



**UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**DESARROLLO DE LAS ECUACIONES DE DISEÑO PARA UN  
DISPOSITIVO WEC TIPO COLUMNA OSCILANTE**

**T E S I N A**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**ESPECIALISTA EN HIDRÁULICA**

PRESENTA:

**ALFREDO SÁNCHEZ CARRANZA**

DIRECTOR DE TESINA: **DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN**

CIUDAD DE MÉXICO

JUNIO 2020



*Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. En primer lugar, quiero agradecer al Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin, director de esta tesina, por aceptarme en el grupo de Ingeniería Marítima, así como al M.I. Enrique Eduardo Hernández Montoya y a Diana Laura Arias Guzmán, por toda su disposición y apoyo incondicional, sin ustedes esto no habría sido posible.*

*A mi Madre, por ser mi apoyo a lo largo de toda mi vida y siempre confiar en mí.*

*A Mariana, por su cariño y comprensión, por darme tantos momentos de felicidad y un futuro lleno de esperanza.*

*Mi agradecimiento a mi familia y amigos que de una u otra manera han colaborado en mi formación profesional y humana.*



*...for ocean is more ancient than the mountains, and freighted with the memories and the dreams of Time.*

**H. P. Lovecraft**



## RESUMEN

La creciente necesidad de utilizar fuentes de energía renovable ha ocasionado que a nivel mundial se destine tiempo y recursos para el desarrollo de dispositivos de aprovechamiento energético. El territorio nacional tiene una alta viabilidad de generar energía limpia gracias a que el país es rico en recursos naturales que, de aprovecharse, se traduciría en una menor contaminación y ahorros en la economía nacional. La energía undimotriz, objeto de estudio en este trabajo ofrece una posibilidad de minimizar las demandas eléctricas, mediante sistemas que aprovechen y maximicen la energía del océano.

Siendo la labor de investigación fundamental para el diseño de dispositivos, en el presente trabajo se plantean ecuaciones de diseño para un dispositivo de conversión de la energía del océano WEC (Wave Energy Converter), tipo columna oscilante OWC (Oscillating Water Column). Las ecuaciones pueden calcular el diámetro del convertidor, el voltaje que es capaz de generar y la distancia con respecto al nivel medio del mar en donde se debe colocar en función de las condiciones de oleaje predominantes en la zona costera.

La caracterización se logró utilizando el Teorema  $\pi$  de Buckingham, el cual permite reducir el número de variables que intervienen en un fenómeno físico, obteniendo mediante un análisis dimensional un número de monomios sin dimensiones que describen el fenómeno con total precisión. Las ecuaciones fueron validadas con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para diferentes estados de mar en el canal de simulación de oleaje del Laboratorio de Puertos y Costas del Instituto de Ingeniería de la UNAM.





## ABSTRACT

The growing need to use renewable energy sources has led to the worldwide allocation of time and resources for the development of energy converters. The national territory has a high viability of generating clean energy due to the rich natural resources potential that, if used, would result in less pollution and savings in the national economy. Wave energy, object of study in this work offers a possibility to minimize electrical demands, through systems that harness and maximize the energy of the ocean.

Due to the essential role of research in the device design, in this paper we propose design equations for an oscillating column type (OWC) ocean energy conversion device (WEC). The equations can calculate the diameter of the converter, the voltage capable of been generated and the distance below the mean sea level where it should be placed depending on the prevailing wave conditions in the coastal zone.

The characterization was achieved using *Buckingham's  $\pi$  Theorem*, which allows the reductions of the number of variables involved in a physical phenomenon, obtaining a number of dimensionless monomials (by means of a dimensional analysis) that describes the phenomena with total precision. The equations were validated with the results obtained in the tests carried out for different sea states in the wave simulation channel of the Ports and Coasts Laboratory at the Engineering Institute of the UNAM.



<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE TABLAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. OBJETIVO PRINCIPAL Y PARTICULAR .....	1
1.3. ENERGÍAS RENOVABLES .....	2
1.3.1. Energía Solar .....	2
1.3.2. Energía Eólica .....	4
1.3.3. Energía de la Biomasa.....	6
1.3.4. Energía Geotérmica.....	7
1.3.5. Energía Hidráulica.....	9
1.3.6. Energía Oceánica.....	10
1.4. ENERGÍA UNDIMOTRIZ.....	13
1.4.1. Tipos de Dispositivos WEC .....	15
<b>CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA .....</b>	<b>17</b>
2.1. MODELO EXPERIMENTAL .....	17
2.1.1. Descripción del Dispositivo .....	18
2.1.2. Mediciones .....	20
2.1.3. Procedimiento Experimental.....	22
2.1.4. Resultados .....	23
<b>CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
3.1. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS .....	25
3.1.1. Prueba más eficiente.....	27
3.1.2. Voltaje RMS.....	29
3.1.3. Análisis Dimensional .....	31
3.2. RESULTADOS.....	39
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>47</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.....</b>	<b>49</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.3.1 Componentes principales de un Aerogenerador y un Parque Eólico [8] .....	5
Figura 1.3.2 Proceso de Aprovechamiento de Biomasa en Biocombustibles [9] .....	7
Figura 1.3.3 Central Geotérmica “Cerro Prieto” [10] .....	8
Figura 1.3.4 Esquema de una Central Hidroeléctrica de Embalse [11].....	9
Figura 1.3.5 Esquema de Central Hidroeléctrica de Agua Fluyente [12] .....	10
Figura 1.3.6 Planta OTEC en Makai, Hawái [14].....	11
Figura 1.3.7 Central Mareomotriz Sihwa, Corea del Sur [15] .....	12
Figura 1.4.1 Dispositivo Atenuador: Pelamis [19].....	14
Figura 1.4.2 Dispositivo Terminador: Salter Duck [20] .....	14
Figura 1.4.3 Dispositivo Sumergido: Archimedes Wave Swing [21].....	15
Figura 1.4.4 Convertidor Columna de Agua Oscilante (OWC) [23] .....	16
Figura 2.1.1 Canal de Olas .....	17
Figura 2.1.2 Componentes de Dispositivo WEC .....	18
Figura 2.1.3 Plano Generador Trifásico .....	19
Figura 2.1.4 Fotografía de Dispositivo WEC.....	19
Figura 2.1.5 Variación del Periodo vs RP3M .....	20
Figura 2.1.6 Variación de la Altura de ola vs RP3M .....	20
Figura 2.1.7 Altura de ola Registrada en la Prueba No. 15 .....	23
Figura 2.1.8 Voltaje Medido para la Prueba No. 15.....	23
Figura 3.1.1 Prueba 97 Antes de Corrección por Mínimos Cuadrados.....	26
Figura 3.1.2 Prueba 97 Corregida .....	26
Figura 3.1.3 Prueba No. 82 (más eficiente).....	27
Figura 3.1.4 Prueba No. 85 (menos eficiente).....	28
Figura 3.1.5 Voltaje RMS para la Prueba No. 82.....	29
Figura 3.2.1 Gráfica Voltaje Adimensional .....	41
Figura 3.2.2 Gráfica Diámetro Adimensional .....	43
Figura 3.2.3 Gráfica Francobordo Adimensional.....	45



## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.3.1 Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica .....	3
Tabla 1.3.2 Aplicaciones de la Energía Solar Termoeléctrica .....	4
Tabla 1.3.3 Extracción de Biomasa.....	6
Tabla 2.1.1 Características Turbina Wells .....	18
Tabla 2.1.2 Condiciones de Oleaje.....	21
Tabla 2.1.3 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.70 m.....	21
Tabla 2.1.4 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.75 m.....	21
Tabla 2.1.5 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.80 m.....	21
Tabla 2.1.6 Duración de las Pruebas .....	22
Tabla 2.1.7 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.70 m .....	24
Tabla 2.1.8 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.75 m .....	24
Tabla 2.1.9 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.80 m .....	24
Tabla 3.1.1 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.70 m .....	28
Tabla 3.1.2 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.75 m .....	28
Tabla 3.1.3 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.80 m .....	29
Tabla 3.1.4 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.70 m.....	30
Tabla 3.1.5 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.75 m.....	30
Tabla 3.1.6 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.80 m.....	30
Tabla 3.1.7 Variables Utilizadas y sus Dimensiones .....	31
Tabla 3.2.1 Voltaje Adimensional.....	39
Tabla 3.2.2 Diámetro Adimensional .....	39
Tabla 3.2.3 Francobordo Adimensional .....	39





# **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

La generación de energía a partir de tecnologías alternativas en México es un campo de creciente desarrollo, en particular, el aprovechamiento de energía oceánica. El potencial energético disponible dentro de las costas mexicanas es de gran interés debido a la extensión litoral con la que cuenta (11,122 km) y las condiciones de oleaje que presentan algunos puntos del territorio como el Caribe y el norte de Yucatán [1]. Por lo anterior, parece razonable considerar este recurso como una fuente de energía que ayude a minimizar la dependencia existente hacia los combustibles fósiles.

Esta fuente se ha estudiado por décadas, realizando análisis y pruebas en pequeña escala, concluyendo que la energía proveniente de las olas, gradiente térmico, mareas y corrientes marinas son las más prometedoras [2]. Siendo el trabajo de investigación fundamental en el desarrollo y diseño de dispositivos de aprovechamiento energético, nuestro país ha invertido tiempo y recursos en los últimos años para diseño y desarrollo de estos. Uno de los pasos fundamentales en el desarrollo de WEC's es llevar a cabo pruebas de laboratorio en las cuales las condiciones se apegan un poco más a la realidad que la teoría básica. Estas pruebas ayudan a entender su funcionamiento y viabilidad para posteriormente realizar pruebas en campo.

El reto no es sencillo, puesto que se necesita fortalecer la infraestructura en los laboratorios para pruebas de modelos, así como encontrar la manera en que los dispositivos que lleguen a fase operativa mejoren su eficiencia y tengan funciones multipropósito acorde a las características del sitio de estudio para el que fueron diseñados [3].

El trabajo de investigación que aquí se presenta busca aportar un método con el cual se puedan diseñar dispositivos WEC tipo Columna Oscilante. Este tipo de dispositivos presentan la cualidad de contar con pocos componentes mecánicos y una alta eficiencia.

## **1.2. OBJETIVO PRINCIPAL Y PARTICULAR**

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar ecuaciones de diseño para un dispositivo WEC tipo Columna Oscilante -otorgado por el Instituto de Ciencias Físicas (ICF)- en las que se relacionen parámetros geométricos y mediciones de salida de voltaje obtenidos con diferentes estados de mar generados en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería (IINGEN) de la UNAM.

Como objetivo particular se pretende conocer las condiciones de oleaje con las que el dispositivo trabaja de manera estable, puesto que el fin para el que fue diseñado el convertidor es suministrar la energía eléctrica necesaria para protección catódica en ductos, plataformas petroleras, turbinas eólicas marinas, pilotes de muelles, etc.

### 1.3. ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son aquellas que se consideran virtualmente inagotables en cuanto a duración, pero limitadas en la cantidad de energía disponible por unidad de tiempo o espacio. El desarrollo de sistemas de energías renovables ha sido muy limitado debido a la excesiva dependencia que existe en la sociedad e industria sobre los combustibles fósiles. Actualmente las economías mundiales basan su desarrollo industrial, económico y tecnológico en la utilización de carbón, petróleo y gas natural.

