soportes que fijarían la flecha. El tipo de soporte seleccionado para este análisis fue un soporte cilíndrico, ya que éste simula la acción de un rodamiento sobre los puntos o caras elegidas de la pieza. Para completar este paso, se estableció el movimiento radial como *libre*.

Para el establecimiento de las cargas, se configuraron los valores de torsión y fuerza calculados en la solución analítica en cada una de las caras de contacto entre la flecha y los rodamientos de los flotadores. Es importante mencionar que las cargas fueron divididas en cada uno de los pasos establecidos en la configuración del análisis.

La configuración de las cargas quedó establecida como se muestran en la Fig. 50.



**Fig. 51** Esquema del posicionamiento de las cargas involucradas.

Para la etapa de procesamiento del estudio, se solicitaron los resultados correspondientes a la herramienta de fatiga de Workbench, así como resultados de esfuerzo equivalente de von Mises (esfuerzos combinados) y los factores de seguridad correspondientes para esfuerzo máximo y esfuerzo cortante máximo. Los resultados solicitados fueron los siguientes: *life* (número de ciclos), *damage* (daño) y *safety factor* (factor de seguridad de fatiga).

En la configuración de la herramienta de fatiga se estableció el método de esfuerzo-vida, debido a la configuración establecida en la configuración del material (curvas *S-N*); y el criterio de fallo por fatiga de Gerber, ya que es el que mayormente se utiliza para materiales dúctiles. También se configuró un tipo de carga variable con una relación de 1 - 0.6 como se realizó en el estudio analítico.

En la etapa de postproceso se analizaron los tres pasos, anteriormente establecidos en la etapa de preprocesamiento, con el fin de observar cómo se comportan los puntos de interés.

Paso 1: *resultados*.

Como se puede observar en la Fig. 51, el valor mínimo del factor de seguridad de fatiga es de 1.8152. Este resultado predice que no existirá falla de acuerdo a los esfuerzos cíclicos a los que fue sometido. Por lo tanto, también predice un número alto de ciclos de trabajo.

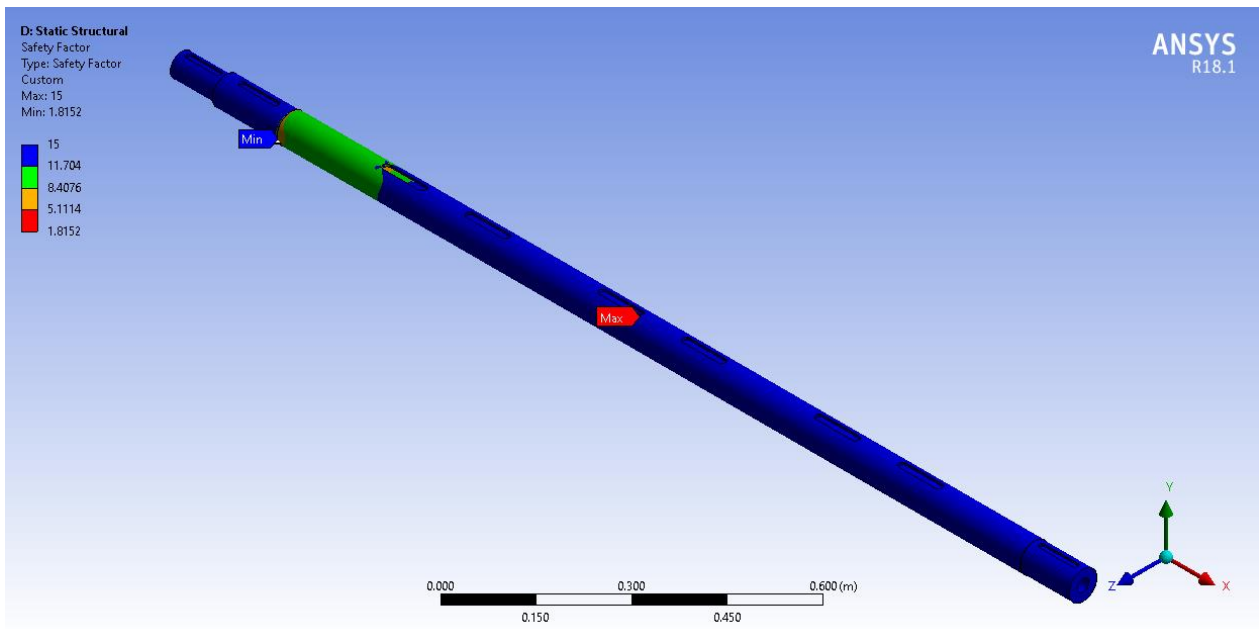


Fig. 52 Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Factor de Seguridad de Fatiga.

En la Fig. 52 se puede observar que el valor mínimo del factor de seguridad de fatiga, se encuentra en el hombro en donde se encuentra posicionado el cojinete. Es evidente que se produzca en ese lugar debido a la concentración de esfuerzos que se produce debido a la reducción del diámetro en esa área. Por supuesto, esto produce que los esfuerzos máximos se produzcan en dicha área, como se observa en la Fig. 53.

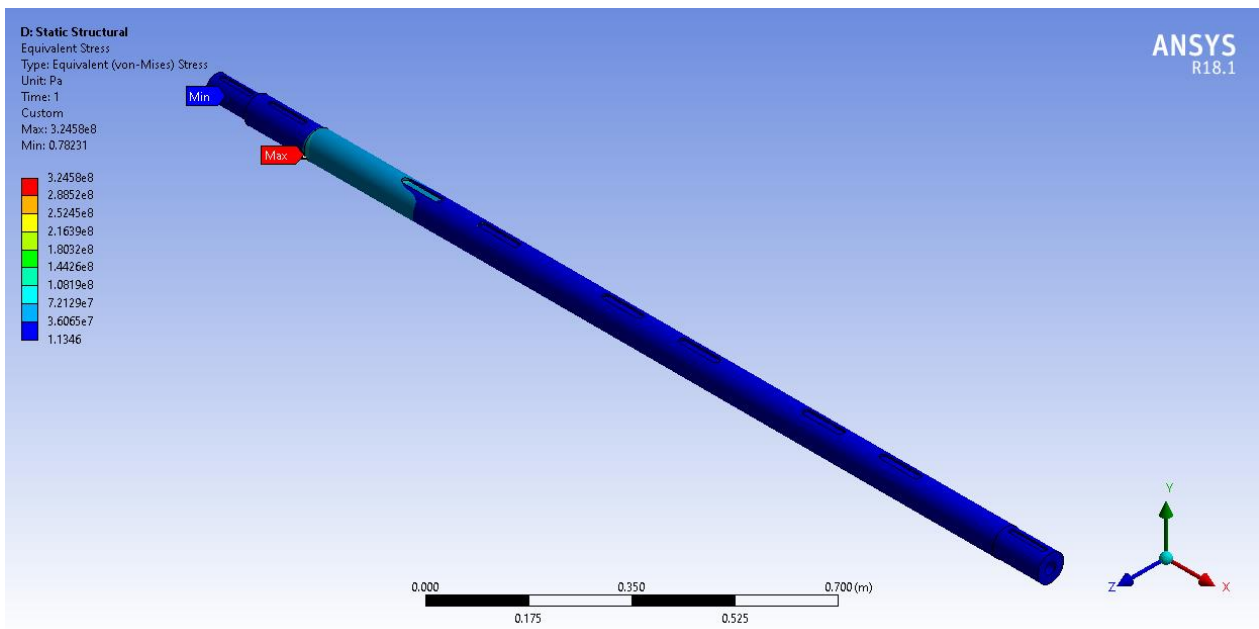
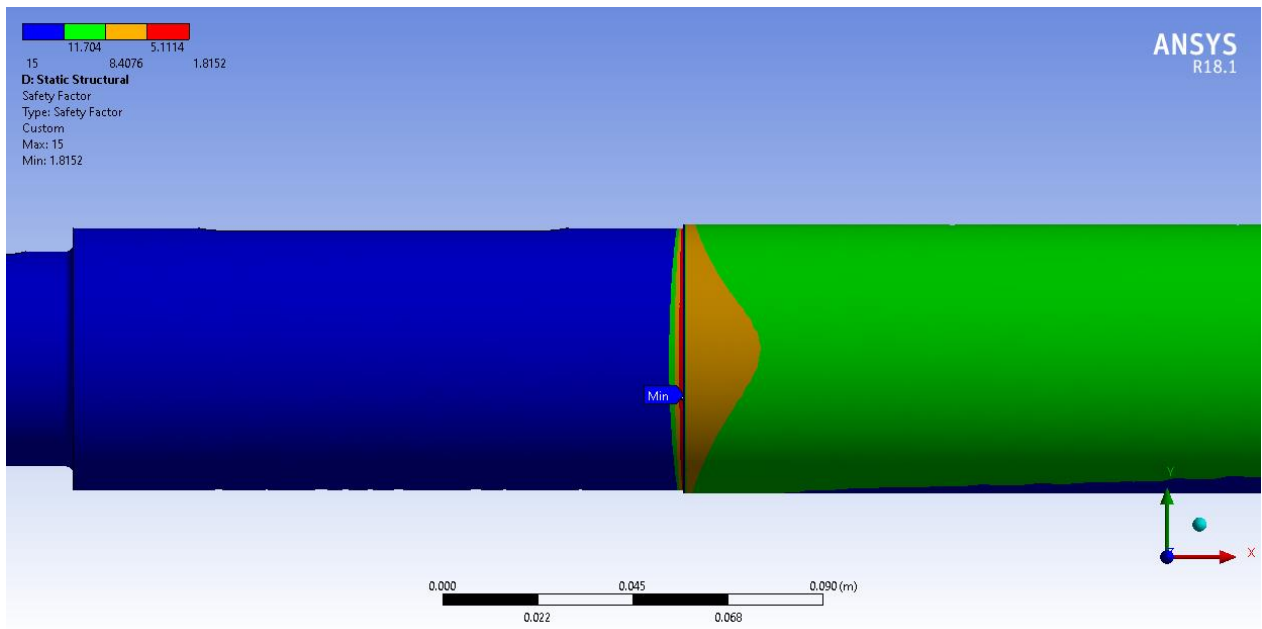


Fig. 53 Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises.





**Fig. 54** Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 1: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises. Sección del hombro de la flecha de transmisión.

*Paso 2: resultados.*

Al igual que en el paso anterior, el factor de seguridad de fatiga predice altos ciclos de trabajo. De igual forma, el valor mínimo, de 2.2604, se encuentra en los hombros en donde van anclados los cojinetes, como se aprecia en la Fig. 54.

Se puede apreciar que, aunque se encuentran en valores bastante aceptables, existe una concentración de esfuerzo debido a las reducciones de área en los cuñeros.

La Fig. 55 muestra la distribución de los esfuerzos producidos por las cargas debido a la interacción entre el flotador y el oleaje. De igual forma, la mayor concentración de esfuerzos se encuentra en los hombros.

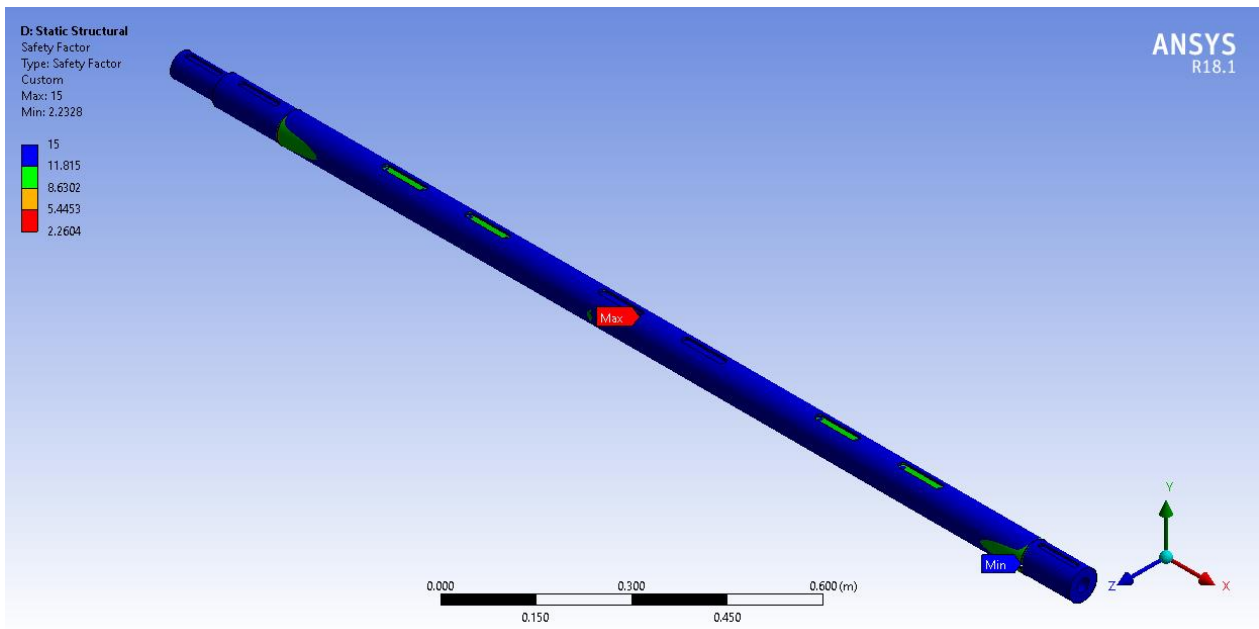


Fig. 56 Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 2: Factor de Seguridad de Fatiga.

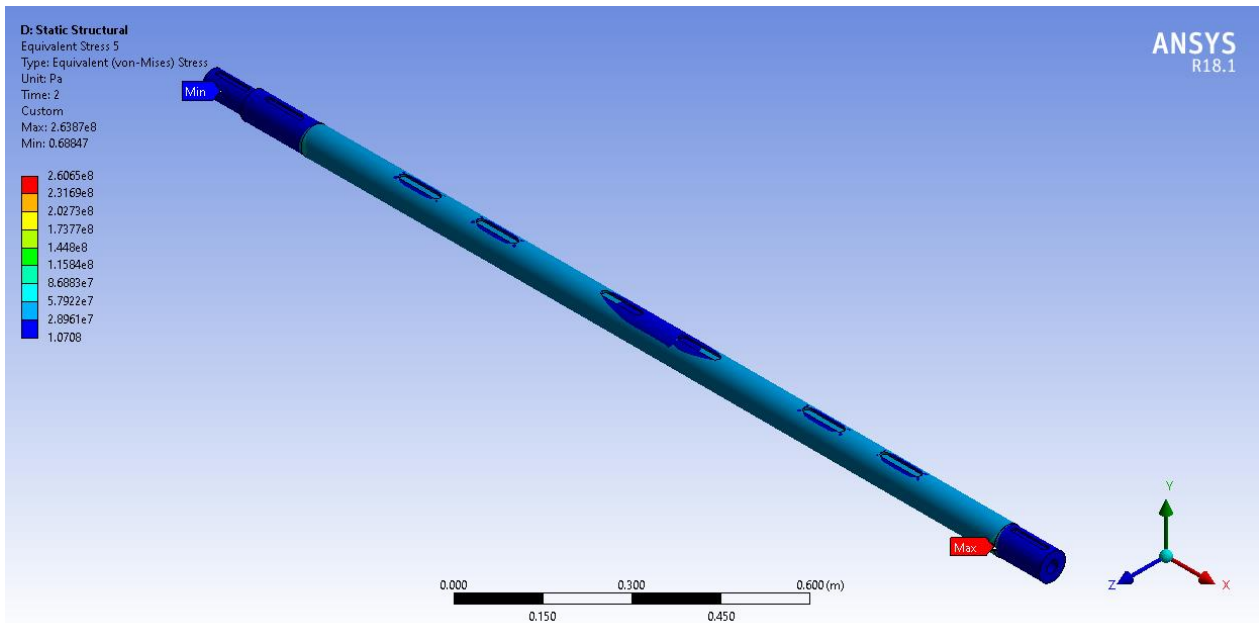
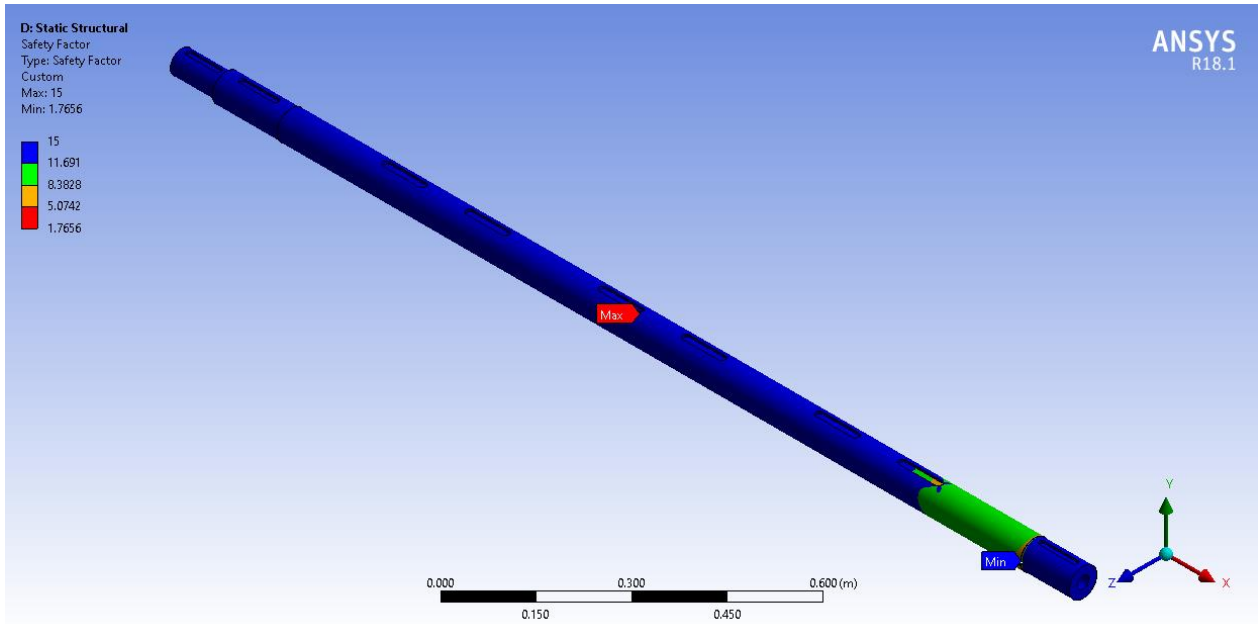


Fig. 55 Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 2: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises.

Paso 3: *resultados.*

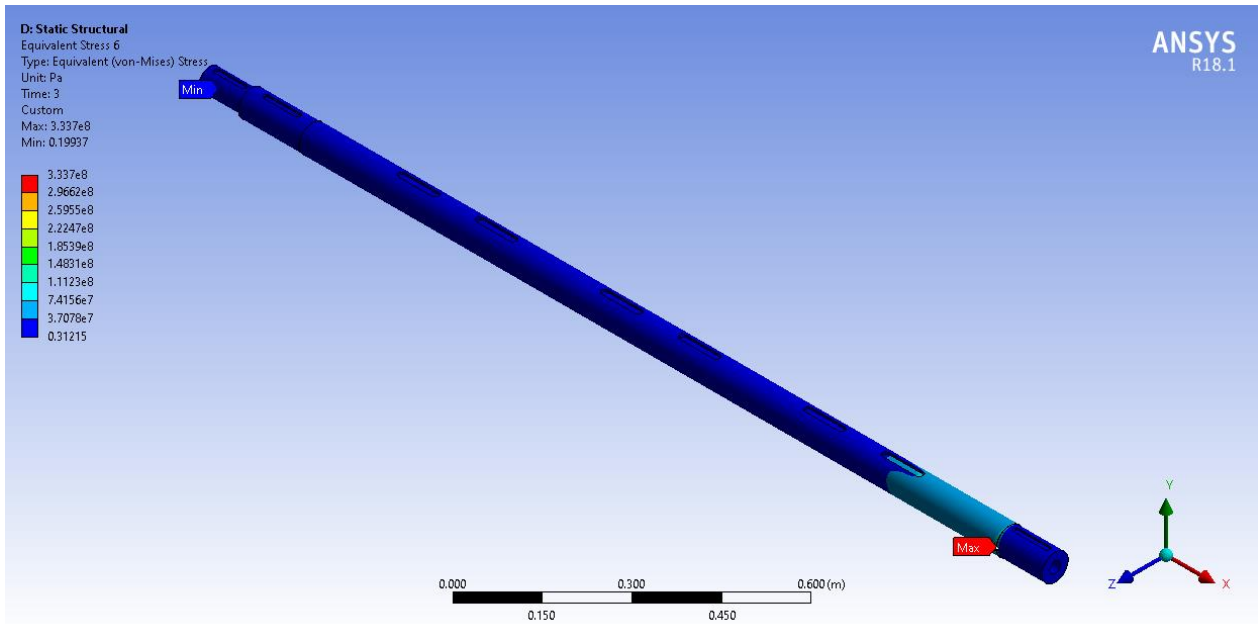
Al igual que en el paso 1, el valor mínimo del factor de seguridad de fatiga se encuentra en el hombro del eje, de forma opuesta. Con un valor de 1.7656, este se convierte en el valor mínimo de

todo el estudio como resultado de la interacción de las demás cargas sobre dicho hombro. En la Fig. 56 se puede observar lo anteriormente descrito.



**Fig. 57** Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 3: Factor de Seguridad de Fatiga.

El resultado anteriormente descrito puede entenderse ya que es en esta misma sección del eje en donde se producen los esfuerzos máximos, como se muestra en la Fig. 57.



**Fig. 58** Estudio de fatiga en Ansys Workbench - Paso 3: Resultados del esfuerzo equivalente de von Mises.

Debido a que los resultados del factor de seguridad de fatiga en diferentes puntos son mayores a uno, lo cual predice que no existirá una falla debido a los esfuerzos a los que está sometida la flecha de transmisión, los valores de vida presentan el valor máximo computado en la configuración de la curva *S-N*. Es decir,  $2.714 \times 10^5$ , como se puede observar en la Fig. 58.

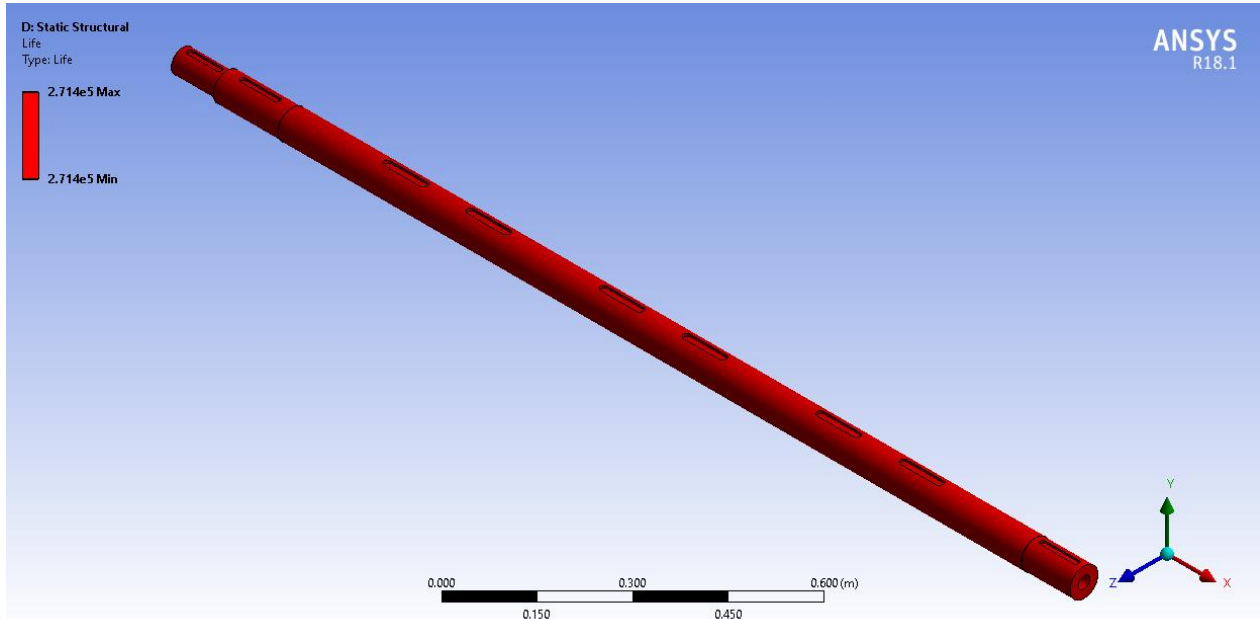


Fig. 59 Estudio de fatiga en Ansys Workbench: Vida (Número de ciclos de trabajo).

Con lo anteriormente establecido, es intuitivo predecir que el daño debido a la relación entre el diseño de vida y la vida disponible, es nulo. En la Fig. 59 se observan los resultados del daño en la flecha.

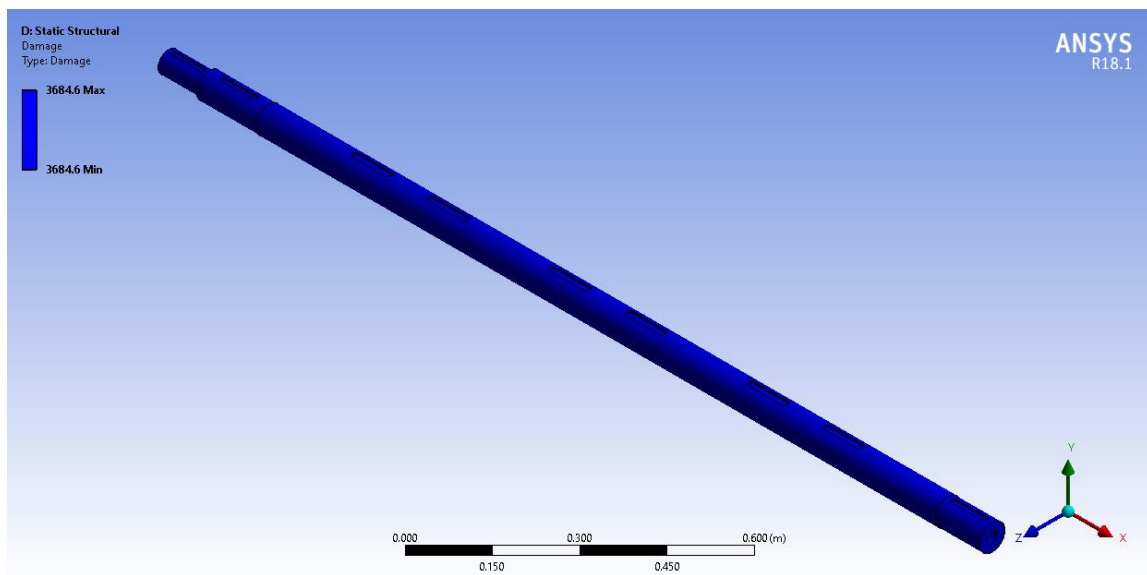


Fig. 60 Estudio de fatiga en Ansys Workbench: Daño.

### 3.2.6 Ensamblaje del convertidor undimotriz

El ensamble del dispositivo WEC es presentado en la Fig. 60. Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, el principio de asimilación energética consta en convertir el movimiento oscilatorio de las olas en un movimiento rotacional. Este movimiento rotacional genera un par de torsión que es transmitido por medio de una flecha de transmisión, sobre el cual se encuentran montados los sistemas de flotadores. Este eje es el medio de transmisión mecánica hacia el generador eléctrico al cual está acoplado por medio de un sistema de transmisión de bandas.

Los flotadores adoptan un perfil en forma de pera o, como tradicionalmente se le conoce, en forma de pato. El flotador consta de tres perforaciones que tienen funciones independientes; el primer orificio es el más importante, pues es el medio en el cuál será instalado todo el sistema de rotación del convertidor y por el cuál atravesará el eje para su acoplamiento entre este último y el flotador, como se observa en la Fig. 60.