Como resultado de los efectos del calentamiento global en los últimos años han tomado fuerza diferentes alternativas de generación de energía; creando una marcada tendencia mundial por contrarrestar dichos efectos apostando por el desarrollo de dispositivos de aprovechamiento energético que generen el desarrollo de sistemas sustentables. El desarrollo sustentable es un proceso a largo plazo en el cual se busca un equilibrio entre el ambiente y los recursos existentes, los cuales se han consumido irracionalmente. En 1987, la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (WCED - World Commission on Environment and Development) [4] presentó la siguiente definición sobre el desarrollo sustentable:

*El desarrollo sustentable hace referencia a la capacidad que haya desarrollado el sistema humano para satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer los recursos y oportunidades para el crecimiento y desarrollo de las generaciones futuras.*

La cita anterior describe el papel fundamental que jugaran las energías limpias en la correcta planificación de un futuro con recursos limitados, donde será primordial su optimización. Las principales fuentes de energía renovable se dividen principalmente en cinco grupos:

- Energía Solar
- Energía Eólica
- Energía de la Biomasa
- Energía Geotérmica
- Energía Hidráulica

En principio, la mayoría de las energías renovables provienen del sol, que es el motor generador de todos los ciclos que dan origen a las demás fuentes. Por ejemplo, la energía undimotriz no es más que energía solar transferida al aire, y de este al agua superficial del mar.

A continuación, se mencionará brevemente en que consiste cada una de estas formas de energía y las aplicaciones que éstas tienen actualmente.

#### 1.3.1. Energía Solar

La energía solar puede ser aprovechada de tres distintas formas: térmica, fotovoltaica y termoeléctrica; mientras que la primera genera calor, las otras dos producen electricidad. El proceso que utilizan y sus aplicaciones de cada una se describe a continuación.

##### *Energía Solar Térmica*

Aprovecha la radiación solar para calentar fluidos, siendo este calor almacenado o utilizado en el acto. Para su utilización se requieren mecanismos de transmisión de calor y dispositivos activos para

que sea factible captarlo y transferirlo a donde se requiera. Con el nivel tecnológico actual, es posible encontrar las siguientes aplicaciones en el mercado:

- Producción de agua caliente sanitaria
- Apoyo a la calefacción de edificios
- Climatización de piscinas
- Refrigeración
- Centrales de purificación de aguas residuales
- Cocinas solares

### *Energía Solar Fotovoltaica*

Se hace incidir la radiación sobre materiales semiconductores, produciéndose un flujo de electrones dentro del mismo, de tal manera que aparece un voltaje aprovechable para generar electricidad. El material de las celdas es principalmente de silicio mono o policristalino. Existen diferentes tipos de instalaciones en las que se puede aprovechar este tipo de energía, siendo utilizadas alrededor del mundo a nivel comercial [5].

En la Tabla 1.3.1 se especifica el tipo de implantación y el objetivo que persiguen las mismas.

**Tabla 1.3.1 Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica**

Aplicación	Descripción
<i>Instalaciones aisladas para consumo personal o local</i>	Diseñadas para generar energía en lugares en donde la red eléctrica es nula o se encuentra en condiciones deficientes. Este tipo de instalaciones permiten una producción eléctrica en el lugar en donde se requiere y al ser una demanda baja de energía este tipo de diseño los cubre de manera óptima.
<i>Instalaciones conectadas a la red</i>	Se trata de plantas con gran captación de energía fotovoltaica, la cual se traduce en gran cantidad de kW, los cuales son inyectados a la red nacional.
<i>Señalización y comunicaciones</i>	La energía producida tiene diferentes aplicaciones, como en la señalización de ferrocarriles, aeropuertos y carreteras; repetidores y emisores de radio, televisión y telefonía móvil; estaciones de muestreo de datos meteorológicos y alarmas; satélites geoestacionarios.

### *Energía Solar Termoeléctrica*

La radiación solar se capta en el foco de un receptor por el cual traslada un fluido caloportador. Tal fluido es sometido a un incremento muy alto de temperatura y mediante uso de un ciclo termodinámico es posible generar energía eléctrica, que suele ser inyectada a la red eléctrica. Los usos que tiene este tipo de energía se centran en aplicaciones de gran escala; algunas aplicaciones de la energía solar termoeléctrica se presentan en la Tabla 1.3.2.

**Tabla 1.3.2 Aplicaciones de la Energía Solar Termoelectrica**

Aplicación	Descripción
<i>Generación de Energía Eléctrica</i>	Es la forma de aprovechamiento más extendida en este tipo de energía. Se genera al sustituir la caldera de generación de vapor o el reactor de una planta nuclear por colectores de concentración solar, conservando toda la instalación termoelectrica. Cabe destacar que este método aprovecha todas las condiciones económicas y medio ambientales de la central.
<i>Producción de vapor y uso en procesos industriales de elevada temperatura</i>	Es necesario contar con vapor saturado o que cuente con una alta temperatura. Posteriormente con ayuda de un grupo de turbogeneradores se produce la electricidad.

### 1.3.2. Energía Eólica

Esta energía renovable aprovecha la energía cinética del aire a través de aerogeneradores. Para el aprovechamiento energético es necesario contar con álabes, los cuales se encuentran fijos a un rotor el cual, a su vez, gira de manera perpendicular a la dirección del flujo. La energía mecánica producida por la hélice se transforma en energía eléctrica por medio de un generador. El rango de producción de turbinas eólicas oscila entre los 600 kW y 3 MW de energía eléctrica.

Además de los componentes ya citados, para el funcionamiento correcto de un aerogenerador, es necesario contar con lo siguiente:

- *Freno:* Necesario para regular el funcionamiento de la instalación.
- *Torre:* Es la encargada de sustentar al aerogenerador. Mientras más alta sea la torre, la probabilidad de tener vientos de mayor velocidad y más estables aumenta. Su altura oscila entre 40 y 100 m y deben ser construidas con materiales resistentes como el acero.
- *Equipo de Control:* Encargado en controlar todo el aerogenerador, logrando que trabaje cuando la velocidad del viento pasa un mínimo fijado (4 m/s generalmente) y que se detenga cuando la velocidad supere un máximo (25 m/s aproximadamente).
- *Carcasa de Protección:* Dentro de la carcasa van incluidos la caja de engranajes, el freno, el generador y el equipo de control.

El viento al ser una energía cinética, se le puede aplicar la fórmula:  $E = \frac{1}{2} \cdot (m \cdot v^2)$ , es decir, la energía desarrollada por el viento es proporcional al cuadrado de su velocidad; mientras que la potencia es proporcional a su velocidad elevada al cubo. Sin embargo, existe un rango de trabajo (en función de la velocidad del viento) de los aerogeneradores, en donde se establece el funcionamiento que tendrá el sistema.

- *Velocidad Inferior:* Velocidad en la cual empieza a ser rentable poner en marcha el aerogenerador. Esta velocidad es de 4-5 m/s.
- *Velocidad Superior:* Velocidad máxima que soporta un aerogenerador para que no presente averías o accidentes. Esta velocidad suele ser no más de 25 m/s, aunque puede variar en función de que tan resistente sea la torre.
- *Velocidad Nominal:* Velocidad en la cual el aerogenerador alcanza su potencia máxima, siendo conveniente utilizar esta velocidad nominal, aunque aumente la velocidad del viento. Esta velocidad suele estar alrededor de los 15 m/s.

Además de la velocidad del viento, la potencia aprovechable depende de las características del aerogenerador y de las pérdidas mecánicas en la transmisión, siendo la eficiencia máxima posible del 59.25% [6]. Un ejemplo numérico de la eficiencia que puede tener un aerogenerador se puede ver en la Referencia [7], llevándose a cabo mediante el modelo probabilístico de Weibull, la eficiencia esperada fue del 42.75%.

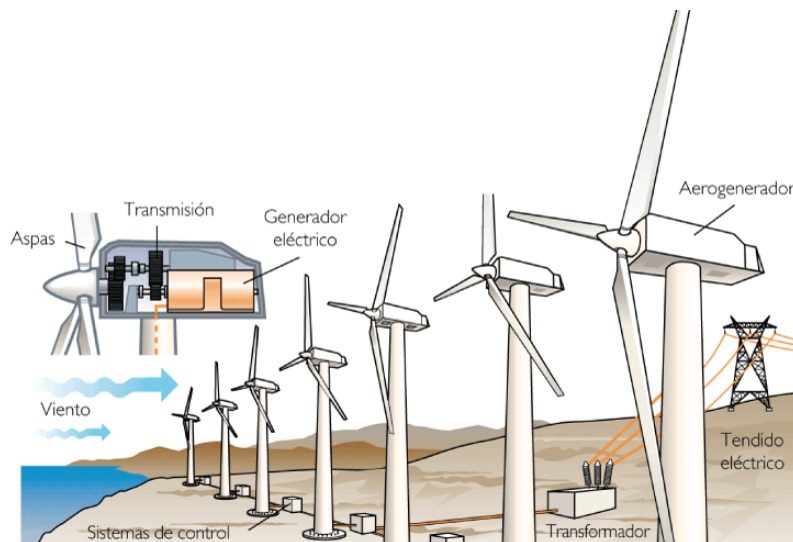
Actualmente, la energía producida por esta fuente es utilizada para:

- Suministro de energía a una vivienda o a una industria
- Almacenamiento en baterías
- Incorporación a la red eléctrica

### *Parques Eólicos*

Un parque eólico es un conjunto de aerogeneradores situados en un terreno apropiado, en el cual se ha estudiado previamente el viento predominante y el impacto que causa en el ambiente la instalación de una gran cantidad de turbinas. En la Figura 1.3.1 se muestra un parque eólico, siendo sus principales componentes los que se enlistan a continuación:

- *Aerogeneradores:* Encargado de producir electricidad a partir de la energía del viento.
- *Transformadores:* Elevan la tensión de la corriente eléctrica, para minimizar las pérdidas en el transporte.
- *Centro de Control:* Lugar donde se concentra toda la energía producida por los aerogeneradores para su control y distribución.
- *Toma de Tierra:* Encargada de eliminar la electricidad estática producida.



**Figura 1.3.1 Componentes principales de un Aerogenerador y un Parque Eólico [8]**

La tecnología de generación a partir de energía eólica se mejora constantemente, siguiendo en fase de investigación nuevos diseños y materiales. En Europa, para el 2020 se tiene por objetivo alcanzar un 20% [6] de la demanda eléctrica con energías renovables, apoyándose principalmente en la eólica; mientras que en Estados Unidos, para el año 2030 se espera que sea su principal fuente de energía.

### 1.3.3. Energía de la Biomasa

Se entiende por biomasa al conjunto de materia orgánica de origen vegetal y animal procedente de la transformación natural o artificial de esta. Cualquier tipo de biomasa proviene de la reacción de la fotosíntesis en donde se aprovecha la energía proveniente del sol por plantas y animales para generar subproductos que sirven para generar combustibles con diferentes requerimientos energéticos. A la biomasa se le puede extraer energía en tres estados de la materia: sólida, líquida y gaseosa. En la Tabla 1.3.3 se muestran algunos ejemplos.

**Tabla 1.3.3 Extracción de Biomasa**

<b>Estado</b>	<b>Ejemplos</b>
<i>Sólida</i>	Pellets, briquetas, huesos de aceituna, restos vegetales de podas
<i>Líquida</i>	Biodiésel, bioetanol, gasoil y la gasolina
<i>Gaseosa</i>	Biogás, Biohidrógeno

Debido a que se puede encontrar en tres diferentes estados y tratar de diferentes maneras, es posible darle diferentes aplicaciones, desde domésticas hasta industriales.