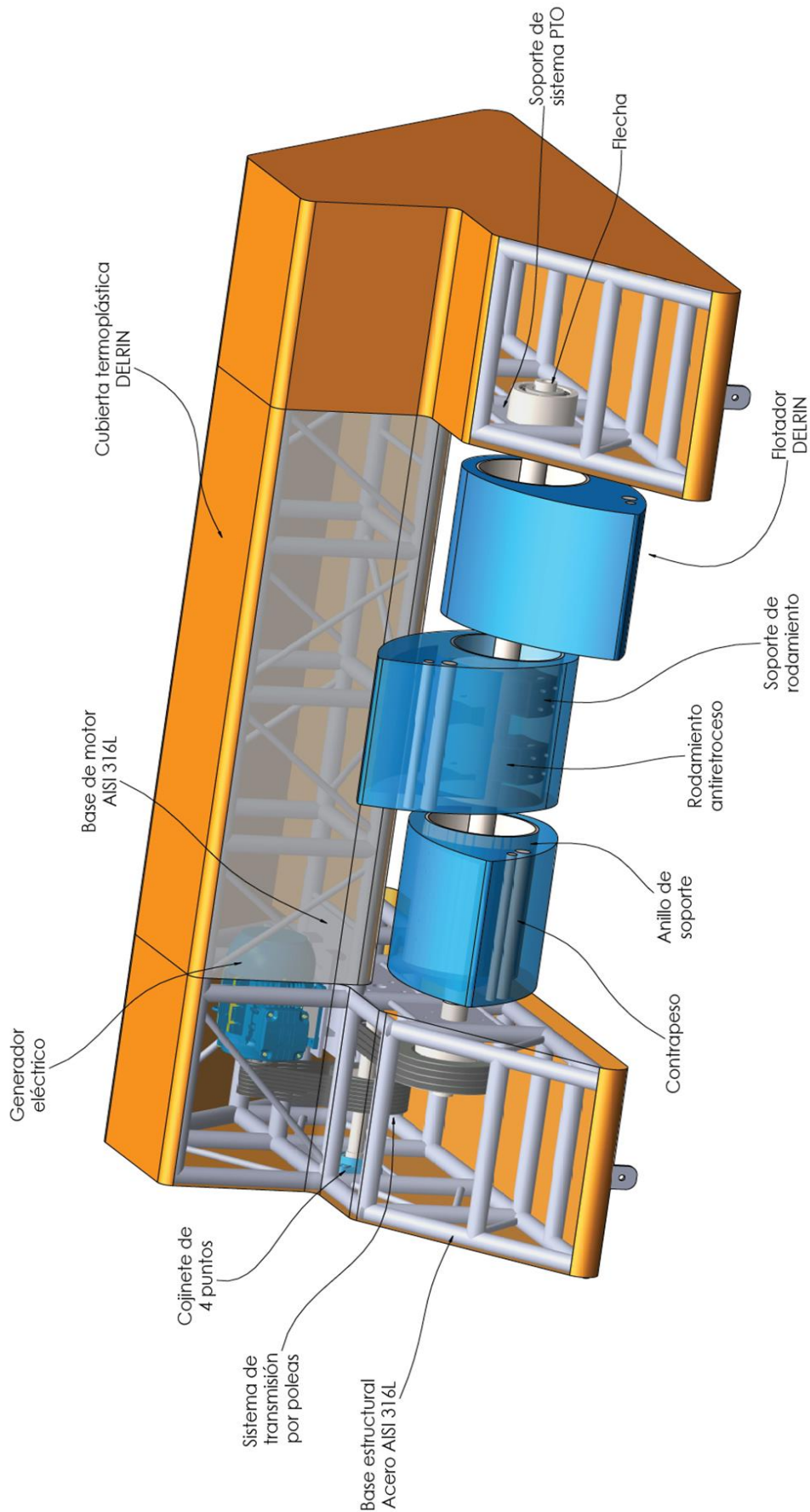


Fig. 61 Representación gráfica del ensamble del dispositivo WEC y la disposición de cada elemento que lo conforma.

El segundo y tercer orificio tienen como única función el alojamiento de dos barras de acero AISI 316L, que funcionan como contrapeso del flotador. De esta forma, las barras limitan el movimiento de rotación del flotador y permite el retorno del mismo a una posición inicial para la repetición del ciclo de trabajo, como se observa en la Fig. 61.

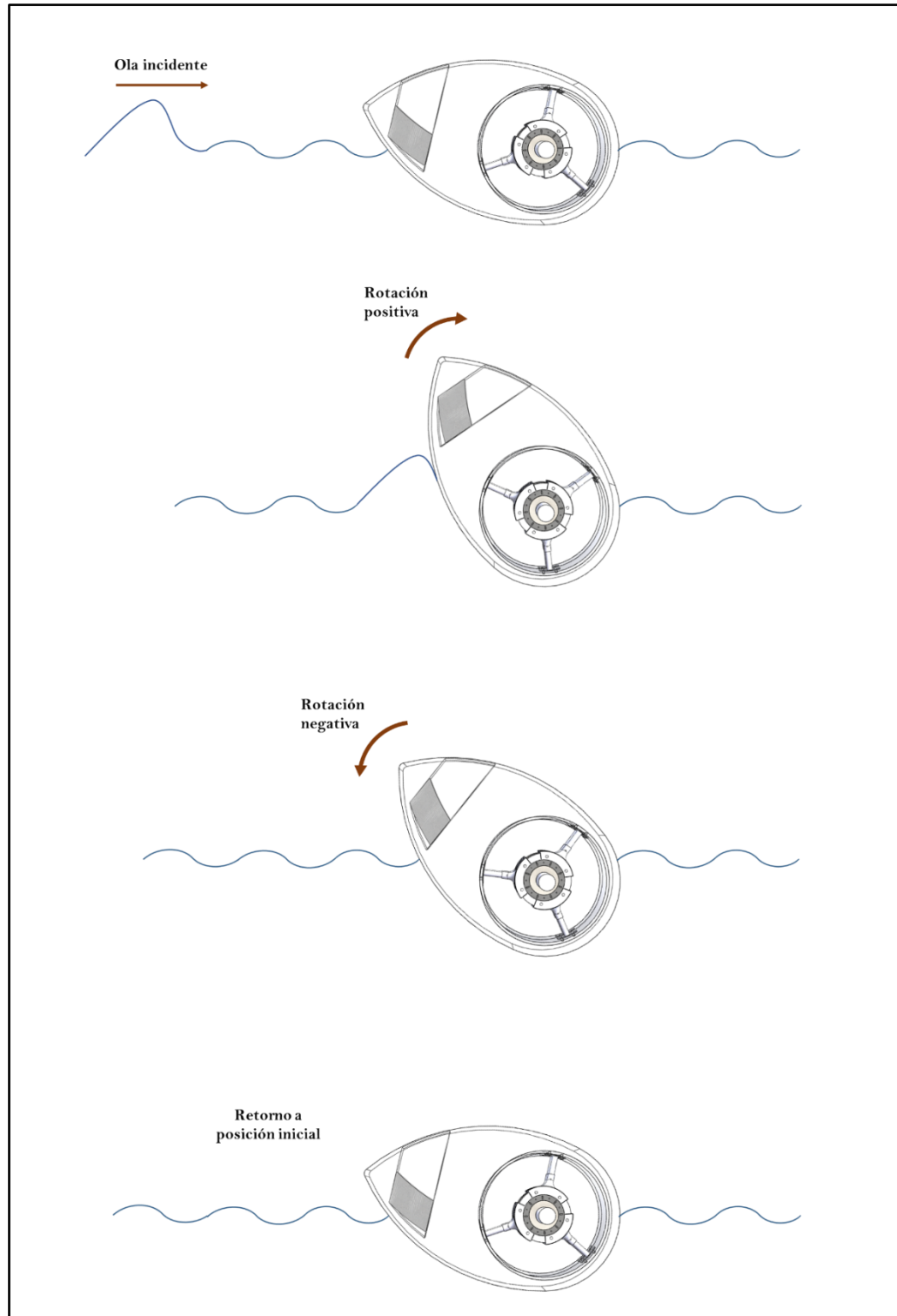


Fig. 62 Representación gráfica del ciclo de trabajo de un flotador.

El nuevo sistema de contrapeso previene posibles fallas debido a la entrada de agua en el orificio en donde se posicionaba el bloque de hormigón en el diseño anterior.

La base estructural sufrió cambios a lo largo de todo el proceso con el fin de que la interacción existente entre las olas incidentes y la estructura del convertidor no afectase de manera significativa la asimilación de energía undimotriz; además de cumplir con el propósito de contar con una estructura resistente.

La estructura de soporte del dispositivo WEC que sostiene a todo el sistema principal -eje de transmisión, rodamientos, sistema de flotadores y generador eléctrico- consiste en una armadura conformada por tubería DN 40 AISI 316L con una configuración del tipo rectangular de “N’s” o tipo Pratt. Como se puede observar en la Fig. 53, la base se compone de dos estructuras trapezoidales, en las cuales está montado el sistema de toma de potencia, que están conectadas entre sí por una estructura rectangular, que además aloja al generador eléctrico.

El material seleccionado para la construcción de la estructura de soporte es un acero AISI 316L. La razón de la elección de este material radica en su capacidad de resistencia a la corrosión por el contacto con ambientes marinos.

Para el recubrimiento de la estructura de soporte se propuso una cubierta de plástico resistente a la corrosión por contacto con ambientes marinos. El material elegido para el diseño de la cubierta es el termoplástico Delrin.



### 3.2.7 Modelo dinámico

El modelo dinámico del dispositivo WEC describe el movimiento del flotador con respecto a su aceleración debido a la interacción con las olas. A continuación, se detalla el proceso desarrollado para el modelado del sistema, basado en el método de Lagrange.

Siguiendo un método analítico, se supondrá al flotador reposando sobre la superficie del mar, sumergido a una profundidad  $h$ ; como se observa en la Fig. 63.

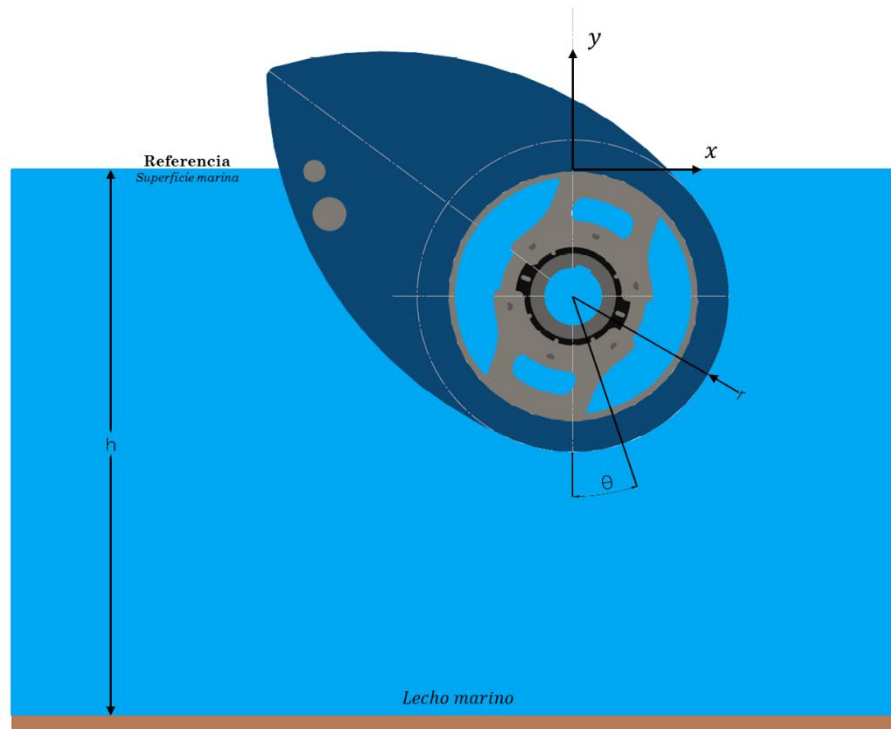


Fig. 63 Plano de la sección transversal del flotador del dispositivo WEC.

Suponiendo que el flotador puede desplazarse verticalmente, debido a la fuerza ejercida en la componente  $y$  o fuerza de sustentación  $F_s$  (también conocida como fuerza de flotación) ejercida por el contacto entre la superficie del mar y el flotador; y rotar sobre su propio eje, debido al par ejercido por la componente de fuerza en  $x$  producida por la ola incidente, entonces, se deduce lo siguiente.

Utilizando el método energético se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$T = \frac{1}{2}(m + m_c)\dot{y}^2 + \frac{1}{2}J\dot{\theta}^2 \quad \text{Ec. (5)}$$

La energía cinética, representada en la Ec. (5), se compone de dos términos. El primer término representa la traslación del flotador a lo largo del eje  $y$ , mientras que el segundo término representa la rotación del flotador en coordenadas polares. En donde  $m$  representa la masa del flotador,  $m_c$  es el coeficiente hidrodinámico de masa añadido debido a la inercia del agua que rodea al flotador;  $\dot{y}$  representa la velocidad en el eje  $y$ ;  $J$  es el momento de inercia del flotador, y  $\dot{\theta}$  la velocidad angular. La energía potencial se debe a la acción de resorte que ejerce el agua respecto al flotador, y se define en la Ec. (6)

$$U = \frac{1}{2} \rho A_v g (y + r\theta)^2 \quad \text{Ec. (6)}$$

En donde  $\rho$  es la densidad del medio fluido,  $A_v$  es el área variable de la sección transversal sumergida del flotador,  $g$  es la aceleración debido a la gravedad,  $y$  representa la traslación debido al fenómeno de flotación; y  $r\theta$  que representa el desplazamiento angular del flotador.

Para obtener las ecuaciones de movimiento se utilizará el método de Lagrange para un sistema libre, definido en la Ec. (7).

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{q}} \right) - \frac{\delta L}{\delta q} = 0 \quad \text{Ec. (7)}$$

Para proceder a resolver la Ec. (7) primero se definirá el *Lagrangiano* del sistema, definido en la Ec. (8), con los valores obtenidos anteriormente en la Ec. (5) y Ec. (6), como se muestra en la Ec. (9).

$$L = T - U \quad \text{Ec. (8)}$$

$$L = \frac{1}{2} (m + m_c) \dot{y}^2 + \frac{1}{2} J \dot{\theta}^2 - \frac{1}{2} \rho A_v g (y + r\theta)^2 \quad \text{Ec. (9)}$$

A continuación, se muestra el procedimiento desarrollado para resolver la Ec. (7) con los valores obtenidos en la Ec. (9)

Para las coordenadas cartesianas se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{y}} \right) - \frac{\delta L}{\delta y} = 0$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{y}} = (m + m_c) \dot{y}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{y}} \right) = (m + m_c) \dot{y}$$

$$\frac{\delta L}{\delta y} = \rho A_v g (y + r\theta)$$

Para las coordenadas polares se obtiene:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) - \frac{\delta L}{\delta \theta} = 0$$

$$\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} = J \dot{\theta}$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = J \ddot{\theta}$$

$$\frac{\delta L}{\delta \theta} = \rho A_v g (y + r\theta) \cdot r$$

Entonces, la primera ecuación del modelo, la cual describe el movimiento traslacional del flotador, resulta en la Ec. (10). Mientras que la segunda ecuación describe el movimiento rotacional del flotador, y se define en la Ec. (11)

$$(m + m_c) \dot{y} + \rho A_v g (y + r\theta) = 0 \quad \text{Ec. (10)}$$

$$J \ddot{\theta} + \rho A_v g r (y + r\theta) = 0 \quad \text{Ec. (11)}$$

Tomando en cuenta que algunos de las variables son dependientes del tiempo, entonces las Ec. (10) y (11) pueden definirse de la siguiente forma.

$$(m + m_c) \ddot{y}(t) + \rho g A(t) [y(t) + r(t)\theta(t)] = 0 \quad \text{Ec. (12)}$$

$$J \ddot{\theta}(t) + \rho g A(t) r(t) [y(t) + r(t)\theta(t)] = 0 \quad \text{Ec. (13)}$$

Es importante remarcar que el modelo presentado en las Ec. (12) y Ec. (13), no contempla fuerzas de excitación pues se analizó como un sistema libre. Sin embargo, fuerzas de excitación pueden ser añadidas al sistema de acuerdo a Falcao [13] y Fontes [31].