- *Combustión directa:* Se trata de biomasa sólida que tiene por objetivo fines térmicos, ya sea en pequeñas estufas o en potentes calderas de lecho fluidizado.
- *Obtención de combustibles renovables por medios termoquímicos:* Esto es posible si se transforma la biomasa bajo condiciones específicas de presión y temperatura, obteniendo productos sólidos, líquidos o gaseosos.
- *Obtención de derivados energéticos por medios bioquímicos:* Se utiliza la fermentación anaeróbica de residuos biodegradables para la generación de biogás, así como la obtención de metanol mediante la fermentación bio-alcohólica de amiláceos azucarados.
- *Otros aprovechamientos:* Aceites vegetales usados en la automoción.

A continuación, en la Figura 1.3.2 se presenta un diagrama en donde se muestran los procesos de aprovechamiento de la biomasa y los productos que generan.

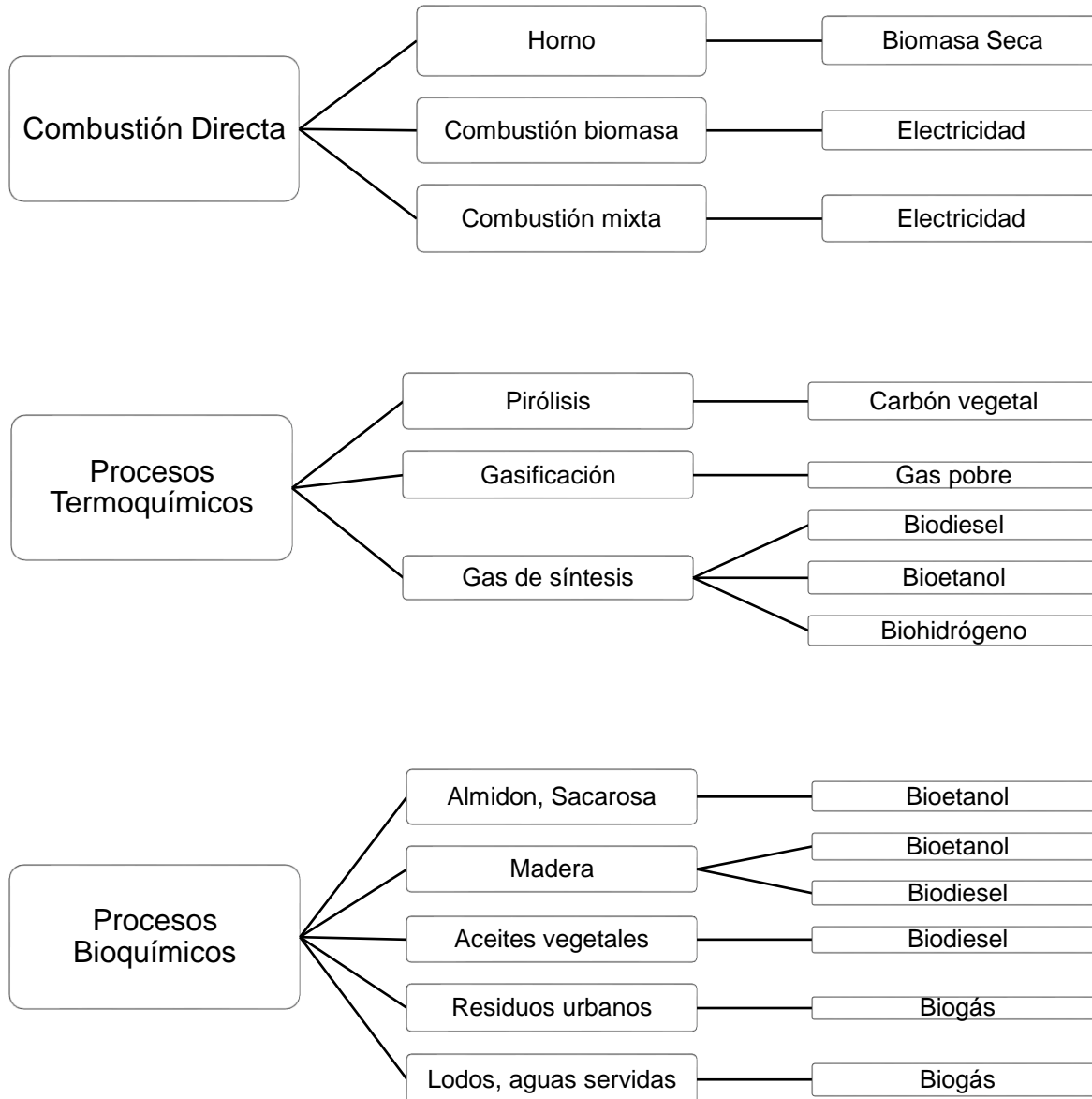


Figura 1.3.2 Proceso de Aprovechamiento de Biomasa en Biocombustibles [9]

### 1.3.4. Energía Geotérmica

La energía geotérmica es aquella que se obtiene del calor natural interno de la tierra. La manera de aprovechar esta fuente es con técnicas como: la perforación de acuíferos, la impulsión de agua fría y vapor entre rocas calientes. El calor capturado en forma de vapor es utilizado para generar energía eléctrica con ayuda de un turbogenerador. Las aplicaciones que se le puede dar quedan en función de su temperatura:

- *Alta temperatura:* Con una temperatura entre los 150 y 400 °C se puede generar vapor en la superficie donde los grupos de turbogeneradores se encargan de generar la energía eléctrica.

- *Mediana temperatura:* Teniendo una temperatura entre los 70-150 °C la conversión vapor-electricidad tiene un menor rendimiento. Este método es usado en pequeñas centrales eléctricas.
- *Baja temperatura:* Los fluidos están a temperaturas de 60-80 °C. El aprovechamiento de este tipo de temperaturas está enfocado a la calefacción de viviendas, edificios e instalaciones. Una de las ventajas que encontramos en esta temperatura es que es aprovechable en zonas más extensas que las otras.
- *Muy baja temperatura:* Con temperaturas entre los 20 y 60 °C tienen aplicaciones enfocadas a las necesidades domesticas o turísticas como balnearios y spas.

Existen dos clases de ciclos para una planta geotérmica: vapor y agua caliente. En la primera el vapor seco obtenido de los pozos se lleva directamente a las turbinas para producir energía eléctrica; mientras que para la de agua caliente existen tres ciclos de generación: flash simple, flash doble y ciclo binario, basándose la de flash simple y doble en la evaporación súbita y la de ciclo binario trabajando con un fluido de bajo punto de ebullición, el cual se evapora debido al calor cedido por el fluido geotérmico conduciéndose hacia la turbina, donde se genera electricidad. Ambas dependen de las características del fluido geotérmico

Los elementos necesarios para un proyecto geo-termoeléctrico son:

- Localización del recurso a profundidades técnica y económicamente explotables (menos de 3000 m).
- Entalpia alta del fluido, temperatura del yacimiento mayor de 200 °C.
- Potencial adecuado para alimentar unidades de suficiente capacidad para el sistema eléctrico, siendo deseable una generación mayor a los 15 MW.
- Bajo contenido de gases incondensables.
- Características corrosivas e incrustantes del fluido, compatibles con el proceso de producción eléctrica.

En la Figura 1.3.3 se muestra la central geotérmica “Cerro Prieto”, ubicada en Baja California Norte, la cual genera 4100 GWh anualmente.



**Figura 1.3.3 Central Geotérmica “Cerro Prieto” [10]**



### 1.3.5. Energía Hidráulica

La energía hidráulica es la fuente renovable más utilizada en el mundo, la cual aprovecha la energía cinética y potencial del agua para la generación de energía eléctrica. Entre los beneficios de esta forma de producir energía se encuentra que no genera residuos, es sencilla de controlar y tiene una eficiencia muy alta, siendo esta aproximadamente del 80% en la mayoría de los casos. Sin embargo, el uso excesivo de la misma tiene como consecuencia crear un desequilibrio ambiental en la zona donde se utilice.

#### *Centrales Hidroeléctricas*

Actualmente, las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar en dos categorías: embalse y agua fluyente. En la Figura 1.3.4 se muestra una central de embalse, siendo sus principales componentes los que se enlistan a continuación:

- *Embalse:* Depósito de agua formado de manera artificial en donde se cierra la boca de un valle por medio de una cortina, logrando almacenar el agua proveniente de un río o arroyo.
- *Presa:* Estructura diseñada para contener el agua del embalse. Puede ser construida con diferentes materiales como concreto, rocas, gravas, arenas, limos y arcillas, quedando en función de las condiciones del sitio en donde se desea construir.
- *Rejillas de Filtrado:* Tienen por función retener las partes sólidas que pueda llevar el agua, logrando así proteger la turbina de sufrir cualquier daño.
- *Turbina:* Tiene por función aprovechar la energía del agua que pasa a través de ella para producir un movimiento de rotación que, mediante un eje de transmisión, acciona un generador.
- *Generador:* Máquina eléctrica rotativa que transforma la energía mecánica en eléctrica
- *Transformador:* Dispositivo eléctrico con el cual se puede cambiar las amplitudes relativas de voltaje y corriente en un circuito de corriente alterna.

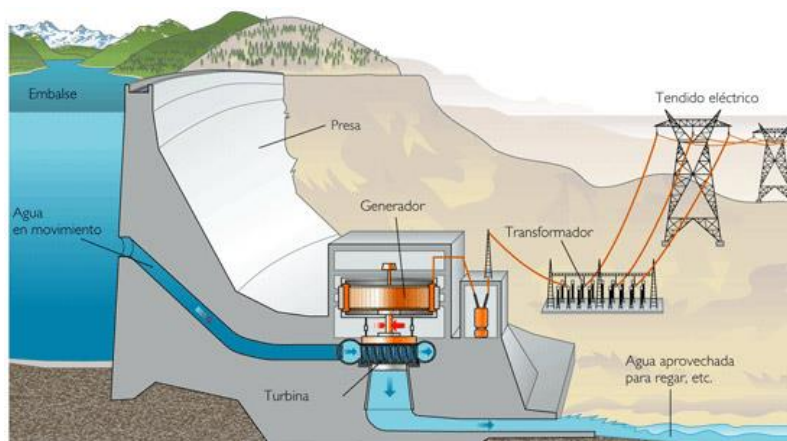


Figura 1.3.4 Esquema de una Central Hidroeléctrica de Embalse [11]

Las centrales de embalse se pueden clasificar según su tamaño y al sector al que van dirigidas.

- *Centrales grandes*: Su capacidad de producción es mayor a los 50 MW, tienen por objetivo abastecer de energía un porcentaje importante de las necesidades de un país. Como ejemplo de estas se pueden mencionar: la presa Hoover (EUA), la central de Itaipú (Brasil-Paraguay) y la de las tres gargantas (China).
- *Centrales medianas*: Son plantas cuya capacidad está comprendida entre los 10 a 50 MW, su función básicamente es abastecer de electricidad a grupos urbanos moderados.

A diferencia de las centrales de embalse, las centrales de agua fluvente no almacenan agua, sino que se desvía el río con ayuda de una presa en un punto determinado del mismo y se conduce el agua a la casa de máquinas con ayuda de un canal y una tubería a presión. Luego de pasar por la turbina, el agua se reincorpora a su cauce natural.