Se describen dos fuerzas de interacción en el sistema. La primera reacción,  $f_{PTO}$ , se debe a la componente vertical de fuerza ejercida por el sistema PTO; y la segunda,  $f_w$ , representa la fuerza ejercida por la ola incidente. Esta segunda reacción puede ser descompuesta en dos fuerzas hidrodinámicas que actúan sobre la superficie del flotador,  $f_e$  que representa la fuerza de excitación

de la ola que actúa sobre el flotador, y  $f_r$  que es la fuerza de radiación debido a la transferencia de energía del sistema PTO flotando hacia las olas que son emanadas por el flotador.

La fuerza de radiación [Pedro Jorge Borges Fontes] puede ser representada de la siguiente forma

$$f_r = -R\dot{y} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde  $R$  es el coeficiente de radiación, y  $\dot{y}$  es la velocidad del flotador.

Para mantener el modelo simple, solamente se contemplan olas monocromáticas regulares o sinusoidales. Por lo que, la fuerza de excitación puede expresarse con en la Ec. (15).

$$f_e = |f_e| \cdot \cos(\omega t) \quad \text{Ec. (15)}$$

En donde  $\omega$  representa la velocidad angular de la ola incidente y  $t$  el periodo.

Por otro lado, en 1980 se desarrolló un modelo generalizado basado en el dominio del tiempo para dispositivos WEC oscilantes. Este modelo fue desarrollado por Jefferys [13] basado en un estudio sobre la hidrodinámica de barcos por Cummins [32,33]. En la Ec. (15) se muestra el modelo propuesto.

$$(I + A_\infty)\ddot{\theta}(t) + C\theta(t) + \int_{-\infty}^t L(t - \tau)\dot{\theta}(\tau)d\tau = f_d(t) + f_{PTO} \quad \text{Ec. (16)}$$

donde  $I$  representa el momento de inercia del flotador,  $A_\infty$  es el momento de inercia añadido a una frecuencia infinita,  $C$  es el coeficiente de restablecimiento hidrostático del resorte, y  $f_d$  es la componente vertical de excitación de la ola. En este caso, la fuerza de radiación  $L(t)$  es representada por la integral de convolución, la cual muestra la dependencia del movimiento anterior del cuerpo flotante. En la Ec. (16) se muestra la representación de esta fuerza de radiación.

$$L(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{B(\omega)}{\omega} \sin(\omega t) d\omega \quad \text{Ec. (17)}$$

donde  $B$  representa el coeficiente de amortiguamiento de radiación, resultante del amortiguamiento del cuerpo flotante debido a la transferencia de energía hacia las olas irradiadas fuera de éste.

Este modelo representa una aproximación más exacta para describir la dinámica de este tipo de convertidores undimotrices. Sin embargo, la solución no se desarrolla en el presente trabajo por la falta de datos necesarios y que el trabajo se limita exclusivamente al estudio estático del sistema.

# CONCLUSIÓN

La oportunidad de explorar nuevas tecnologías que conduzcan al aprovechamiento de energías renovables, como lo son los convertidores de energía undimotriz, abre camino para conocer los avances tecnológicos que se han realizado para el desarrollo de diferentes tipos de mecanismos nuevos y prácticos, que adoptan funciones especializadas de acuerdo a la tarea principal a desarrollar. En este caso, generación eléctrica.

El diseño de un dispositivo WEC comprende un estudio enorme en donde se involucran muchas ramas de la mecánica y la electrónica. Por supuesto, esto depende de algunos factores importantes a considerar como el principio de extracción energética y su conversión en electricidad; las condiciones climáticas y ambientales del ecosistema en donde se planea utilizar; potencial undimotriz del lugar en cuestión; entre otros.

Para el desarrollo del dispositivo WEC, diseñado en el presente trabajo, fue importante seguir una metodología de diseño preestablecida con el fin de conocer las necesidades que querían ser cubiertas, y realizar un análisis de las posibles soluciones propuestas. Esto ayudó a definir un diseño conceptual del prototipo que se quería diseñar y que sufrió modificaciones a lo largo de todo el trabajo con el fin de corregir o mejorar ciertos aspectos que no eran fácilmente visibles en un principio.

Por supuesto, la documentación sobre las tecnologías existentes en otros países, conformó una gran parte del estudio debido a que la energía undimotriz es una energía renovable relativamente nueva en México. Por lo que la información y recursos, para su estudio, son limitados.

Sin embargo, el presente trabajo funge como parte de una base para el estudio de tecnologías concernientes a la energía undimotriz, y que da paso a continuar y/o desarrollar nuevas líneas de trabajo que puedan mejorar o incluso innovar aspectos importantes del presente documento.

Además, el estudio de este tipo de tecnologías marca un precedente para el desarrollo paulatino de tecnología mexicana que no solo compita con otros dispositivos desarrollados a nivel internacional, sino también que sea tecnología que sea aprovechada para la generación y consumo de energía eléctrica en el país.

# REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía. (2017). Gobierno Federal. Recuperado el noviembre de 2018, de [www.gob.mx/sener:https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2016\\_\\_2\\_.pdf](https://www.gob.mx/sener:https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/288692/Balance_Nacional_de_Energ_a_2016__2_.pdf)
- [2] Noticieros Televisa. (26 de marzo de 2018). Grupo Televisa. Recuperado el noviembre de 2018, de Noticieros Televisa: <https://noticieros.televisa.com/ultimas-noticias/mexico-lugar-14-a-nivel-mundial-en-emision-de-gases-contaminantes/>
- [3] Sener. (2012). Gobierno Federal. Recuperado el noviembre de 2018, de [www.gob.com/sener:https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva\\_de\\_Energ\\_as\\_Renovables\\_2012-2026.pdf](https://www.gob.com/sener:https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62954/Prospectiva_de_Energ_as_Renovables_2012-2026.pdf)
- [4] Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. (2009). Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN S.A.
- [5] Huckerby, J., Lee, K., Musial, W., Pontes, T., & Torres-Martinez, J. (2012). Ocean Energy. En O. Edenhofer, R. Pichs Madruga, & Y. Sokona, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (págs. 503-505). New York: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.
- [6] Quantifying the global wave power resource
- [7] Influence of wave breaking on the hydrodynamics of wave energy converters: A review
- [8] <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/oceanos-y-mares-de-mexico>
- [9] Dynamics and control of ocean wave energy converters
- [10] Secretaría de Energía. (2018). Gobierno de México. Obtenido de Prospectiva de Energías Renovables 2018-2032: [https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER\\_18\\_32\\_F.pdf](https://base.energia.gob.mx/Prospectivas18-32/PER_18_32_F.pdf)
- [11] Instituto Mexicano del Petróleo. (Diciembre de 2017). Gobierno de México. Obtenido de CARTERA DE NECESIDADES DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279711/NT\\_OCEANO\\_VERSION\\_251017\\_\\_rev1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/279711/NT_OCEANO_VERSION_251017__rev1.pdf)
- [12] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez de Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2-11.
- [13] O. Falcao, A. F. (2009). Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 8-13.



- [14] Al-Habaibeh, A., Su, D., McCague, J., & Knight, A. (25 de enero de 2010). An innovative approach for energy generation from waves. *Energy Conversion and Management*, 1-3.
- [15] Diseño y modelado de mecanismo para el aprovechamiento de la energía undimotriz en México.
- [16] Muetze, A., & G. Vining, J. (2006). *Ocean Wave Energy Conversion - A Survey. Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society)*.
- [17] Rusu, E., & Onea, F. (2018). A review of the technologies for wave energy extraction. *Clean Energy*, 2(1), 12-14.
- [18] Sheng, W., Alcorn, R., & Lewis, T. (2014). Physical modelling of wave energy converters. *Ocean Engineering*, 29-36.
- [19] López, I., Andreu, J., Ceballos, S., Martínez de Alegría, I., & Kortabarria, I. (2013). Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 413-434.
- [20] A. G. Mercado, E. L. Ramírez, L. M. Palacios Pineda y R. Campos Amezcua, *Memorias del Congreso de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, p. 765-772, Mazatlán, Sinaloa (2019)
- [21] M.A. Mustapa, O. Y.-K. (2017). Wave energy device and breakwater integration: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 43-58.
- [22] *New Perspectives on Wave Energy Converter Control*, 10-25, The University of Edinburgh, Escocia (2019).
- [23] W. Webber, J. (2018). Wave energy. *Encyclopedia of Maritime and Offshore Engineering*, 6, 3565-3568.
- [24] E. Harris, R., Johanning, L., & Wolfram, J. (2005). Mooring systems for wave energy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 4(220), 159-168.
- [25] Det Norske Veritas, *Offshore Standard DNV\_OS\_E301, Position Mooring*, Norway (2001).
- [26] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures, API RECOMMENDED PRACTICE 2SK*, 2nd Edition (1996)
- [27] Cross, N. (2000). *Engineering design methods: strategies for product design*. Chichester, Inglaterra: JOHN WILEY & SONS, LTD.

- [28] Estefen, S. F., Castello, X., Lourenco, M. I., & Rossetto, R. M. (2010). Design Analyses Applied to a Hyperbaric Wave Energy Converter. PRADS - INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PRACTICAL DESIGN OF SHIPS AND OTHER FLOATING STRUCTURES (págs. 1-5). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ – Ocean Engineering Department.
- [29] Sjökvist, L., & Göteman, M. (2018). Peak Forces on a Point Absorbing Wave Energy Converter Impacted by Tsunami Waves. *Renewable Energy*.
- [30] Martin Sprocket & Gear, Inc. (2013). Obtenido de EL GRAN CATÁLOGO 4000: <http://moher.mx/catalogos/13.pdf>
- [31] Borges Fontes, P. J., & dos Santos Pereira M., C. M. (2014). Design and analysis of buoy geometries for a wave energy converter. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 3-4.
- [32] Cummins, W. E. (1962). The impulse response function and ship motions. *Symposium on Ship Theory at the Institut für Schiffbau der Universität*, (págs. 101-109). Hamburgo.
- [33] Wu, J., Yao, Y., Zhou, L., & Göteman, M. (2017). Latching and Declutching Control of the Solo Duck Wave-Energy Converter with Different Load Types. *Energies*, 3-4.

# ANEXO

En esta sección se mostrarán las tablas utilizadas para la selección del sistema de transmisión por bandas.

<b>TABLA 5 — FACTORES DE SERVICIO</b>														
<p><b>EL FACTOR DE SERVICIO CORRECTO SE DETERMINA POR:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La extensión y frecuencia de las cargas pico.</li> <li>2. El número de horas de operación al año, divididas en un promedio de horas al día de servicio continuo.</li> <li>3. La categoría de servicio apropiada (intermitente, normal o continuo). Seleccione aquella que más se aproxime a las condiciones de su aplicación.</li> </ol>	<p><b>SERVICIO INTERMITENTE — FACTOR DE SERVICIO 1.0 A 1.5</b>                      a - Trabajo Ligero — No más de 6 horas al día.                      b - No debe exceder la carga promedio.</p> <p><b>SERVICIO NORMAL — FACTOR DE 1.1 A 1.6</b>                      a - Servicio diario de 6 a 16 horas al día.                      b - Donde el arranque ocasional o las cargas pico no excedan el 200% de la carga total.</p> <p><b>SERVICIO CONTINUO — FACTOR DE 1.2 A 1.8</b>                      a - Donde el arranque o la carga pico exceda el 200% de la carga total o donde el arranque o las cargas pico y sobrecargas ocurran frecuentemente.                      b - Servicio continuo de 16 a 24 horas al día.</p>													
<b>FACTORES DE SERVICIOS TÍPICOS</b>														
TIPOS DE MÁQUINAS DE TRANSMISIÓN	TIPOS DE UNIDADES MOTRICES													
<p>Los tipos de máquinas de manejo que se enlistan a continuación son solamente ejemplos representativos. Seleccione de la lista la categoría que más se aproxime a su aplicación.</p> <p><b>SI SE UTILIZAN RUEDAS LOCAS, AÑADA LO SIGUIENTE AL FACTOR DE SERVICIO:</b></p> <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="padding: 2px;">Rueda Loca en lado flojo (dentro)</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">Ninguno</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Rueda Loca en lado flojo (afuera)</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0.1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Rueda Loca en lado apretado (dentro)</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0.1</td> </tr> <tr> <td style="padding: 2px;">Rueda Loca en lado apretado (afuera)</td> <td style="padding: 2px; text-align: right;">0.2</td> </tr> </table>	Rueda Loca en lado flojo (dentro)	Ninguno	Rueda Loca en lado flojo (afuera)	0.1	Rueda Loca en lado apretado (dentro)	0.1	Rueda Loca en lado apretado (afuera)	0.2	<p><b>MOTORES ELÉCTRICOS</b>                      AC Torque Normal                      Jaula de Ardilla y Sincrono                      AC Fase Dividida                      DC Devanado Compuesto  <b>Motors de Combustión Interna</b></p>			<p><b>MOTORES ELÉCTRICOS</b>                      AC Alto Torque                      AC Hi-Fase Dividida                      AC Repulsión-Inducción                      AC Monofásico Devanado en Serie                      AC Anillo de Deslizamiento                      DC Devanado Compuesto</p>		
Rueda Loca en lado flojo (dentro)	Ninguno													
Rueda Loca en lado flojo (afuera)	0.1													
Rueda Loca en lado apretado (dentro)	0.1													
Rueda Loca en lado apretado (afuera)	0.2													
	SERVICIO INTERMEDIO	SERVICIO NORMAL	SERVICIO CONTINUO	SERVICIO INTERMEDIO	SERVICIO NORMAL	SERVICIO CONTINUO								
Agitadores para Líquidos Sopladores y Aspiradoras Bombas Centrifugas y Compresoras 1.0 Ventiladores de hasta 10 Caballos de Fuerza Transportadores de Trabajo Ligero	1.0	1.1	1.2	1.1	1.2	1.3								
Transportadores de Banda para Arena, Grano, etc. Amasadora Ventiladores de más de 10 Caballos de Fuerza Generadores Ejes de Línea Maquinaria de Lavandería Máquinas-Herramientas Taladros-Prensas-Cortadores Maquinaria de imprenta Bombas Rotatorias de Desplazamiento Positivo Cribas Giratorias y Vibratorias	1.1	1.2	1.3	1.2	1.3	1.4								
Maquinaria para Ladrillos Elevadores de Cangilones Excitadores Compresores de Pistones Transportadores (Rastras, Helicoidales, Tablillas) Molinos de Martillos Hidropulper Bombas de Pistones Sopladores de Desplazamiento Positivo Pulverizadores Maquinaria para Molinos de Sierra y Trabajos en Madera Maquinaria Textil	1.2	1.3	1.4	1.4	1.5	1.6								
Quebradoras (Giratorias-Mordaza-Rodillos) Molinos (Bolas- Barras-Rodillos) Malacates Calandria — Extrusoras — Molinos de Hule	1.3	1.4	1.5	1.5	1.6	1.8								
Equipo con Ahogador	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0								