Este tipo de centrales son conocidas como mini hidroeléctricas teniendo una capacidad de generación no mayor a los 10 MW, ya que la potencia que puede generar está en función directa con el gasto que pase por el río. Son las plantas que presentan menos problemas medioambientales pues, al ser pequeñas, no hacen cambios bruscos en la flora y fauna de la región ni desvían los ríos de su cauce. En la Figura 1.3.5 se muestra un ejemplo de este tipo de centrales.

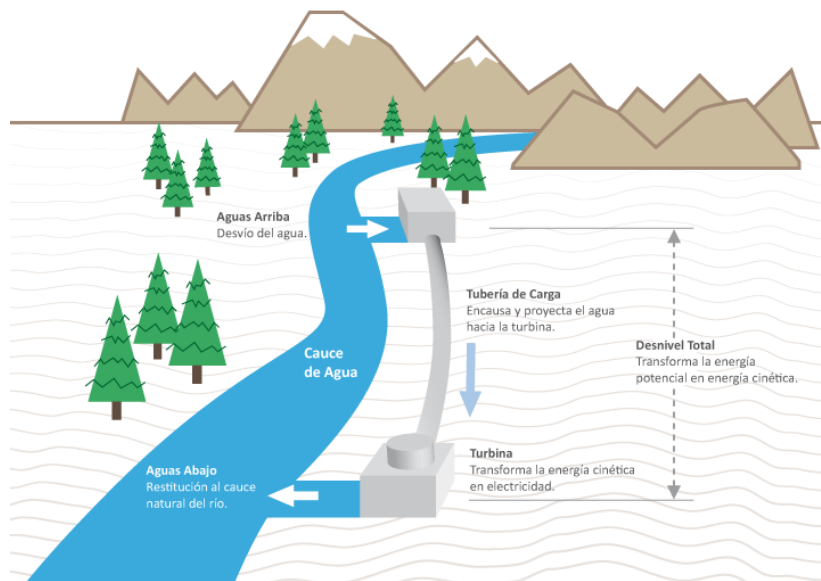


Figura 1.3.5 Esquema de Central Hidroeléctrica de Agua Fluvente [12]

### 1.3.6. Energía Oceánica

Existen diferentes fuentes de energía disponibles en el mar: corrientes marinas, mareas, oleaje, gradiente térmico y salino, generando electricidad de diferentes formas: turbinas, ciclos termodinámicos o principios hidráulicos.

A nivel mundial se ha mostrado un acelerado desarrollo en tecnologías para aprovechar estas fuentes de energía, impulsado por las grandes inversiones que se hacen para optimizar los dispositivos. Desde 1970 se han realizado numerosos experimentos en plantas piloto que buscan mejorar los procesos de extracción de energía, existiendo un gran número de casos que han llegado a operar de manera comercial tales como la planta Mareomotriz Sihwa en Corea del Sur o la planta OTEC Makai en Hawái.

De manera breve, se describirán las formas de extracción de energía más utilizadas en la actualidad.

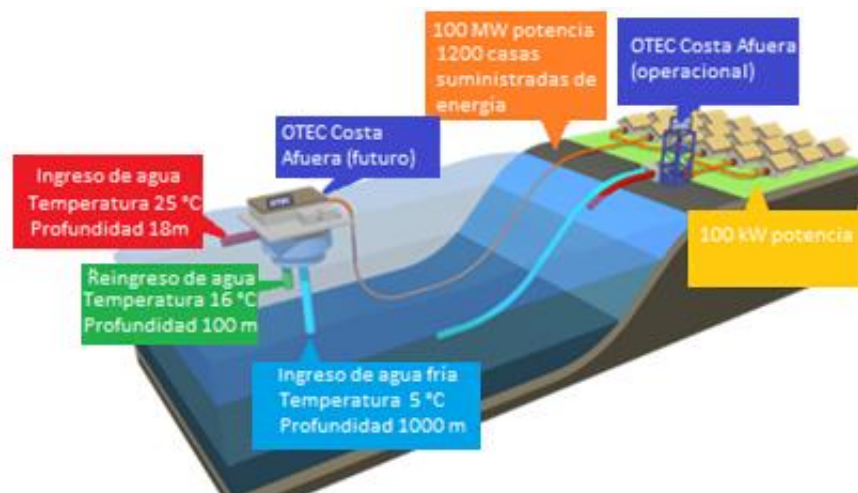
### *Energía por Gradiente Térmico*

Consiste en transformar el calor almacenado en la superficie del mar en energía eléctrica, utilizando ciclos termodinámicos abiertos, cerrados o híbridos los cuales se encargan de aprovechar gradientes térmicos. En el ciclo abierto, el fluido con el que se opera es el que se encuentra en la superficie del mar; en el ciclo cerrado se utilizan fluidos como el amoníaco o propano, mientras el ciclo híbrido es una combinación de las dos anteriores.

El sistema funciona de la siguiente manera:

1. El agua de la superficie se convierte en vapor por la energía solar que recibe.
2. El vapor de agua mueve una turbina y genera electricidad.
3. El vapor en la cámara de condensación se enfría mediante agua fría del fondo del mar, obteniendo agua desalada.

Es posible utilizar este sistema cuando la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y del fondo marino es de 20 °C [13], siendo esta condición, su mayor inconveniente. Sin embargo, puede producir agua dulce en zonas con problemas de agua potable y gracias a su sistema se pueden sacar minerales que estén debajo del océano. En la Figura 1.3.6 se muestra el funcionamiento de la planta OTEC Makai ubicada en Hawái, la cual fue puesta en operación en 2015. La capacidad de generación de dicha planta es de 100 MW.



**Figura 1.3.6** Planta OTEC en Makai, Hawái [14]

### *Energía de Mareas*

La energía potencial del diferencial de altura entre pleamar y bajamar se transforma en energía cinética, la cual genera energía eléctrica a través de una turbina. Las centrales mareomotrices se colocan generalmente en bahías, aprovechando la estrechez para colocar un dique y conseguir almacenar agua cuando sube la marea. El agua se almacena mediante una serie de compuertas y esta se libera cuando hay marea baja, la cual pasa por la turbina y genera electricidad. Los componentes necesarios para una central mareomotriz son:

- Diques
- Compuertas
- Turbinas
- Generadores
- Sistemas de Control



**Figura 1.3.7 Central Mareomotriz Sihwa, Corea del Sur [15]**

En la Figura 1.3.7 se muestra la central mareomotriz Sihwa, ubicada en el lago artificial Sihwa que se conecta al mar en Seúl. Esta planta tiene una capacidad de generación de 254 MW. Este tipo de sistema se puede utilizar en lugares donde exista una diferencia de mareas de al menos 5 metros [16]. Existen inconvenientes ambientales derivados de este tipo de energía, como impedir la emigración de peces y bloquear la navegación.

El desarrollo del presente trabajo se llevó a cabo utilizando un dispositivo WEC tipo Columna Oscilante, el cual tiene por objetivo el aprovechamiento energético undimotriz. Por lo anterior, en el siguiente subcapítulo se muestra una descripción detallada de este tipo de energía oceánica, así como sus principales características y puntos a considerar.

#### 1.4. Energía Undimotriz

Los primeros dispositivos diseñados para aprovechar la fuerza del oleaje datan del siglo XIII, en China, donde se impulsaban molinos gracias a la fuerza del mar. En el siglo XX, el francés Bouchaux-Pacei consigue producir electricidad mediante un sistema neumático similar a las actuales OWC. Análogamente, se llevaron a cabo varias pruebas con sistemas mecánicos tanto en California como en Japón, donde se ensayó, en 1920, un motor pendular. En el año 1921 el Instituto Oceanográfico de Mónaco utilizó una bomba eléctrica movida gracias a las olas para impulsar agua hasta una cota de 60 m con una potencia de 400 W. Uno de los pioneros de la energía undimotriz fue el ingeniero japonés Yoshio Masuda (1925-2009), que empezó sus trabajos de investigación en la segunda mitad de los años cuarenta realizando ensayos en el mar. Desarrolló un motor impulsado por la energía de las olas, equipada con una turbina de aire que se conoció más tarde como OWC. Casi una década después, en el año 1958, se proyectó una central de una potencia considerable (20 MW) para la época, en la isla Mauricio, que nunca llegó a construirse.

En 1965 se comercializó a gran escala el invento de Masuda, siendo los primeros dispositivos que se desplegaron en el mar de manera exitosa. Las boyas de navegación estaban equipadas con una turbina de aire unidireccional convencional, lo cual era un problema ya que requería un sistema de válvulas de no retorno para su correcto funcionamiento. En la década de 1970 se desarrolló un sistema neumático que permitía recargar las baterías de las boyas de navegación gracias a turbinas de una potencia de 60 W, la producción superó las 1200 unidades. Como resultado del conocimiento adquirido con estos estudios, se construyó en Japón una plataforma flotante, de 12 m de ancho por 80 m de largo, de nombre Kaimei, siendo el primer WEC a gran escala que se desplegó en el mar, construido por el Centro Japonés de Ciencia y Tecnología Marina [17].

En Europa, los primeros estudios para desarrollar tecnología WEC se llevaron a cabo en 1973 debido a que se estaba viviendo una crisis de petróleo años antes, lo cual generó un gran interés por parte de académicos y científicos del Reino Unido por desarrollar esta tecnología, planteándose un ambicioso proyecto el cual consistía en generar 2 GW de energía. Se financió el desarrollo de varios tipos de WEC, incluidos los OWC. El Laboratorio Nacional de Ingeniería, en Escocia, estudió diferentes conceptos para una gran planta de OWC. Esto pareció dirigirse a un diseño que consistía en un conjunto de estructuras de pie, con forma de rompeolas, cada una de las cuales contenía una serie de OWC (para entonces, la turbina de Wells ya se había inventado).

La implementación de las turbinas Wells marcaron un parteaguas en el uso de dispositivos OWC debido a que eliminaban el problema que traían consigo las turbinas de aire convencionales ya que éstas tenían la capacidad de girar constantemente en una sola dirección, independientemente de la dirección del flujo de aire. En 1985 se instaló un OWC de tamaño completo integrado en un acantilado en Toftestallen, cerca de Bergen, equipado con una turbina Wells de eje vertical, y potencia nominal de 500 kW. La planta fue destruida en 1988 durante una tormenta debido a una falla en la conexión atornillada de la estructura de acero a la cimentación de concreto. A principios de la década de 1990, la actividad en Europa se mantuvo principalmente a nivel académico, siendo el logro más importante una pequeña planta que generaba 75 kW [18].

Aún son pocas las instalaciones que están en fase operativa, sigue faltando experiencia y conocimiento práctico con modelos. No obstante, teniendo en cuenta todas las técnicas ya desarrolladas para el aprovechamiento undimotriz se destacan un conjunto de proyectos que son fundamentales para futuras investigaciones, los cuales se describen a continuación.

- **Pelamis:** Es una estructura semisumergida y articulada, compuesta por secciones unidas por juntas de bisagra; el movimiento de estas juntas acciona arietes hidráulicos que bombean aceite a alta presión a través de motores hidráulicos. Estos motores actúan sobre generadores que producen electricidad. La estructura se mantiene en posición por un sistema de anclaje compuesto por pesas que previene que los cables de anclaje estén tensos al mantener el Pelamis en su posición y que además permite un movimiento de vaivén con las olas entrantes. El prototipo genera 750 kW, tiene un largo de 120 m y un diámetro de 3.5 m, contiene tres módulos de conversión de energía, de 250 kW cada uno. En el 2008 se inauguró la primera fase de este dispositivo y se conectó a la red eléctrica en una costa portuguesa cerca de la ciudad de Povoá de Varzim, pero debido a dificultades técnicas y financieras el proyecto terminó en el año 2009 [9]. La Figura 1.4.1 ilustra el dispositivo



Figura 1.4.1 Dispositivo Atenuador: Pelamis [19]

- **Salter Duck:** Genera electricidad a través del movimiento armónico de la parte flotante del dispositivo, contrariamente al de los sistemas fijos, que utilizan una turbina que se activa por el movimiento de la ola. En estos sistemas, los dispositivos suben y bajan de acuerdo con el movimiento de la ola, generando así electricidad [9]. La Figura 1.4.2 ilustra el dispositivo

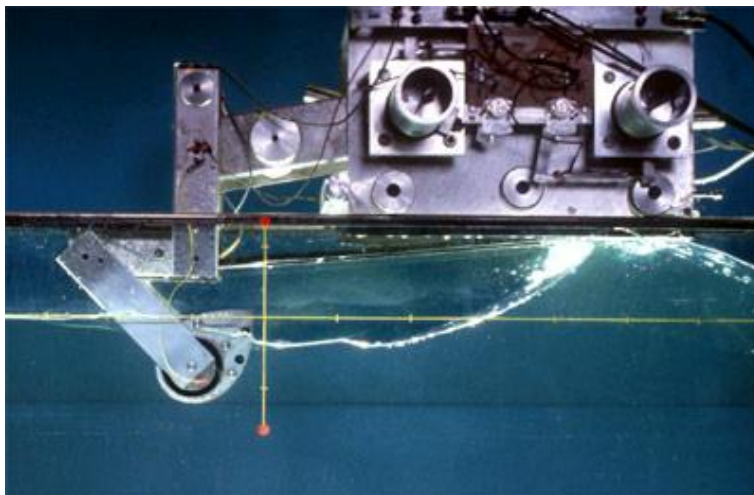


Figura 1.4.2 Dispositivo Terminador: Salter Duck [20]

- **Archimedes Wave Swing:** Está formado por dos cilindros: uno que se encuentra fijo al suelo marino y otro que actúa como flotador moviéndose verticalmente por efecto de las olas (principio de Arquímedes). De forma simultánea, los imanes ubicados en el cilindro superior se mueven a lo largo de una bobina, logrando que el movimiento del flotador se reduzca y genere electricidad. El interior del AWS está lleno de aire y cuando el cilindro superior se mueve hacia abajo, el aire interior se presuriza, generando una fuerza contraria a la fuerza del cilindro superior al subir nuevamente. Para las olas largas, la amplificación puede ser tres veces la elevación de la ola, y es mayor para las olas cortas. La amplificación puede compararse con el efecto de un columpio. Si se empuja un columpio en el momento exacto, el movimiento se amplificará. Un proyecto piloto se desarrolló cerca de la costa portuguesa de Viana do Castelo en el año 2004 y se conectó a la red con una potencia de 2 MW [9]. La Figura 1.4.3 ilustra el dispositivo

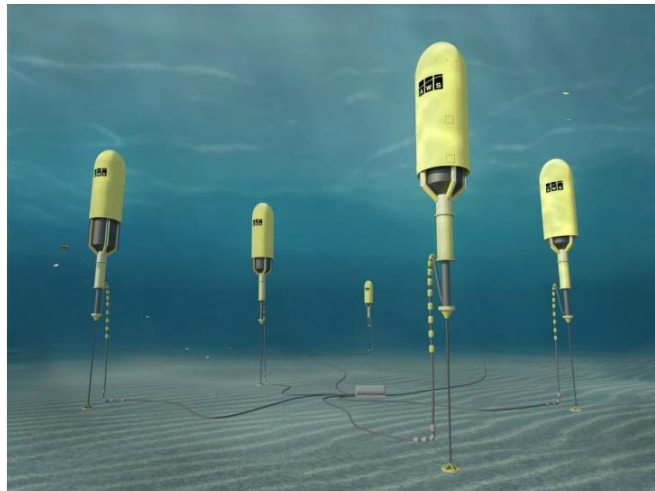


Figura 1.4.3 Dispositivo Sumergido: Archimedes Wave Swing [21]

#### 1.4.1. Tipos de Dispositivos WEC

Los dispositivos WEC se clasifican de acuerdo con su ubicación y diseño [22].

##### Ubicación

- *En la Costa (<10 m):* Aislados o en Dique
- *Cerca de la Costa (10 a 40 m):* Apoyados o Flotando
- *En el mar (>40 m):* Flotando o Sumergidos

##### Diseño

- *Atenuadores:* Grupo de estructuras flotantes colocadas de forma paralela a la dirección del oleaje predominante, aprovechando la energía generada por el movimiento del dispositivo con ayuda de una turbina o algún otro convertidor de energía. Gracias a un cable conectado a la estructura y que llega a la orilla atravesando el fondo del océano, es posible llevar la energía producida a la red eléctrica.
- *Boyas de absorción:* Estructura flotante la cual consiste en una boya dentro de un cilindro el cual sube y baja de acuerdo con la longitud de onda; gracias a este movimiento es posible impulsar un sistema hidráulico el cual genera electricidad. Dependiendo de la

diferencia de presiones, el dispositivo puede estar sumergido o quedar arriba de la superficie del mar

- *Terminadores:* Su función consiste en capturar el agua a medida que las olas se rompen en un depósito de almacenamiento. Esta estructura se coloca de manera perpendicular a la dirección del oleaje para este fin. El agua que ingresa es devuelta al mar pasando a través de una turbina la cual genera energía eléctrica.

Un dispositivo que se ubica en la costa para aprovechar la energía del oleaje es la columna de agua oscilante (OWC); en este dispositivo la ola entra a la columna, fuerza el aire de la columna a pasar por una turbina e incrementa la presión dentro de la misma; al momento en que sale la ola, el aire vuelve a pasar por la turbina debido a la disminución de la presión de aire. Este tipo de dispositivos utilizan una turbina tipo Wells, lo que implica que no importa la dirección de la corriente de aire, la turbina siempre girará en una dirección y el generador producirá electricidad [16].

En la Figura 1.4.4 se muestra un esquema de este tipo de dispositivos, siendo sus componentes principales los que se enlistan a continuación:

- Una boca para la entrada de agua
- Un muro de protección frente a olas muy altas
- Una cámara de aire, que es empujado por las olas hacia la turbina
- Una turbina que genera electricidad

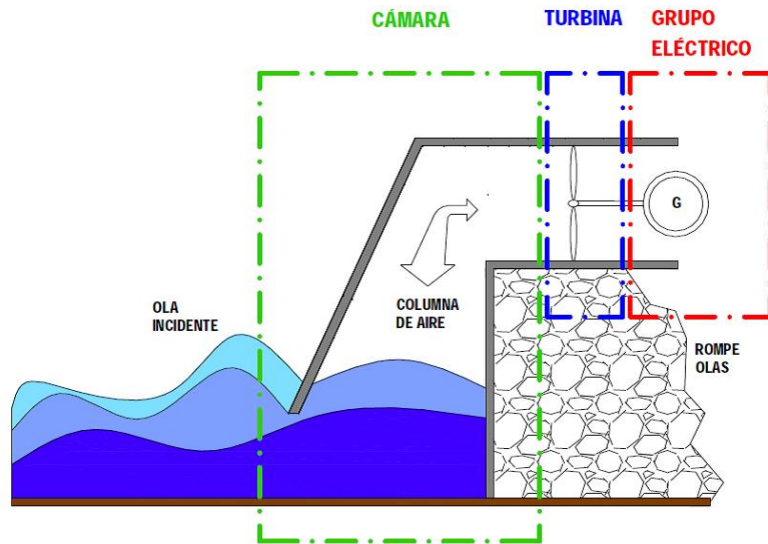


Figura 1.4.4 Convertidor Columna de Agua Oscilante (OWC) [23]



## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

### 2.1. MODELO EXPERIMENTAL

Actualmente, cualquier obra de ingeniería hidráulica requiere estudios en modelo que permitan probar su funcionamiento y detectar las fallas que se pueden presentar, por lo que al hacer un experimento, es importante seguir los siguientes pasos [24]:

- Planear el experimento
- Controlar las variables
- Tomar datos adecuados
- Detectar problemas
- Interpretar los resultados

Una planeación adecuada considera factibilidad, costo y un programa que con el mínimo esfuerzo se obtenga toda la información posible. Para esto, resulta necesario tener una serie de variables controladas a fin de observar sus efectos, y conocer cuál generó una mayor influencia sobre los resultados, procurando que las mediciones sean precisas y corregir en la medida de lo posible los errores que se llegaran a presentar durante la experimentación. Finalmente, se interpretan los resultados.

El experimento realizado con el dispositivo WEC en el Laboratorio de Puertos y Costas del Instituto de Ingeniería de la UNAM, procuró seguir todas estas recomendaciones, controlando variables tales como la altura significativa  $H_s$ , profundidad  $h$  y periodo  $T$ . A continuación, se describe brevemente el equipo y el software utilizado en la experimentación.

Un canal de simulación de oleaje, de 37 m de largo, 0.8 de ancho y 1.2 de alto; el material de construcción de los costados del canal es acero inoxidable. El sistema de generación de oleaje está compuesto de dos elementos principales: una pala generadora de acero inoxidable tipo pistón montada debajo de un transmisor de accionamiento eléctrico, los cuales se encuentran empotrados en un extremo de la pala; y el software Vázquez y Torres Ingeniería, el cual permite especificar parámetros de entrada como la altura significativa, periodo, espectro del oleaje, entre otros. Se colocaron 6 sensores de nivel a lo largo del canal, cuatro antes del dispositivo y dos después de este. Mediante el software IMC Studio se obtuvieron los registros de dichos sensores. La ubicación de los sensores y del dispositivo se muestra en la Figura 2.1.1.