TABLA 7 — Tabla de Selección para Bandas Convencionales

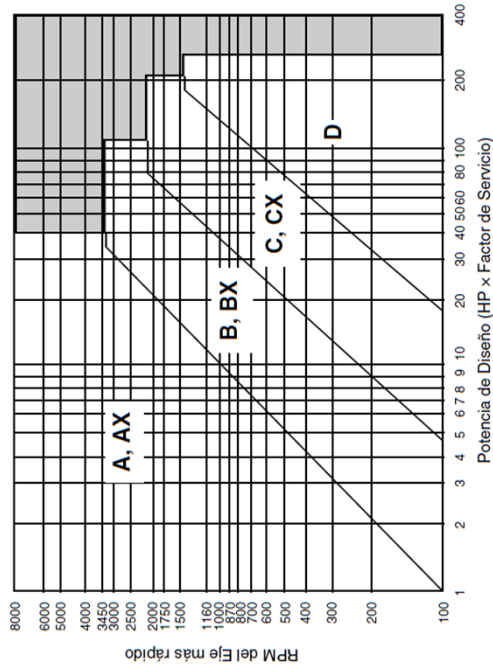
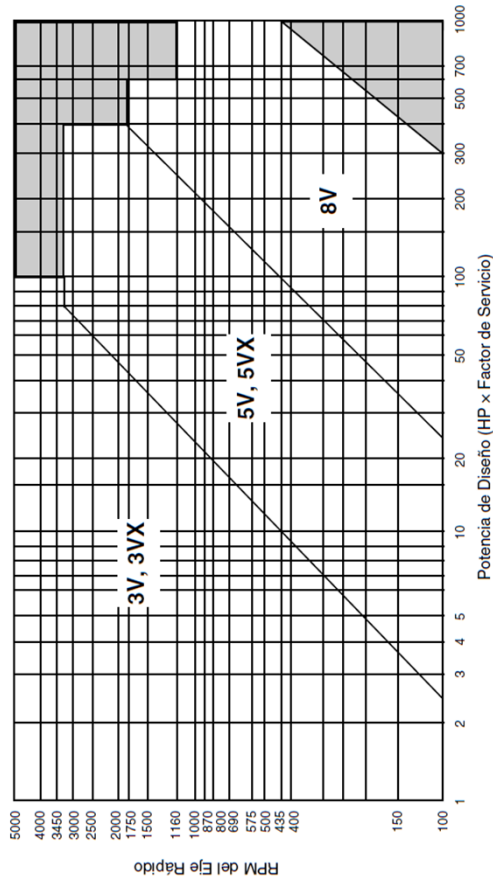


TABLA 6 — Tabla de Selección para Bandas de Alta Capacidad



Si la aplicación cae en el área sombreada Consulte a *Mesta*.

**Tabla 9 — Diámetros de Poleas en Existencia**

<b>A</b>		<b>B</b>		<b>C</b>		<b>D</b>		<b>3V</b>		<b>5V</b>		<b>8V</b>	
Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso	Diám. Exterior	Diám. de Paso
3.25	3.0	3.75	3.4	5.4	5.0	12.6	12.0	2.20	2.15	4.40	4.30	12.5	12.3
3.45	3.2	3.95	3.6	5.9	5.5	13.6	13.0	2.35	2.30	4.65	4.55	13.2	13.0
3.65	3.4	4.15	3.8	6.4	6.0	14.1	13.5	2.50	2.45	4.90	4.80	14.0	13.8
3.85	3.6	4.35	4.0	7.4	7.0	14.6	14.0	2.65	2.60	5.20	5.10	15.0	14.8
4.05	3.8	4.55	4.2	7.9	7.5	15.1	14.5	2.80	2.75	5.50	5.40	16.0	15.8
4.25	4.0	4.75	4.4	8.4	8.0	15.6	15.0	3.00	2.95	5.90	5.80	17.0	16.8
4.45	4.2	4.95	4.6	8.9	8.5	16.1	15.5	3.15	3.10	6.30	6.20	18.0	17.8
4.65	4.4	5.15	4.8	9.4	9.0	16.6	16.0	3.35	3.30	6.70	6.60	19.0	18.8
4.85	4.6	5.35	5.0	9.9	9.5	18.6	18.0	3.65	3.60	7.10	7.00	20.0	19.8
5.05	4.8	5.55	5.2	10.4	10.0	20.6	20.0	4.12	4.07	7.50	7.40	21.2	21.0
5.25	5.0	5.75	5.4	10.9	10.5	22.6	22.0	4.50	4.45	8.00	7.90	22.4	22.2
5.45	5.2	5.95	5.6	11.4	11.0	27.6	27.0	4.75	4.70	8.50	8.40	24.8	24.6
5.65	5.4	6.15	5.8	12.4	12.0	33.6	33.0	5.00	4.95	9.00	8.90	30.0	29.8
5.85	5.6	6.35	6.0	13.4	13.0	40.6	40.0	5.30	5.25	9.25	9.15	35.5	35.3
6.05	5.8	6.55	6.2	14.4	14.0	48.6	48.0	5.60	5.55	9.75	9.65	40.0	39.8
6.25	6.0	6.75	6.4	16.4	16.0	58.6	58.0	6.00	5.95	10.30	10.20	44.5	44.3
6.45	6.2	6.95	6.6	18.4	18.0			6.50	6.45	10.90	10.80	53.0	52.8
6.65	6.4	7.15	6.8	20.4	20.0			6.90	6.85	11.30	11.20	63.0	62.8
6.85	6.6	7.35	7.0	24.4	24.0			8.00	7.95	11.80	11.70	71.0	70.8
7.25	7.0	7.75	7.4	27.4	27.0			10.60	10.55	12.50	12.40	95.0	94.8
7.85	7.6	8.35	8.0	30.4	30.0			14.00	13.95	13.20	13.10		
8.45	8.2	8.95	8.6	36.4	36.0			19.00	18.95	14.00	13.90		
9.25	9.0	9.75	9.4	44.4	44.0			25.00	24.95	15.00	14.90		
10.85	10.6	11.35	11.0	50.4	50.0			33.50	33.45	16.00	15.90		
12.25	12.0	12.75	12.4							18.70	18.60		
13.45	13.2	13.95	13.6							21.20	21.10		
15.25	15.0	15.75	15.4							23.60	23.50		
15.85	15.6	16.35	16.0							28.00	27.90		
18.25	18.0	18.75	18.4							31.50	31.40		
19.85	19.6	20.35	20.0							37.50	37.40		
24.85	24.6	25.35	25.0							50.00	49.90		
29.85	29.6	30.35	30.0										
37.85	37.6	38.35	38.0										

Los diámetros indicados arriba de las líneas gruesas son los recomendados para las poleas motrices.



**Tabla 10 — Largo Exterior de Banda Efectivo y Factores de Corrección**

A			B			C			D			3V			5V			8V		
No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.	No. de Banda	Largo Efectivo	Factor de Correc.
A 26	28.1	0.81	B 35	37.9	0.81	C 51	55.2	0.80	D 120	125.2	.86	3VX250	25.0	0.83	5VX 500	50.0	0.85	8V1000	100.0	0.87
A 31	33.1	0.84	B 38	40.9	0.83	C 60	64.2	0.82	D 128	133.2	0.87	3VX 265	26.5	0.84	5VX 530	53.0	0.86	8V1060	106.0	0.88
A 35	37.1	0.87	B 42	44.9	0.85	C 68	72.2	0.85	D144	149.2	0.90	3VX 280	28.0	0.85	5VX 560	56.0	0.87	8V1120	112.0	0.88
A 38	40.1	0.88	B 46	48.9	0.87	C 75	79.2	0.87	D 158	163.2	0.92	3VX 300	30.0	0.86	5VX 600	60.0	0.88	8V1180	118.0	0.89
A 42	44.1	0.90	B 51	53.9	0.89	C 81	85.2	0.89	D173	178.2	0.93	3VX 315	31.5	0.87	5VX 630	63.0	0.89	8V1250	125.0	0.90
A 46	48.1	0.92	B 55	57.9	0.90	C 85	89.2	0.90	D180	185.2	0.94	3VX 335	33.5	0.88	5VX 670	67.0	0.90	8V1320	132.0	0.91
A 51	53.1	0.94	B 60	62.9	0.92	C 90	94.2	0.91	D195	200.2	0.96	3VX 355	35.5	0.89	5VX710	71.0	0.91	8V1400	140.0	0.92
A 55	55.1	0.96	B 68	70.9	0.95	C 96	100.2	0.92	D210	212.7	0.96	3VX 375	37.5	0.90	5VX 750	75.0	0.92	8V1500	150.0	0.93
A 60	62.1	0.98	B 75	77.9	0.97	C105	109.2	0.94	D240	242.7	1.00	3VX 400	40.0	0.92	5VX 800	80.0	0.93	8V1600	160.0	0.94
A 68	70.1	1.00	B 81	83.9	0.98	C112	116.2	0.95	D270	272.7	1.03	3VX 425	42.5	0.93	5VX 850	85.0	0.94	8V1700	170.0	0.95
A 75	77.1	1.02	B 85	87.9	0.99	C120	124.2	0.97	D300	302.7	1.05	3VX 450	45.0	0.94	5VX 900	90.0	0.95	8V1800	180.0	0.95
A 80	82.1	1.04	B 90	92.9	1.00	C128	132.2	0.98	D330	332.7	1.07	3VX 475	47.5	0.95	5VX 950	95.0	0.96	8V1900	190.0	0.96
A 85	87.1	1.05	B 97	99.9	1.02	C144	148.2	1.00	D360	362.7	1.09	3VX 500	50.0	0.96	5VX1000	100.0	0.96	8V2000	200.0	0.97
A 90	92.1	1.06	B105	107.9	1.04	C158	162.2	1.02	D390	392.7	1.11	3VX 530	53.0	0.97	5VX1060	106.0	0.97	8V2120	212.0	0.98
A 96	98.1	1.08	B112	114.9	1.05	C173	177.2	1.04	D420	422.7	1.12	3VX 560	56.0	0.98	5VX1120	112.0	0.98	8V2240	224.0	0.98
A105	107.1	1.10	B120	122.9	1.07	C180	184.2	1.05	D480	482.7	1.16	3VX 600	60.0	0.99	5VX1180	118.0	0.99	8V2360	236.0	0.99
A112	114.1	1.11	B128	130.9	1.08	C195	199.2	1.07	D540	542.7	1.18	3VX 630	63.0	1.00	5VX1250	125.0	1.00	8V2500	250.0	1.00
A120	122.1	1.13	B144	146.9	1.11	C210	212.2	1.08	D600	602.7	1.20	3VX 670	67.0	1.01	5VX1320	132.0	1.01	8V2650	265.0	1.01
A128	130.1	1.14	B158	160.9	1.13	C240	242.2	1.11				3VX 710	71.0	1.02	5VX1400	140.0	1.02	8V2800	280.0	1.00
			B173	175.9	1.15	C270	272.2	1.14				3VX 750	75.0	1.03	5VX1500	150.0	1.03	8V3000	300.0	1.00
			B180	182.9	1.16	C300	302.2	1.16				3VX 800	80.0	1.04	5VX1600	160.0	1.04	8V3150	315.0	1.03
			B195	197.9	1.18	C330	332.2	1.19				3VX 850	85.0	1.05	5VX1700	170.0	1.05	8V3350	335.0	1.04
			B210	211.4	1.19	C360	362.2	1.21				3VX900	90.0	1.07	5VX1800	180.0	1.06	8V3550	355.0	1.05
			B240	241.4	1.22	C390	392.2	1.23				3VX 950	95.0	1.08	5VX1900	190.0	1.07	8V3750	375.0	1.06
			B270	271.4	1.25	C420	422.2	1.24				3VX1000	100.0	1.09	5VX2000	200.0	1.08	8V4000	400.0	1.07
			B300	301.4	1.27							3VX1060	106.0	1.10	5V 2120	212.0	1.08	8V4250	425.0	1.08
												3VX1120	112.0	1.11	5V 2240	224.0	1.09	8V4500	450.0	1.09
												3VX1180	118.0	1.12	5V 2360	236.0	1.10	8V4750	475.0	1.10
												3VX1250	125.0	1.13	5V 2500	250.0	1.11	8V5000	500.0	1.11
												3VX1320	132.0	1.15	5V 2650	265.0	1.12			
												3VX1400	140.0	1.16	5V 2800	280.0	1.13			
												5V 3000	300.0	1.14	5V 3000	300.0	1.14			
												5V 3150	315.0	1.15	5V 3150	315.0	1.15			
												5V 3350	335.0	1.16	5V 3350	335.0	1.16			
												5V 3550	355.0	1.17	5V 3550	355.0	1.17			