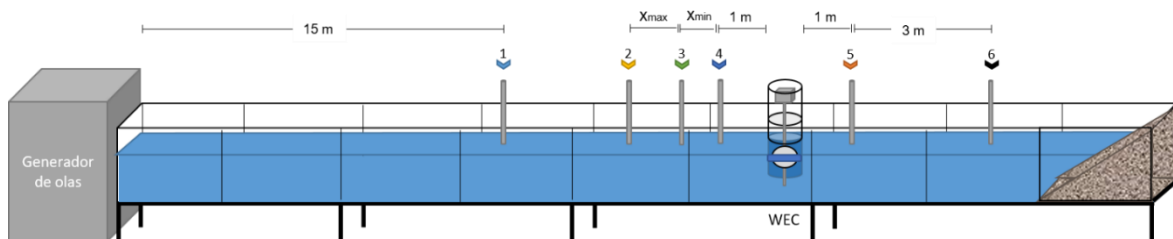
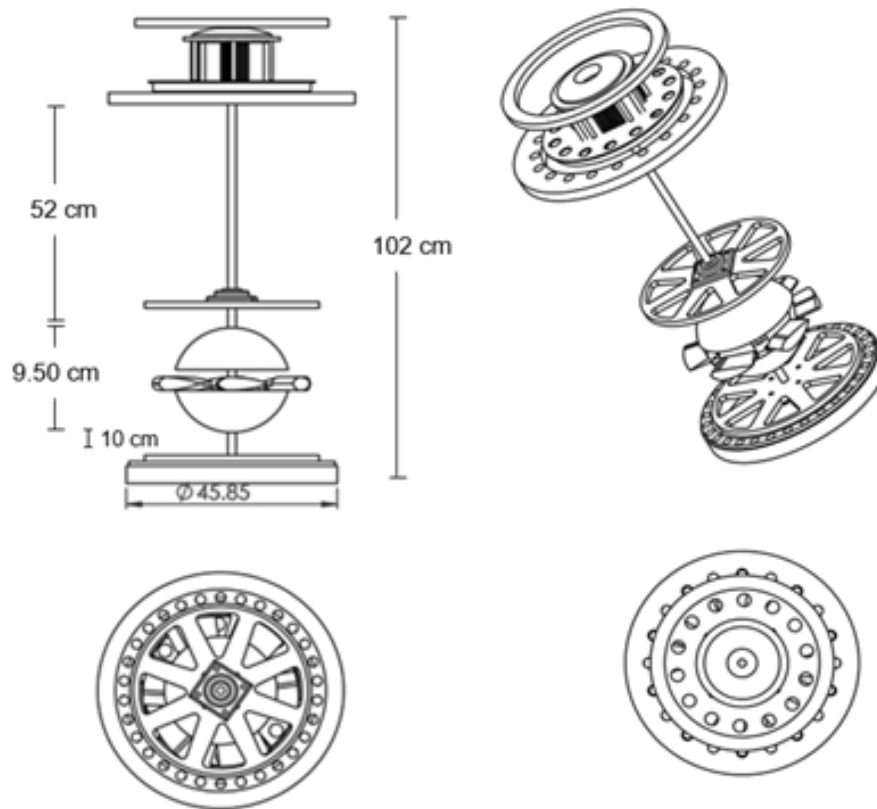


Figura 2.1.1 Canal de Olas

### 2.1.1. Descripción del Dispositivo

De manera general, el dispositivo consta de un generador trifásico, una protección de acrílico, un tubo acoplador y una turbina Wells de acrílico; en la Figura 2.1.2 se muestran las componentes principales del dispositivo.



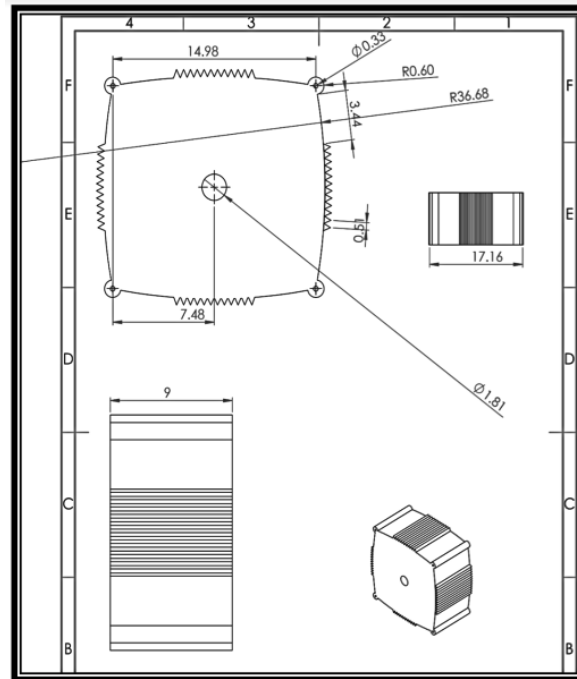
**Figura 2.1.2 Componentes de Dispositivo WEC**

La turbina Wells tiene las características descritas en la Tabla 2.1.1.

**Tabla 2.1.1 Características Turbina Wells**

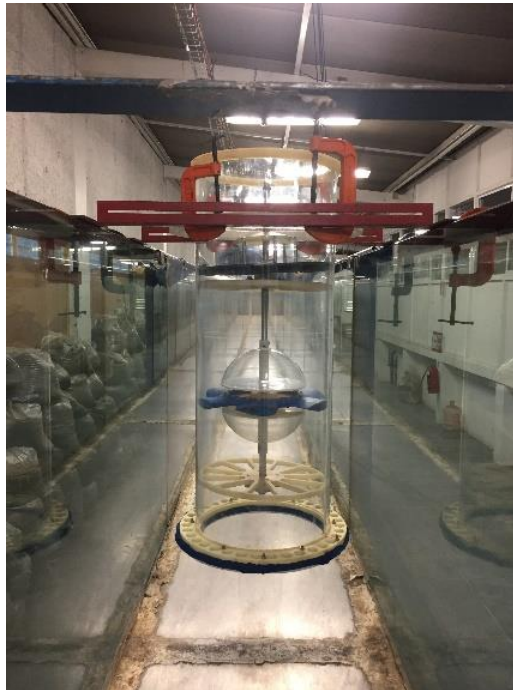
Parámetro	Valor
Radio del Rotor [cm]	0.85
Diámetro del eje [cm]	1.80
Área de Barrido [cm <sup>2</sup> ]	35.22
Número de Aspas [1]	6
Perfil Aerodinámico	NACA 0018
Línea de Cuerda [cm]	11
Material de Álabes	PETG

El generador utilizado es trifásico de imanes permanentes (PMSG) diseñado por Windzilla, el cual se muestra en la Figura 2.1.3.



**Figura 2.1.3 Plano Generador Trifásico**

En la Figura 2.1.4 se muestra la instalación de la turbina en el canal de oleaje, la cual se llevó a cabo con postes y prensas metálicas que garantizaron que el movimiento fuera casi nulo a lo largo de las pruebas.



**Figura 2.1.4 Fotografía de Dispositivo WEC**

2.1.2. Mediciones

El primer paso para la caracterización del dispositivo fue definir una matriz de experimentos que abarcó las capacidades de la pala generadora y del canal; es decir, se varió la profundidad  $h$ , el periodo  $T$  y la altura significativa  $H_s$  con la intención de identificar el rango de cada una de estas variables en el que la turbina daba al menos una vuelta. Se realizaron 60 pruebas con una duración de 3 minutos cada una y el resultado permitió identificar las condiciones en las que el dispositivo respondía de manera favorable. Para el análisis de los resultados se tomaron dos parámetros adimensionales, uno que involucrara la variación del periodo ( $kh$ ) y el otro la variación de la altura de ola ( $H_s/L$ ). En las Figuras 2.1.5 y 2.1.6 se muestran las gráficas de los dos parámetros mencionados anteriormente contra el número de vueltas de la turbina que se registraron (RP3M).

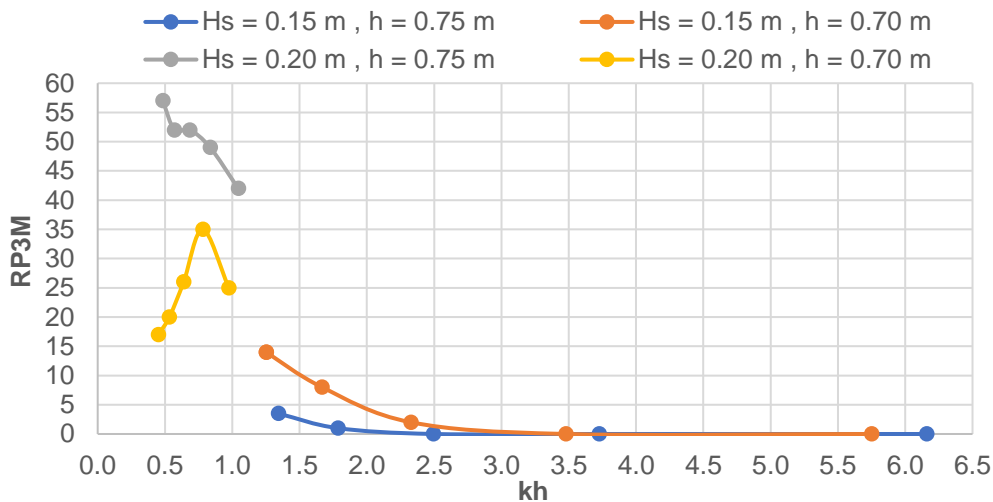


Figura 2.1.5 Variación del Periodo vs RP3M

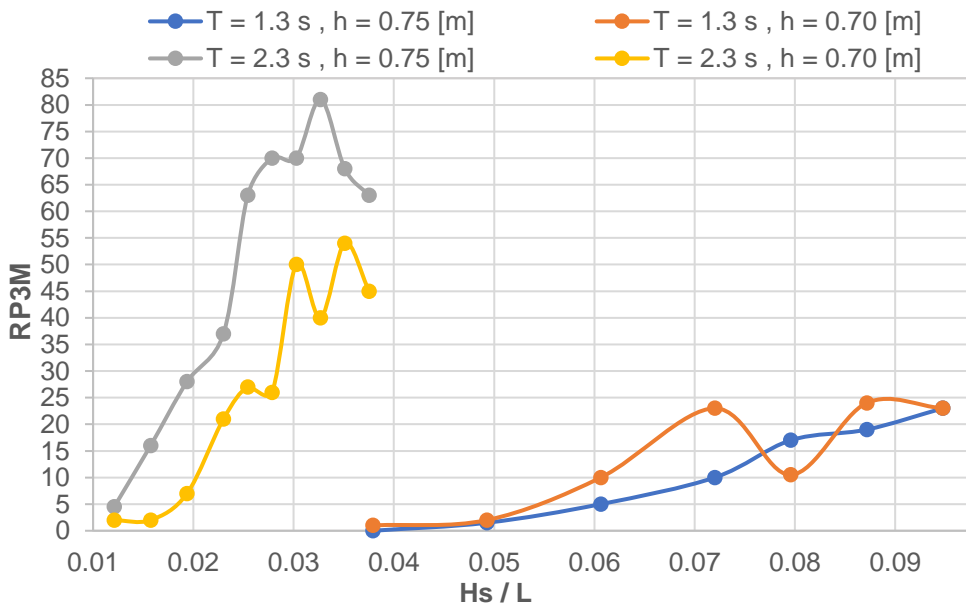


Figura 2.1.6 Variación de la Altura de ola vs RP3M

El siguiente paso, fue elaborar una segunda matriz de experimentos enfocados en las condiciones que provocaron que la turbina diera más vueltas. En dicha matriz se consideraron 7 diferentes periodos, 6 diferentes alturas de ola significantes y 3 profundidades. Se realizaron 126 pruebas utilizando ahora el generador trifásico para tomar mediciones de voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$  en cada prueba. En la Tabla 2.1.2 se muestran las condiciones de oleaje asignadas.

**Tabla 2.1.2 Condiciones de Oleaje**

Diseño experimental							
h [m]	0.7		0.75		0.8		
Hs [m]	0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3	
T [s]	1.7	1.8	1.9	2	2.1	2.2	2.3

En las Tablas 2.1.3, 2.1.4 y 2.1.5 se muestra el número de prueba asignado de acuerdo con las condiciones de oleaje que se simularan en el canal de oleaje.

**Tabla 2.1.3 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.70 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	1	8	15	22	29	36
	1.8	2	9	16	23	30	37
	1.9	3	10	17	24	31	38
	2	4	11	18	25	32	39
	2.1	5	12	19	26	33	40
	2.2	6	13	20	27	34	41
	2.3	7	14	21	28	35	42

**Tabla 2.1.4 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.75 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	43	50	57	64	71	78
	1.8	44	51	58	65	72	79
	1.9	45	52	59	66	73	80
	2	46	53	60	67	74	81
	2.1	47	54	61	68	75	82
	2.2	48	55	62	69	76	83
	2.3	49	56	63	70	77	84

**Tabla 2.1.5 No. de Prueba Asignado para una Profundidad de 0.80 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	85	92	99	106	113	120
	1.8	86	93	100	107	114	121
	1.9	87	94	101	108	115	122
	2	88	95	102	109	116	123
	2.1	89	96	103	110	117	124

	<b>2.2</b>	90	97	104	111	118	125
	<b>2.3</b>	91	98	105	112	119	126

Para cada prueba se consideró una generación de 200 olas, quedando la duración de cada prueba en función de su periodo de acuerdo con la siguiente expresión:

$$t [\text{mín}] \cong T \cdot 200 \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

La duración de las pruebas se muestra en la Tabla 2.1.6.