**Tabla 11 — Factor de  
Corrección “G” para Arco**

$\frac{D-d}{C}$	Arco de Contacto Aproximado en Polea Pequeña	Factor “G”
.00	180	1.00
.10	174	.99
.20	169	.97
.30	163	.96
.40	157	.94
.50	151	.93
.60	145	.91
.70	139	.89
.80	133	.87
.90	127	.85
1.00	120	.82
1.10	113	.80
1.20	106	.77
1.30	99	.73
1.40	91	.70
1.50	83	.65



# 5V Selección de Transmisión en Existencia



Relación de Velocidad	Combinación de Poleas		Velocidades Impulsadas y HP por Banda												Distancia Nominal entre Centros y Factor de Corrección por Longitud y Arco		
			1750 RPM Motriz			1160 RPM Motriz			870 RPM Motriz			690 RPM Motriz					
			Motriz D.E.	Impuls. D.E.	Impuls. RPM	HP por Banda 5V	HP por Banda 5VX	Impuls. RPM	HP por Banda 5V	HP por Banda 5VX	Impuls. RPM	HP por Banda 5V	HP por Banda 5VX	Impuls. RPM	HP por Banda 5V	HP por Banda 5VX	Designación de Largo de Banda 5V/5VX
2.30	10.30	23.60	760	29.65	35.10	503	21.88	24.95	378	17.25	19.39	299	14.13	15.76	—	—	—
2.31	9.25	21.20	759	25.92	30.93	503	18.96	21.88	377	14.91	16.99	299	12.21	13.80	—	—	—
2.33	4.90	11.30	750	8.12	12.06	497	5.97	8.50	373	4.76	6.62	296	3.94	5.41	11.8	17.0	22.5
2.35	8.00	18.70	743	21.17	25.77	493	15.37	18.15	370	12.07	14.07	293	9.89	11.43	—	—	—
2.35	16.00	37.50	+	+	+	493	36.13	40.50	370	29.11	31.88	293	24.06	26.04	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.78</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>
2.37	4.40	10.30	738	5.86	9.74	489	4.39	6.90	367	3.54	5.39	291	2.95	4.41	13.1	18.2	23.8
2.37	4.65	10.90	737	7.00	10.90	489	5.19	7.70	367	4.15	6.01	291	3.45	4.91	12.4	17.5	23.1
2.37	9.00	21.20	738	25.00	29.92	489	18.25	21.14	367	14.35	16.41	291	11.75	13.33	—	—	—
2.38	11.80	28.00	734	34.56	40.77	486	25.91	29.24	365	20.51	22.78	289	16.83	18.53	—	—	—
2.40	5.90	14.00	730	12.52	16.62	484	9.08	11.68	363	7.16	9.07	288	5.89	7.38	—	13.8	19.4
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.80</b>	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>
2.40	6.30	15.00	728	14.23	18.40	483	10.31	12.93	362	8.11	10.03	287	6.66	8.16	—	—	18.3
2.40	13.20	31.50	730	38.63	45.73	484	29.50	33.12	363	23.46	25.87	288	19.29	21.07	—	—	—
2.41	6.70	16.00	726	15.91	20.17	482	11.52	14.17	361	9.06	10.99	286	7.43	8.94	—	—	17.0
2.43	5.20	12.50	720	9.46	13.45	477	6.92	9.47	358	5.49	7.36	284	4.53	6.00	—	15.7	21.3
2.43	5.50	13.20	721	10.78	14.81	478	7.85	10.42	359	6.21	8.10	284	5.12	6.60	—	14.8	20.5
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.0</b>	<b>0.82</b>	<b>0.86</b>
2.44	4.90	11.80	718	8.13	12.07	476	5.98	8.51	357	4.76	6.63	283	3.94	5.41	11.4	16.5	22.1
2.44	9.75	23.60	719	27.74	32.95	476	20.37	23.36	357	16.04	18.14	283	13.13	14.74	—	—	—
2.46	4.65	11.30	711	7.00	10.91	471	5.19	7.71	353	4.15	6.01	280	3.45	4.91	12.0	17.2	22.7
2.49	11.30	28.00	703	33.00	38.93	466	24.60	27.83	349	19.44	21.66	277	15.94	17.62	—	—	—
2.51	4.40	10.90	697	5.87	9.75	462	4.40	6.90	346	3.54	5.40	275	2.96	4.41	12.6	17.7	23.3
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.77</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>
2.51	7.50	18.70	696	19.19	23.65	462	13.91	16.63	346	10.93	12.90	275	8.95	10.48	—	—	—
2.51	8.50	21.20	697	23.12	27.87	462	16.83	19.66	346	13.22	15.25	275	10.83	12.39	—	—	—
2.51	15.00	37.50	+	+	+	462	33.85	37.93	347	27.14	29.77	275	22.38	24.29	—	—	—
2.53	12.50	31.50	691	36.67	43.30	458	27.73	31.20	344	22.00	24.34	272	18.07	19.81	—	—	—
2.56	6.30	16.00	682	14.24	18.41	452	10.31	12.94	339	8.12	10.04	269	6.67	8.16	—	—	17.3
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.83</b>
2.57	4.65	11.80	681	7.01	10.92	451	5.20	7.71	338	4.16	6.02	268	3.45	4.92	11.5	16.7	22.3
2.57	5.20	13.20	681	9.47	13.45	452	6.93	9.47	339	5.49	7.37	269	4.54	6.01	—	15.0	20.7
2.57	5.50	14.00	680	10.79	14.82	451	7.86	10.42	338	6.21	8.10	268	5.12	6.60	—	14.0	19.7
2.57	5.90	15.00	681	12.53	16.63	452	9.09	11.68	339	7.17	9.07	269	5.90	7.38	—	12.8	18.5
2.57	9.25	23.60	681	25.94	30.95	452	18.97	21.89	339	14.92	16.99	269	12.22	13.81	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.77</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>
2.58	4.90	12.50	677	8.14	12.07	449	5.99	8.51	337	4.77	6.63	267	3.95	5.41	—	15.9	21.5
2.58	10.90	28.00	677	31.70	37.43	449	23.53	26.69	337	18.57	20.76	267	15.22	16.88	—	—	—
2.60	4.40	11.30	672	5.88	9.75	445	4.41	6.91	334	3.55	5.40	265	2.96	4.42	12.2	17.3	22.9
2.64	9.00	23.60	663	25.02	29.94	439	18.27	21.15	329	14.36	16.42	261	11.76	13.34	—	—	—
2.66	7.10	18.70	659	17.58	21.93	437	12.73	15.42	327	10.00	11.96	260	8.20	9.72	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.78</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>
2.67	8.00	21.20	655	21.19	25.79	434	15.39	18.16	326	12.09	14.08	258	9.90	11.44	—	—	—
2.68	11.80	31.50	652	34.58	40.79	432	25.93	29.25	324	20.52	22.79	257	16.83	18.54	—	—	—
2.69	14.00	37.50	650	40.73	48.42	431	31.48	35.29	323	25.12	27.62	256	20.68	22.52	—	—	—
2.72	4.40	11.80	643	5.89	9.76	426	4.41	6.91	320	3.55	5.40	254	2.96	4.42	11.7	16.9	22.5
2.73	4.65	12.50	642	7.02	10.92	426	5.20	7.72	319	4.16	6.02	253	3.46	4.92	10.8	16.1	21.7
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.77</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>
2.73	4.90	13.20	641	8.15	12.08	425	5.99	8.52	319	4.77	6.64	253	3.95	5.42	—	15.2	20.9
2.73	5.20	14.00	642	9.48	13.46	426	6.93	9.48	319	5.50	7.37	253	4.54	6.01	—	14.2	19.9
2.74	5.90	16.00	638	12.54	16.64	423	9.10	11.69	317	7.18	9.08	252	5.90	7.39	—	—	17.8
2.74	10.30	28.00	640	29.69	35.13	424	21.90	24.97	318	17.26	19.41	252	14.14	15.77	—	—	—
2.76	5.50	15.00	634	10.80	14.83	420	7.87	10.43	315	6.22	8.11	250	5.13	6.60	—	13.0	18.8
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.0</b>	<b>0.81</b>	<b>0.86</b>
2.80	8.50	23.60	626	23.14	27.88	415	16.84	19.67	311	13.23	15.26	247	10.83	12.40	—	—	—
2.80	11.30	31.50	624	33.02	38.95	414	24.61	27.84	310	19.45	21.67	246	15.94	17.62	—	—	—
2.82	6.70	18.70	621	15.93	20.19	412	11.53	14.19	309	9.07	11.00	245	7.44	8.95	—	—	—
2.85	7.50	21.20	614	19.21	23.66	407	13.92	16.64	305	10.94	12.91	242	8.96	10.49	—	—	—
2.85	13.20	37.50	613	38.66	45.75	406	29.52	33.13	305	23.48	25.89	242	19.30	21.08	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>															<b>0.0</b>	<b>0.0</b>	<b>0.0</b>

5V = BANDA-V ESTÁNDAR  
5VX = BANDA-V DENTADA/RANURADA

# 3V Selección de Transmisión en Existencia



Relación de Velocidad	Combinación de Poleas		Velocidades Impulsadas y HP por Banda								Distancia Nominal entre Centros y Factor de Corrección por Longitud y Arco						
			3500 RPM Motriz		1750 RPM Motriz		1160 RPM Motriz		870 RPM Motriz		Designación de Largo de Banda 3VX						
	Motriz D.E.	Impuls. D.E.	Impuls. RPM	HP por Banda 3VX	Impuls. RPM	HP por Banda 3VX	Impuls. RPM	HP por Banda 3VX	Impuls. RPM	HP por Banda 3VX	250	300	355	400	450	500	560
1.92	3.15	6.00	1824	5.91	912	3.29	604	2.29	453	1.78	—	7.7	10.5	12.7	15.2	17.8	20.8
1.93	2.35	4.50	1809	3.39	904	1.92	600	1.35	450	1.05	7.0	9.6	12.3	14.6	17.1	19.6	22.6
1.95	3.35	6.50	1791	6.53	895	3.63	593	2.53	445	1.95	—	7.1	9.9	12.2	14.7	17.2	20.2
1.95	4.12	8.00	1792	8.81	896	4.91	594	3.41	445	2.63	—	—	8.0	10.3	12.8	15.4	18.4
2.01	5.30	10.60	1742	12.05	871	6.82	577	4.74	433	3.66	—	—	—	9.6	12.2	15.3	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.80</b>	<b>0.84</b>	<b>0.87</b>	<b>0.90</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>	<b>0.97</b>
2.02	2.50	5.00	1732	3.88	866	2.18	574	1.53	431	1.19	6.5	9.0	11.8	14.1	16.6	19.1	22.1
2.02	2.65	5.30	1733	4.36	867	2.44	574	1.71	431	1.33	6.1	8.7	11.4	13.7	16.2	18.7	21.7
2.02	2.80	5.60	1734	4.83	867	2.70	575	1.89	431	1.46	5.7	8.3	11.1	13.3	15.8	18.3	21.3
2.02	3.00	6.00	1735	5.46	868	3.04	575	2.12	431	1.64	—	7.8	10.6	12.8	15.4	17.9	20.9
2.04	2.35	4.75	1713	3.39	856	1.92	568	1.35	426	1.06	6.8	9.3	12.1	14.4	16.9	19.4	22.4
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.79</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>	<b>0.90</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
2.04	6.90	14.00	1719	15.88	859	9.30	570	6.49	427	5.01	—	—	—	—	—	—	—
2.07	2.20	4.50	1691	2.91	846	1.66	560	1.17	420	0.92	7.1	9.7	12.4	14.7	17.2	19.7	20.7
2.08	3.15	6.50	1682	5.93	841	3.30	558	2.30	418	1.78	—	7.2	10.0	12.3	14.8	17.3	20.4
2.08	3.35	6.90	1686	6.54	843	3.63	559	2.53	419	1.96	—	6.7	9.5	11.8	14.3	16.9	19.9
2.13	2.65	5.60	1640	4.36	820	2.44	543	1.71	408	1.33	5.8	8.4	11.2	13.4	16.0	18.5	21.5
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.79</b>	<b>0.84</b>	<b>0.87</b>	<b>0.90</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>	<b>0.97</b>
2.13	5.00	10.60	1642	11.27	821	6.35	544	4.41	408	3.40	—	—	—	9.8	12.4	15.5	—
2.14	2.50	5.30	1633	3.88	817	2.18	541	1.53	406	1.19	6.2	8.8	11.5	13.8	16.3	18.8	21.8
2.15	2.35	5.00	1626	3.40	813	1.92	539	1.35	404	1.06	6.6	9.1	11.9	14.2	16.7	19.2	22.2
2.16	2.80	6.00	1618	4.84	809	2.70	536	1.89	402	1.47	—	7.9	10.7	13.0	15.5	18.0	21.0
2.16	6.50	14.00	1618	14.99	809	8.70	536	6.06	402	4.68	—	—	—	—	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.78</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>	<b>0.89</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
2.19	2.20	4.75	1601	2.91	801	1.66	531	1.18	398	0.92	6.9	9.5	12.2	14.5	17.0	19.5	22.5
2.19	3.00	6.50	1601	5.47	800	3.04	531	2.12	398	1.65	—	7.3	10.1	12.4	14.9	17.5	20.5
2.21	3.15	6.90	1584	5.93	792	3.30	525	2.30	394	1.78	—	6.9	9.7	12.0	14.5	17.0	20.0
2.21	3.65	8.00	1585	7.45	792	4.14	525	2.88	394	2.22	—	—	8.3	10.6	13.2	15.7	18.7
2.24	4.75	10.60	1559	10.60	780	5.95	517	4.13	388	3.19	—	—	—	10.0	12.6	15.7	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.79</b>	<b>0.83</b>	<b>0.87</b>	<b>0.90</b>	<b>0.92</b>	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
2.27	2.50	5.60	1545	3.89	773	2.19	512	1.53	384	1.19	5.9	8.5	11.3	13.5	16.1	18.6	21.6
2.28	2.35	5.30	1533	3.40	767	1.93	508	1.36	381	1.06	6.3	8.9	11.6	13.9	16.4	18.9	21.9
2.29	2.65	6.00	1529	4.37	765	2.45	507	1.71	380	1.33	—	8.0	10.8	13.1	15.6	18.1	21.1
2.30	2.20	5.00	1520	2.92	760	1.66	504	1.18	378	0.92	6.7	9.2	12.0	14.3	16.8	19.3	22.3
2.32	3.00	6.90	1507	5.47	754	3.05	500	2.12	375	1.65	—	7.0	9.8	12.1	14.6	17.1	20.1
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.77</b>	<b>0.82</b>	<b>0.86</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
2.34	6.00	14.00	1493	13.83	746	7.93	495	5.52	371	4.26	—	—	—	—	—	—	11.6
2.35	2.80	6.50	1492	4.84	746	2.70	495	1.89	371	1.47	—	7.5	10.3	12.6	15.1	17.6	20.6
2.36	10.60	25.00	+	+	740	14.51	491	10.33	368	8.02	—	—	—	—	—	—	—
2.37	4.50	10.60	1476	9.91	738	5.54	489	3.85	367	2.97	—	—	—	10.2	12.8	15.8	—
2.38	8.00	19.00	+	+	734	10.94	487	7.66	365	5.93	—	—	—	—	—	—	—
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.0</b>	<b>0.80</b>	<b>0.85</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>	<b>0.93</b>	<b>0.96</b>
2.41	2.35	5.60	1450	3.41	725	1.93	481	1.36	361	1.06	6.0	8.6	11.4	13.7	16.2	18.7	21.7
2.41	3.35	8.00	1453	6.55	726	3.64	482	2.53	361	1.96	—	—	8.5	10.8	13.4	15.9	18.9
2.43	2.50	6.00	1441	3.89	721	2.19	478	1.54	358	1.20	—	8.1	10.9	13.2	15.7	18.2	21.3
2.44	2.20	5.30	1433	2.92	717	1.67	475	1.18	356	0.92	6.4	9.0	11.8	14.0	16.5	19.0	22.0
2.48	2.65	6.50	1411	4.37	705	2.45	468	1.71	351	1.33	—	7.6	10.4	12.7	15.2	17.7	20.7
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.76</b>	<b>0.82</b>	<b>0.86</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.94</b>	<b>0.96</b>
2.49	2.80	6.90	1405	4.85	703	2.71	466	1.89	349	1.47	—	7.1	9.9	12.2	14.7	17.3	20.3
2.51	5.60	14.00	1392	12.84	696	7.31	462	5.08	346	3.92	—	—	—	—	—	—	11.9
2.56	3.15	8.00	1365	5.94	682	3.30	452	2.30	339	1.78	—	—	8.7	11.0	13.5	16.1	19.1
2.58	2.20	5.60	1356	2.92	678	1.67	449	1.18	337	0.92	6.1	8.7	11.5	13.8	16.3	18.8	21.8
2.59	2.35	6.00	1353	3.41	676	1.93	448	1.36	336	1.06	5.6	8.2	11.0	13.3	15.8	18.4	21.4
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.76</b>	<b>0.82</b>	<b>0.86</b>	<b>0.89</b>	<b>0.91</b>	<b>0.93</b>	<b>0.96</b>
2.59	4.12	10.60	1350	8.84	675	4.92	448	3.42	336	2.64	—	—	—	10.4	13.0	16.1	—
2.63	2.50	6.50	1329	3.90	665	2.19	441	1.54	330	1.20	—	7.7	10.5	12.8	15.3	17.8	20.8
2.63	2.65	6.90	1328	4.38	664	2.45	440	1.72	330	1.33	—	7.2	10.0	12.3	14.8	17.4	20.4
2.66	5.30	14.00	1317	12.08	659	6.83	437	4.75	327	3.66	—	—	—	—	—	—	12.1
2.69	3.00	8.00	1299	5.48	649	3.05	430	2.13	323	1.65	—	—	8.8	11.1	13.6	16.2	19.2
<b>FACTOR DE CORRECCIÓN POR LONGITUD Y ARCO</b>											<b>0.0</b>	<b>0.80</b>	<b>0.85</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>	<b>0.93</b>	<b>0.95</b>

3VX= LOS VALORES AQUÍ INDICADOS SON SOLAMENTE PARA LAS BANDAS 3VX.



Capacidad Básica de Potencia HP 5VX

Diámetro Exterior de la Polea (en pulgadas)								"Añada" HP por Relación de Velocidad									RPM del Eje más Rápido
10.90	11.30	11.80	12.50	13.20	14.00	15.00	16.00	1.02 - 1.05	1.06 - 1.11	1.12 - 1.18	1.19 - 1.26	1.27 - 1.38	1.39 - 1.57	1.58 - 1.94	1.95 - 3.38	3.39 - o más	
10.73	11.22	11.82	12.67	13.51	14.46	15.65	16.83	0.03	0.09	0.15	0.21	0.25	0.30	0.33	0.36	0.38	435
11.85	12.38	13.05	13.99	14.91	15.97	17.27	18.57	0.04	0.10	0.17	0.23	0.28	0.33	0.37	0.40	0.43	485
13.82	14.45	15.23	16.31	17.39	18.62	20.14	21.64	0.04	0.12	0.20	0.27	0.33	0.39	0.44	0.48	0.51	575
14.04	14.67	15.47	16.57	17.67	18.91	20.45	21.98	0.04	0.12	0.21	0.28	0.34	0.40	0.45	0.49	0.52	585
16.28	17.02	17.94	19.21	20.48	21.91	23.69	25.45	0.05	0.14	0.24	0.33	0.40	0.47	0.53	0.57	0.61	690
17.02	17.79	18.75	20.08	21.40	22.90	24.75	26.58	0.05	0.15	0.25	0.35	0.42	0.49	0.55	0.60	0.64	725
20.01	20.91	22.03	23.58	25.12	26.87	29.01	31.13	0.06	0.18	0.31	0.42	0.50	0.59	0.67	0.72	0.77	870
21.61	22.59	23.79	25.46	27.12	28.98	31.28	33.54	0.07	0.19	0.33	0.45	0.55	0.65	0.73	0.79	0.84	950
25.69	26.83	28.24	30.19	32.12	34.28	36.92	39.50	0.09	0.23	0.41	0.55	0.67	0.79	0.89	0.97	1.02	1160
30.51	31.84	33.48	35.73	37.93	40.39	43.36	46.22	0.11	0.29	0.50	0.68	0.83	0.97	1.09	1.19	1.26	1425
35.91	37.42	39.27	41.78	44.22	46.89	50.07	53.04	0.13	0.35	0.61	0.84	1.02	1.19	1.34	1.46	1.54	1750
49.04	50.62	52.47	54.79	56.77	—	—	—	0.21	0.57	1.00	1.36	1.65	1.94	2.18	2.37	2.52	2850
52.04	—	—	—	—	—	—	—	0.26	0.70	1.21	1.65	2.00	2.34	2.64	2.87	3.05	3450
2.77	2.90	3.05	3.27	3.48	3.73	4.03	4.33	0.01	0.02	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	100
5.26	5.50	5.80	6.21	6.62	7.09	7.67	8.25	0.01	0.04	0.07	0.10	0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	200
7.64	7.99	8.42	9.02	9.62	10.30	11.14	11.98	0.02	0.06	0.11	0.14	0.17	0.20	0.23	0.25	0.26	300
9.94	10.39	10.95	11.73	12.51	13.40	14.50	15.59	0.03	0.08	0.14	0.19	0.23	0.27	0.31	0.33	0.35	400
12.18	12.73	13.42	14.38	15.33	16.41	17.76	19.09	0.04	0.10	0.18	0.24	0.29	0.34	0.38	0.42	0.44	500
14.36	15.01	15.82	16.95	18.07	19.34	20.92	22.48	0.04	0.12	0.21	0.29	0.35	0.41	0.46	0.50	0.53	600
16.49	17.24	18.17	19.46	20.74	22.20	24.00	25.77	0.05	0.14	0.25	0.33	0.41	0.48	0.54	0.58	0.62	700
18.58	19.42	20.46	21.91	23.34	24.97	26.98	28.96	0.06	0.16	0.28	0.38	0.46	0.54	0.61	0.67	0.71	800
20.61	21.54	22.69	24.29	25.88	27.66	29.87	32.04	0.07	0.18	0.32	0.43	0.52	0.61	0.69	0.75	0.79	900
22.60	23.62	24.87	26.61	28.34	30.28	32.66	35.01	0.07	0.20	0.35	0.48	0.58	0.68	0.76	0.83	0.88	1000
24.54	25.64	26.99	28.87	30.72	32.80	35.36	37.85	0.08	0.22	0.39	0.53	0.64	0.75	0.84	0.92	0.97	1100
26.44	27.61	29.06	31.06	33.03	35.24	37.95	40.58	0.09	0.24	0.42	0.57	0.70	0.81	0.92	1.00	1.06	1200
28.28	29.52	31.06	33.18	35.26	37.59	40.43	43.17	0.10	0.26	0.46	0.62	0.75	0.88	0.99	1.08	1.15	1300
30.07	31.38	33.00	35.23	37.41	39.84	42.79	45.63	0.10	0.28	0.49	0.67	0.81	0.95	1.07	1.17	1.24	1400
31.81	33.18	34.88	37.20	39.47	41.99	45.03	47.94	0.11	0.30	0.53	0.72	0.87	1.02	1.15	1.25	1.32	1500
33.49	34.92	36.68	39.09	41.44	44.03	47.15	50.10	0.12	0.32	0.56	0.77	0.93	1.09	1.22	1.33	1.41	1600
35.12	36.60	38.42	40.91	43.32	45.97	49.13	52.10	0.13	0.34	0.60	0.81	0.99	1.15	1.30	1.42	1.50	1700
36.69	38.22	40.09	42.64	45.09	47.79	50.97	53.94	0.13	0.36	0.63	0.86	1.04	1.22	1.38	1.50	1.59	1800
38.19	39.76	41.68	44.28	46.77	49.48	52.67	55.60	0.14	0.38	0.67	0.91	1.10	1.29	1.45	1.58	1.68	1900
39.64	41.24	43.19	45.83	48.34	51.06	54.21	57.08	0.15	0.40	0.70	0.96	1.16	1.36	1.53	1.67	1.77	2000
41.01	42.64	44.62	47.28	49.80	52.50	55.59	58.36	0.16	0.42	0.74	1.00	1.22	1.43	1.61	1.75	1.85	2100
42.32	43.98	45.97	48.64	51.14	53.81	56.82	59.45	0.16	0.44	0.77	1.05	1.28	1.49	1.68	1.83	1.94	2200
43.57	45.23	47.23	49.89	52.37	54.97	57.86	60.33	0.17	0.46	0.81	1.10	1.33	1.56	1.76	1.92	2.03	2300
44.73	46.40	48.40	51.04	53.47	55.99	58.73	61.00	0.18	0.48	0.84	1.15	1.39	1.63	1.83	2.00	2.12	2400
45.83	47.49	49.48	52.07	54.44	56.86	59.42	—	0.19	0.50	0.88	1.20	1.45	1.70	1.91	2.08	2.21	2500
46.85	48.50	50.46	53.00	55.28	57.57	—	—	0.19	0.52	0.91	1.24	1.51	1.77	1.99	2.17	2.30	2600
47.78	49.42	51.34	53.80	55.99	58.12	—	—	0.20	0.54	0.95	1.29	1.57	1.83	2.06	2.25	2.38	2700
48.64	50.25	52.12	54.49	56.55	—	—	—	0.21	0.56	0.98	1.34	1.62	1.90	2.14	2.33	2.47	2800
49.41	50.98	52.79	55.05	56.96	—	—	—	0.21	0.58	1.02	1.39	1.68	1.97	2.22	2.42	2.56	2900
50.10	51.62	53.36	55.48	—	—	—	—	0.22	0.60	1.05	1.43	1.74	2.04	2.29	2.50	2.65	3000
50.69	52.16	53.81	—	—	—	—	—	0.23	0.63	1.09	1.48	1.80	2.11	2.37	2.58	2.74	3100
51.20	52.59	54.14	—	—	—	—	—	0.24	0.65	1.12	1.53	1.86	2.17	2.45	2.67	2.82	3200
51.60	52.92	—	—	—	—	—	—	0.24	0.67	1.16	1.58	1.91	2.24	2.52	2.75	2.91	3300
51.92	53.15	—	—	—	—	—	—	0.25	0.69	1.19	1.63	1.97	2.31	2.60	2.83	3.00	3400
52.13	—	—	—	—	—	—	—	0.26	0.71	1.23	1.67	2.03	2.38	2.68	2.92	3.09	3500
—	—	—	—	—	—	—	—	0.27	0.73	1.26	1.72	2.09	2.44	2.75	3.00	3.18	3600
—	—	—	—	—	—	—	—	0.27	0.75	1.30	1.77	2.15	2.51	2.83	3.08	3.27	3700
—	—	—	—	—	—	—	—	0.28	0.77	1.33	1.82	2.20	2.58	2.91	3.17	3.35	3800
—	—	—	—	—	—	—	—	0.29	0.79	1.37	1.86	2.26	2.65	2.98	3.25	3.44	3900
—	—	—	—	—	—	—	—	0.30	0.81	1.40	1.91	2.32	2.72	3.06	3.33	3.53	4000
—	—	—	—	—	—	—	—	0.31	0.85	1.47	2.01	2.44	2.85	3.21	3.50	3.71	4200
—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	0.89	1.55	2.10	2.55	2.99	3.36	3.67	3.88	4400
—	—	—	—	—	—	—	—	0.34	0.93	1.62	2.20	2.67	3.12	3.52	3.83	4.06	4600
—	—	—	—	—	—	—	—	0.36	0.97	1.69	2.30	2.78	3.26	3.67	4.00	4.24	4800
—	—	—	—	—	—	—	—	0.37	1.01	1.76	2.39	2.90	3.40	3.82	4.17	4.41	5000