**Tabla 2.1.6 Duración de las Pruebas**

Periodo [T]	Duración de prueba [mín]
1.7	6
1.8	6
1.9	7
2.0	7
2.1	7
2.2	8
2.3	8

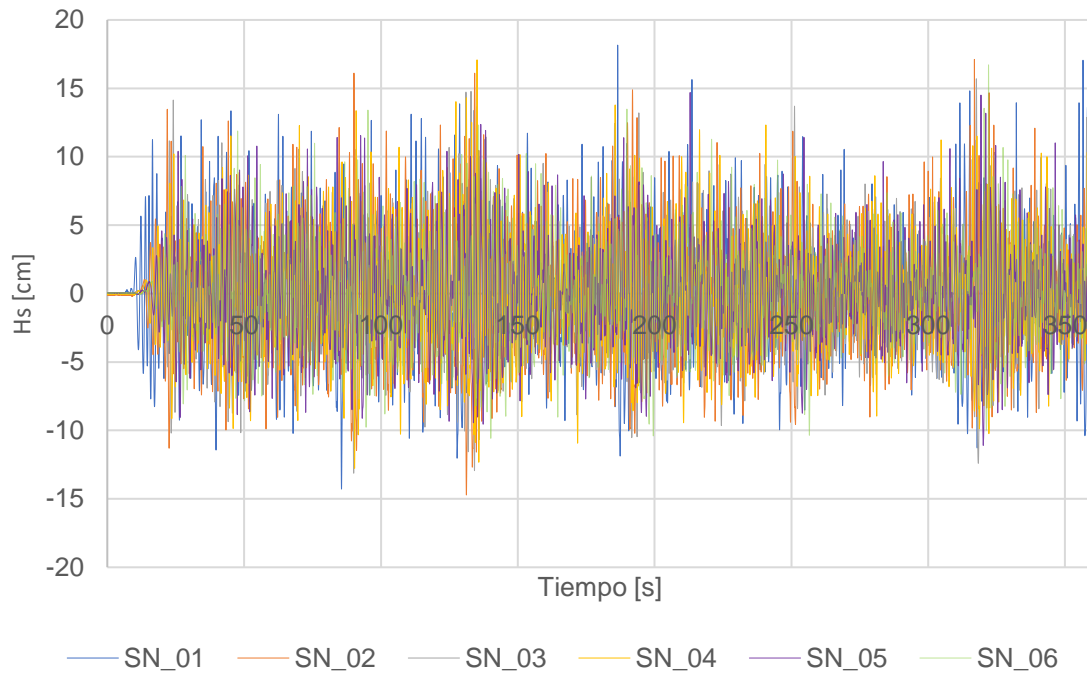
### 2.1.3. Procedimiento Experimental

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo como se describe a continuación:

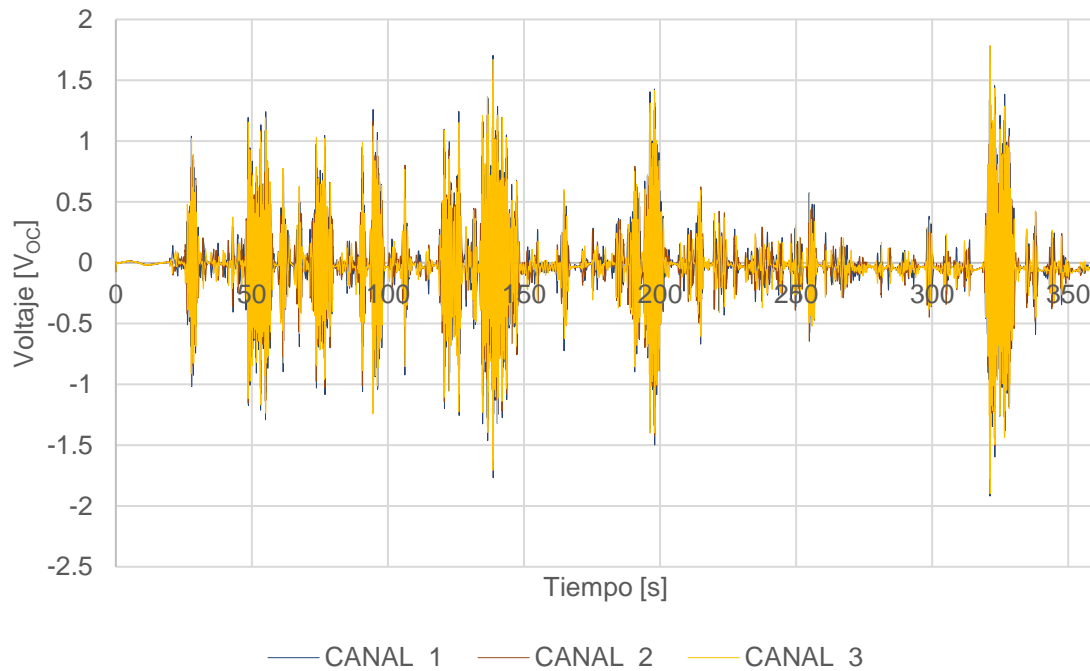
1. Llenar o vaciar el canal para alcanzar la profundidad requerida en la prueba que se iba a llevar a cabo.
2. *Calibración de sensores de nivel:* La calibración se llevó a cabo todos los días en que se hicieron pruebas ya que durante la noche había pérdidas debido a las condiciones de mantenimiento del canal. Este proceso consistía en tarar los sensores 6 cm hacía arriba y 6 cm hacia abajo; registrando las medidas de volts que mostraba el programa IMC Studio. Por último, se registraron dichos valores en el programa, el cual realizaba la interpolación para obtener datos de salida en cm que indicaban los cambios de la superficie libre del agua.
3. *Calibración de la pala:* La pala cuenta con un sensor de nivel y la calibración funciona de manera muy parecida a los sensores de nivel. Además de la calibración de dicho sensor, se tiene que realizar una prueba *self test* la cual indica si la pala se encuentra dentro de los parámetros de esfuerzo permitidos.
4. Al terminar cada prueba se guardaron los archivos de los sensores de nivel, así como los datos de voltaje obtenidos en la parte del generador del dispositivo WEC.

### 2.1.4. Resultados

Para cada prueba se obtuvo el voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$  que producía el generador trifásico, así como la altura de ola que registraban los 6 sensores distribuidos en el canal. Se registraron datos cada 0.01 s, obteniendo gráficas como las mostradas en las Figuras 2.1.7 y 2.1.8.



**Figura 2.1.7** Altura de ola Registrada en la Prueba No. 15



**Figura 2.1.8** Voltaje Medido para la Prueba No. 15

Por cada prueba se contó el número de vueltas que daba la turbina, con el fin comprobar si existía una relación entre el número de vueltas y el voltaje producido. En las Tablas 2.1.7, 2.1.8 y 2.1.9 se muestra la cantidad que se obtuvo para cada prueba.

**Tabla 2.1.7 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.70 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	25	35	49	75	106	106
	1.8	33	36	52	75	104	106
	1.9	24	38	52	92	104	117
	2	32	38	63	79	104	116
	2.1	22	32	55	84	131	126
	2.2	27	38	55	85	122	131
	2.3	26	33	57	77	130	129

**Tabla 2.1.8 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.75 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	41	65	77	87	121	122
	1.8	44	69	81	114	123	126
	1.9	54	79	107	126	148	172
	2	57	92	107	128	136	186
	2.1	56	88	115	142	157	205
	2.2	56	97	105	163	185	198
	2.3	52	92	113	152	176	200

**Tabla 2.1.9 No. de Vueltas Hechas por la Turbina para una Profundidad de 0.80 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.3
T [s]	1.7	14	58	66	85	122	118
	1.8	38	66	73	72	118	140
	1.9	42	72	92	122	142	159
	2	38	89	93	115	163	183
	2.1	53	78	122	128	183	196
	2.2	56	86	124	160	180	232
	2.3	55	87	126	166	153	221



## CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Para iniciar el proceso de análisis, fue necesario corregir la señal obtenida de las pruebas realizadas utilizando la técnica de mínimos cuadrados [25] ya que el 60% de las pruebas se encontraban desplazadas del eje horizontal ocasionado por un error de calibración durante la experimentación.

La ecuación para realizar la corrección de la señal queda definida:

$$\overline{V}_n = B_0 + B_1x + B_2x^2 \quad (1)$$

Donde:

$$B_0 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_4 - N_3^2) + Y_1(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_2(N_1N_3 - N_2^2)]$$

$$B_1 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_2N_3 - N_1N_4) + Y_1(N_0N_4 - N_2^2) + Y_2(N_1N_2 - N_0N_3)]$$

$$B_2 = \frac{1}{\Delta} [Y_0(N_1N_3 - N_2^2) + Y_1(N_1N_2 - N_0N_3) + Y_2(N_0N_2 - N_1^2)]$$

$$\Delta = N_0N_2N_4 + 2N_1N_2N_3 - N_2^3 - N_0N_3^2 - N_1^2N_4$$

$N_0 = x_n$  (Número de datos recabados)

$V_i =$  Voltaje medido

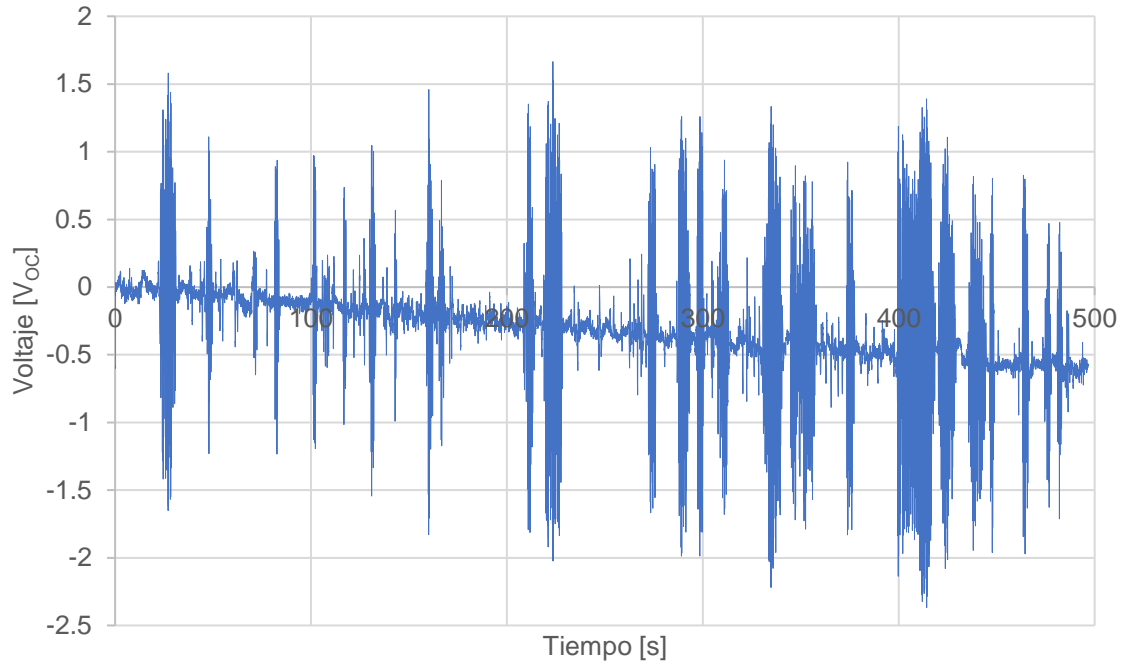
$$N_1 = \sum_{i=0}^n x_i, \quad N_2 = \sum_{i=0}^n x_i^2, \quad N_3 = \sum_{i=0}^n x_i^3, \quad N_4 = \sum_{i=0}^n x_i^4$$

$$Y_0 = \sum_{i=0}^n V_i, \quad Y_1 = \sum_{i=0}^n V_i \cdot x_i, \quad Y_2 = \sum_{i=0}^n V_i \cdot x_i^2$$