## Capacidad Básica de Potencia HP **3VX**

Diámetro Exterior de la Polea (en pulgadas)						"Añada" HP por Relación de Velocidad										RPM del Eje más Rápido
5.00	6.00	6.50	6.90	8.00	10.00	1.02-1.05	1.06-1.11	1.12-1.18	1.19-1.26	1.27-1.38	1.39-1.57	1.58-1.94	1.95-3.38	3.39 o más		
2.59	2.82	3.11	3.34	3.97	5.42	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.08	0.09	0.09	0.10	575	
3.06	3.33	3.67	3.95	4.69	6.39	0.01	0.03	0.05	0.06	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	690	
3.20	3.49	3.84	4.13	4.90	6.69	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.10	0.11	0.12	0.13	725	
3.77	4.11	4.53	4.87	5.78	7.87	0.01	0.03	0.06	0.08	0.10	0.12	0.13	0.14	0.15	870	
4.08	4.45	4.91	5.27	6.25	8.51	0.01	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.14	0.16	0.16	950	
4.88	5.32	5.87	6.30	7.47	10.13	0.02	0.05	0.08	0.11	0.13	0.15	0.17	0.19	0.20	1160	
5.86	6.38	7.03	7.55	8.94	12.05	0.02	0.06	0.10	0.13	0.16	0.19	0.21	0.23	0.25	1425	
7.01	7.63	8.40	9.01	10.64	14.22	0.03	0.07	0.12	0.16	0.20	0.23	0.26	0.29	0.30	1750	
10.50	11.40	12.48	13.31	15.46	19.56	0.04	0.11	0.20	0.27	0.33	0.38	0.43	0.47	0.49	2850	
12.12	13.11	14.28	15.16	17.35	20.86	0.05	0.14	0.24	0.32	0.39	0.46	0.52	0.56	0.60	3450	
0.52	0.56	0.62	0.67	0.79	1.08	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	100	
0.98	1.07	1.18	1.27	1.50	2.05	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	200	
1.43	1.56	1.71	1.84	2.18	2.98	0.00	0.01	0.02	0.03	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	300	
1.86	2.03	2.23	2.40	2.85	3.89	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.05	0.06	0.07	0.07	400	
2.28	2.48	2.74	2.94	3.49	4.77	0.01	0.02	0.03	0.05	0.06	0.07	0.08	0.08	0.09	500	
2.69	2.93	3.23	3.47	4.13	5.63	0.01	0.02	0.04	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.10	600	
3.10	3.38	3.72	4.00	4.75	6.48	0.01	0.03	0.05	0.07	0.08	0.09	0.11	0.11	0.12	700	
3.50	3.81	4.20	4.51	5.36	7.30	0.01	0.03	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.13	0.14	800	
3.89	4.24	4.67	5.02	5.96	8.11	0.01	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.15	0.16	900	
4.27	4.66	5.14	5.52	6.55	8.90	0.01	0.04	0.07	0.09	0.11	0.13	0.15	0.16	0.17	1000	
4.65	5.07	5.59	6.01	7.13	9.68	0.02	0.04	0.08	0.10	0.13	0.15	0.17	0.18	0.19	1100	
5.03	5.48	6.04	6.49	7.69	10.43	0.02	0.05	0.08	0.11	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21	1200	
5.40	5.89	6.49	6.97	8.25	11.16	0.02	0.05	0.09	0.12	0.15	0.17	0.20	0.21	0.23	1300	
5.77	6.29	6.93	7.43	8.80	11.88	0.02	0.06	0.10	0.13	0.16	0.19	0.21	0.23	0.24	1400	
6.13	6.68	7.36	7.89	9.34	12.57	0.02	0.06	0.10	0.14	0.17	0.20	0.23	0.25	0.26	1500	
6.48	7.06	7.78	8.35	9.87	13.25	0.02	0.06	0.11	0.15	0.18	0.21	0.24	0.26	0.28	1600	
6.83	7.45	8.20	8.79	10.39	13.90	0.02	0.07	0.12	0.16	0.19	0.23	0.26	0.28	0.29	1700	
7.18	7.82	8.61	9.23	10.89	14.53	0.03	0.07	0.12	0.17	0.21	0.24	0.27	0.29	0.31	1800	
7.52	8.19	9.01	9.66	11.39	15.14	0.03	0.08	0.13	0.18	0.22	0.25	0.29	0.31	0.33	1900	
7.86	8.55	9.41	10.08	11.87	15.72	0.03	0.08	0.14	0.19	0.23	0.27	0.30	0.33	0.35	2000	
8.19	8.91	9.80	10.49	12.34	16.28	0.03	0.08	0.14	0.20	0.24	0.28	0.32	0.34	0.36	2100	
8.51	9.26	10.18	10.90	12.80	16.81	0.03	0.09	0.15	0.21	0.25	0.29	0.33	0.36	0.38	2200	
8.84	9.61	10.56	11.29	13.24	17.31	0.03	0.09	0.16	0.22	0.26	0.31	0.35	0.38	0.40	2300	
9.15	9.95	10.92	11.68	13.68	17.79	0.03	0.10	0.17	0.23	0.27	0.32	0.36	0.39	0.42	2400	
9.46	10.28	11.28	12.06	14.10	18.23	0.04	0.10	0.17	0.23	0.29	0.33	0.38	0.41	0.43	2500	
9.77	10.61	11.63	12.43	14.50	18.65	0.04	0.10	0.18	0.24	0.30	0.35	0.39	0.43	0.45	2600	
10.07	10.93	11.98	12.79	14.90	19.04	0.04	0.10	0.19	0.25	0.31	0.36	0.41	0.44	0.47	2700	
10.36	11.24	12.31	13.14	15.27	19.39	0.04	0.10	0.19	0.26	0.32	0.37	0.42	0.46	0.49	2800	
10.65	11.55	12.64	13.48	15.64	19.72	0.04	0.10	0.20	0.27	0.33	0.39	0.44	0.47	0.50	2900	
10.93	11.85	12.96	13.81	15.98	20.01	0.04	0.12	0.21	0.28	0.34	0.40	0.45	0.49	0.52	3000	
11.47	12.43	13.57	14.44	16.63	20.48	0.05	0.13	0.22	0.30	0.36	0.43	0.48	0.52	0.56	3200	
12.00	12.97	14.14	15.02	17.22	20.81	0.05	0.13	0.23	0.32	0.39	0.45	0.51	0.56	0.59	3400	
12.49	13.49	14.67	15.56	17.73	20.98	0.05	0.14	0.25	0.34	0.41	0.48	0.54	0.59	0.62	3600	
12.96	13.97	15.17	16.05	18.17	—	0.06	0.15	0.26	0.36	0.43	0.51	0.57	0.62	0.66	3800	
13.40	14.42	15.62	16.50	18.54	—	0.06	0.16	0.28	0.38	0.46	0.53	0.60	0.65	0.69	4000	
13.81	14.84	16.02	16.89	18.82	—	0.06	0.17	0.29	0.39	0.48	0.56	0.63	0.69	0.73	4200	
14.19	15.22	16.39	17.22	19.03	—	0.06	0.17	0.30	0.41	0.50	0.59	0.66	0.72	0.76	4400	
14.54	15.56	16.70	17.50	19.15	—	0.07	0.18	0.32	0.43	0.52	0.61	0.69	0.75	0.80	4600	
14.86	15.86	16.97	17.72	19.18	—	0.07	0.19	0.33	0.45	0.55	0.64	0.72	0.79	0.83	4800	
15.15	16.13	17.18	17.89	—	—	0.07	0.20	0.35	0.47	0.57	0.67	0.75	0.82	0.87	5000	
15.40	16.35	17.35	17.99	—	—	0.08	0.21	0.36	0.49	0.59	0.69	0.78	0.85	0.90	5200	
15.62	16.52	17.45	18.02	—	—	0.08	0.21	0.37	0.51	0.62	0.72	0.81	0.88	0.94	5400	
15.79	16.66	17.51	—	—	—	0.08	0.22	0.39	0.53	0.64	0.75	0.84	0.92	0.97	5600	
15.94	16.74	17.50	—	—	—	0.08	0.23	0.40	0.55	0.66	0.77	0.87	0.95	1.01	5800	
16.04	16.78	—	—	—	—	0.09	0.24	0.41	0.56	0.68	0.80	0.90	0.98	1.04	6000	
16.10	16.77	—	—	—	—	0.09	0.25	0.43	0.58	0.71	0.83	0.93	1.02	1.08	6200	
16.12	16.71	—	—	—	—	0.09	0.25	0.44	0.60	0.73	0.85	0.96	1.05	1.11	6400	
16.10	—	—	—	—	—	0.10	0.26	0.46	0.62	0.75	0.88	0.99	1.08	1.15	6600	
16.04	—	—	—	—	—	0.10	0.27	0.47	0.64	0.78	0.91	1.02	1.11	1.18	6800	
—	—	—	—	—	—	0.10	0.28	0.48	0.66	0.80	0.93	1.05	1.15	1.21	7000	

# TRABAJOS FUTUROS

El diseño de convertidores undimotrices o dispositivos WEC ha ido evolucionando a lo largo de las últimas 4 décadas. Sin embargo, las investigaciones realizadas en el ramo de energía undimotriz son desarrolladas, en su mayoría, en países de Europa, como Reino Unido, Dinamarca, España, Suecia, entre otros; Asia, como China y Japón; y América, como lo son países como Estados Unidos, Canadá y Brasil.

El presente trabajo representa una línea de investigación sobre tecnologías concernientes al bloque de energías renovables oceánicas: la energía undimotriz.

Diferentes aspectos pueden ser abordados para trabajos o líneas de investigación futuras, tomando como base el desarrollo de diseño mecánico presentado en este trabajo. A continuación, se muestran algunas de las opciones para abordar en investigaciones posteriores.

Análisis dinámico del convertidor WEC. Este aspecto forma parte importante dentro del desarrollo de convertidores undimotrices ya que el comportamiento estocástico de las olas influye activamente en diferentes aspectos del sistema como: la integridad general del sistema por cargas variables, el comportamiento dinámico de los flotadores respecto del sistema PTO y el oleaje; estudio de las reacciones y fuerzas involucradas en la interacción entre el dispositivo WEC y el mar; eficiencia del sistema, entre otros.

Sistema de Amarre. Este aspecto está directamente relacionado con el estudio del lugar en donde se plantea probar o instalar el dispositivo WEC. Cuestiones como las irregularidades del lecho marino, potencial undimotriz, fauna marina, corrientes marinas, entre otros aspectos, tienen que ser considerados para el correcto diseño del sistema de amarre.

Optimización de la figura del flotador. Diferentes estudios se han realizado para la optimización de la geometría de los sistemas de toma de potencia con el fin de aprovechar al máximo la energía liberada por las olas. Ya que el ángulo de impacto entre la ola y el flotador influye directamente en la conversión de energía eléctrica, un estudio mas detallado sobre esta relación podría ayudar a mejorar la eficiencia general del sistema.

Estudio sobre el comportamiento de las olas en México. Actualmente existen algunas investigaciones sobre el comportamiento del oleaje en diferentes partes del mundo. En México, este tipo de investigaciones están tomando forma, poco a poco, con organizaciones desarrolladas para tales propósitos. Tal es el caso de CEMIE-Océano. Este tipo de estudios ayudaría a los

investigadores e ingenieros a adoptar o desarrollar tecnologías undimotrices que se adapten de mejor forma a las condiciones undimotrices del país.

Desarrollo de otros sistemas WEC. Este trabajo muestra un enfoque generalizado sobre los prototipos y diseños realizados en materia de energía undimotriz, en diferentes países. La información recabada tiene como fin el establecer un panorama amplio sobre los diferentes tipos de métodos existentes y que el lector pueda establecer una investigación sobre el mejor método de aprovechamiento undimotriz en el país.

Tema A4 Fluidos y Térmica: Energía undimotriz.

## “Alternativas para el aprovechamiento de energías renovables en México: energía undimotriz.”

*Abdiel Gómez Mercado, Eddy León Ramírez, Luis Manuel Palacios Pineda, Rafael Campos Amezcua*

*Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Pachuca, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Carr. México-Pachuca km 87.5, Pachuca, Hgo. CP 42080, MÉXICO.*

*\*Autor contacto: agmerca63@gmail.com*

### RESUMEN

*En este trabajo se establecieron puntos clave, con base en los diversos proyectos realizados en varios países sobre el desarrollo de la energía undimotriz, que pueden ser considerados para el inicio de cualquier proyecto relacionado con este tipo de energía renovable. De esta manera, se puede lograr una mejora en el desarrollo de estas tecnologías y que a su vez beneficien a nuestro país. Además de lo anterior, se presenta un panorama general de proyectos similares realizados en México y la conveniencia de apostar por este tipo de fuente alterna de energía. Este estudio será una herramienta valiosa que servirá de apoyo a otros investigadores para determinar el tipo de dispositivo conversor de energía más conveniente en función de la localización geográfica y las condiciones climatológicas propias del lugar. De la misma manera, contribuye al diseño de los mecanismos convertidores (geometría, tipos y eficiencia).*

*Palabras Clave: Energía undimotriz, energías renovables, dispositivo conversor de energía.*

### ABSTRACT

*The aim of this paper is to establish key points, based on different executed projects in many countries about wave energy developments, which can be considered as a good beginning to start any project related with this kind of renewable energy. Thus, an improvement in technology developing can be achieved and can benefit our country. In addition to above, a global overview of similar projects made in Mexico is exposed and also, the suitability of betting on this type of alternative source of energy. This paper will be a valuable tool that may work as a support for other researchers to determine the most suitable type of wave energy converter device in terms of geographical location and the locality weather conditions. In the same vein, it contributes in the design of the converter mechanisms (geometry, type and efficiency).*

*Keywords: Wave energy, renewable energy, wave energy converter.*

### 1. Introducción

La producción de energías renovables a nivel mundial se ha convertido en una de las principales preocupaciones debido a los alarmantes índices de contaminación y cambio climático. Debido a esto, el desarrollo de tecnologías que produzcan energía eléctrica a partir del aprovechamiento de energía eólica, fotovoltaica, hidráulica, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, biomasa, biodiesel, entre otras, ha ido presentando un constante crecimiento en estos últimos años, de modo que en 2016 fue la primera vez que las energías renovables alcanzaron una participación del 14.0% de la producción mundial total de energía primaria [1].

El interés en la investigación y tecnología de las energías renovables va en aumento en los países latinoamericanos, sin embargo, su avance no puede ser comparado con los desarrollados en países como China, Estados Unidos, Japón,

Reino Unido, Alemania, India, España, Nueva Zelanda y Dinamarca [2].

La energía generada mediante el movimiento de las olas del mar es una de las propuestas de energía oceánica más llamativas de todas las existentes. Esto se debe, probablemente, a los efectos destructivos que las olas pueden lograr [3]. Según Vicinanza [4], la energía oceánica, dentro de todas las energías renovables conocidas, es capaz de proveer las más seguras, inagotables, predecibles y limpias fuentes de energía.

La energía oceánica se refiere a todas aquellas fuentes de energía que pueden ser aprovechadas gracias a los diferentes recursos brindados por el océano. Estas energías se dividen principalmente en [5-7]:

- Energía mareomotriz o de las mareas: aprovecha la variación de altura del mar, producido por las mareas.