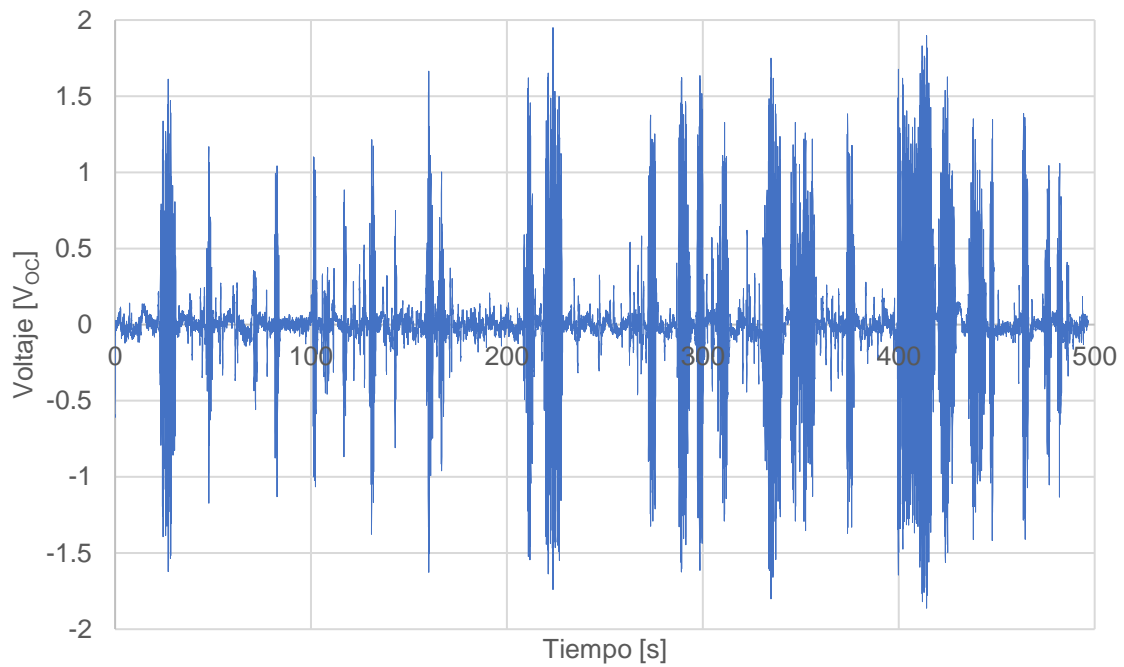
Se utilizó la corrección de tipo parabólico ya que fue la que presentó un mejor ajuste respecto a métodos como el lineal y media aritmética. Teniendo el valor a corregir obtenido en la ecuación 1 para cada punto de la prueba, se restó con el valor original para obtener la señal corregida.

$$V_{\text{corregido}} = V_n - \overline{V}_n \quad (2)$$

Se realizó este procedimiento para 72 pruebas que mostraban un desfase con respecto al eje horizontal, de las cuales cuatro de ellas fueron descartadas debido a que no presentaban una corrección satisfactoria con ningún método. En las Figuras 3.1.1 y 3.1.2 se muestra la señal obtenida en la prueba 97, y su corrección con el método de mínimos cuadrados.



**Figura 3.1.1 Prueba 97 Antes de Corrección por Mínimos Cuadrados**



**Figura 3.1.2 Prueba 97 Corregida**

### 3.1.1. Prueba más eficiente

Una vez obtenidas las señales corregidas, se encontraron las condiciones en las que el dispositivo generaba una mayor cantidad de energía de manera estable, a partir de una serie de histogramas con 12 números de clase y aumentando su valor 0.1 W entre cada una.

Para cada valor de voltaje, se calculó la potencia generada con 0.5 A, intensidad utilizada en experimentaciones previas para el diseño de un dispositivo de almacenamiento energético para este OWC [26].

La ecuación para calcular la potencia generada queda definida:

$$P_i = V_i \cdot I_o \quad (3)$$

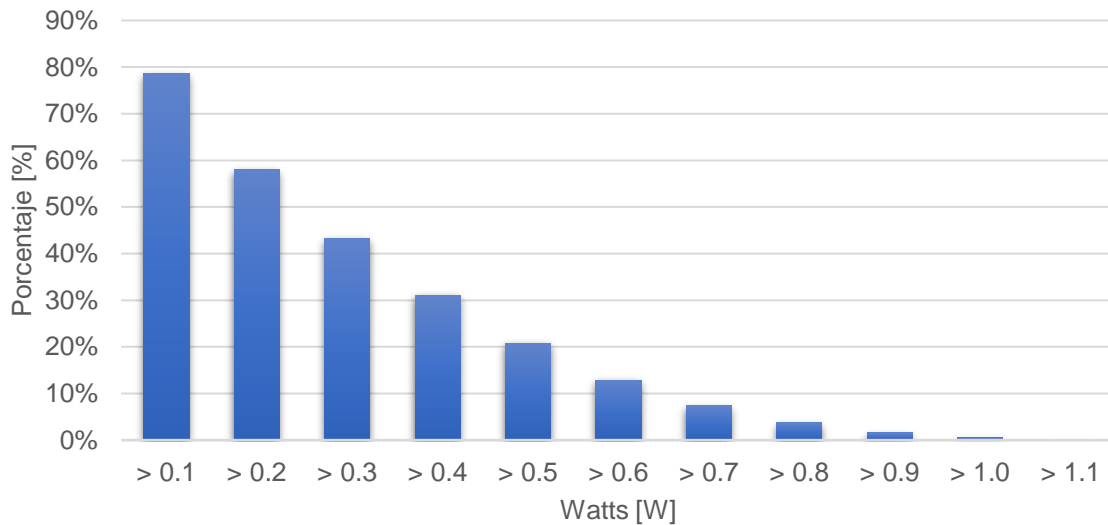
Donde:

$P_i$  = Potencia calculada [W]

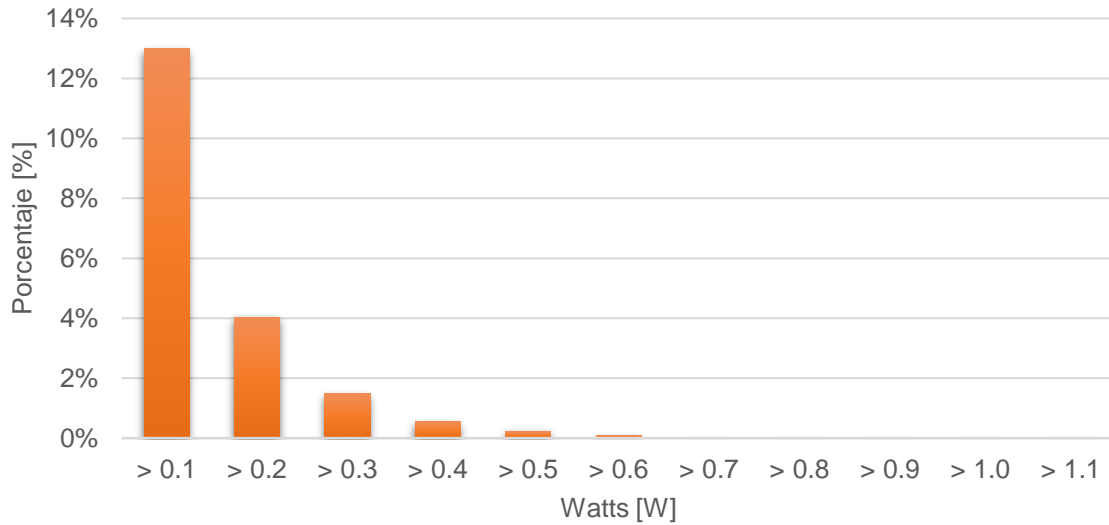
$V_i$  = Voltaje medido [V]

$I_o$  = Intensidad constante [A]

En la Figura 3.1.3 se muestra la prueba que tuvo los porcentajes de generación de energía más altos; mientras que en la Figura 3.1.4 se muestra la menos productiva.



**Figura 3.1.3 Prueba No. 82 (más eficiente)**



**Figura 3.1.4 Prueba No. 85 (menos eficiente)**

En las Tablas 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 se muestran en porcentaje [%], la cantidad de energía que genera el dispositivo de manera constante (>0.1 W) en todas las pruebas realizadas.

**Tabla 3.1.1 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.70 m**

		H <sub>s</sub> [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	25.9	33.9	36.2	50.2	60.2	64.2
	1.8	25.3	31.1	48.0	50.6	-	66.6
	1.9	17.7	28.9	34.0	48.6	-	62.0
	2	22.9	33.1	39.1	43.5	54.1	56.8
	2.1	17.5	26.8	33.6	46.7	60.6	63.4
	2.2	18.0	26.4	31.9	41.5	56.7	54.7
	2.3	18.2	22.3	33.1	38.1	58.5	61.1

**Tabla 3.1.2 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.75 m**

		H <sub>s</sub> [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	27.8	42.9	50.4	54.8	63.5	63.7
	1.8	31.8	49.2	52.9	62.0	66.3	66.9
	1.9	31.5	46.3	54.5	62.3	68.0	73.0
	2	31.4	52.9	53.3	61.2	58.9	72.7
	2.1	28.4	45.2	57.0	66.4	67.0	78.6
	2.2	29.4	49.2	46.1	66.4	67.0	68.9
	2.3	25.0	50.6	50.9	59.5	66.3	72.5

Tabla 3.1.3 [%] de Generación de Energía Constante para una Profundidad de 0.80 m

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	13.0	36.5	42.6	-	61.7	55.2
	1.8	31.3	43.4	49.5	43.0	58.7	59.2
	1.9	29.8	40.9	52.5	55.8	60.6	66.8
	2	27.0	46.9	45.9	-	66.7	68.2
	2.1	31.6	45.3	57.5	55.7	70.6	70.8
	2.2	32.5	38.8	52.6	61.0	71.0	72.8
	2.3	28.9	39.7	51.5	62.8	64.6	71.7

### 3.1.2. Voltaje RMS

Ya que los valores experimentales obtenidos no mostraban ondas sinusoidales perfectas, se calculó un Voltaje eficaz (RMS – Root Mean Square), tomando en cuenta los valores pico de la muestra y valores intermedios a lo largo de cada uno de los ciclos. Por tratarse de variables discretas, el cálculo se obtuvo mediante:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_n^2}{n}} \quad (4)$$

En la Figura 3.1.5 se muestra el Voltaje RMS obtenido para la prueba que presentó mayor generación de energía eléctrica.

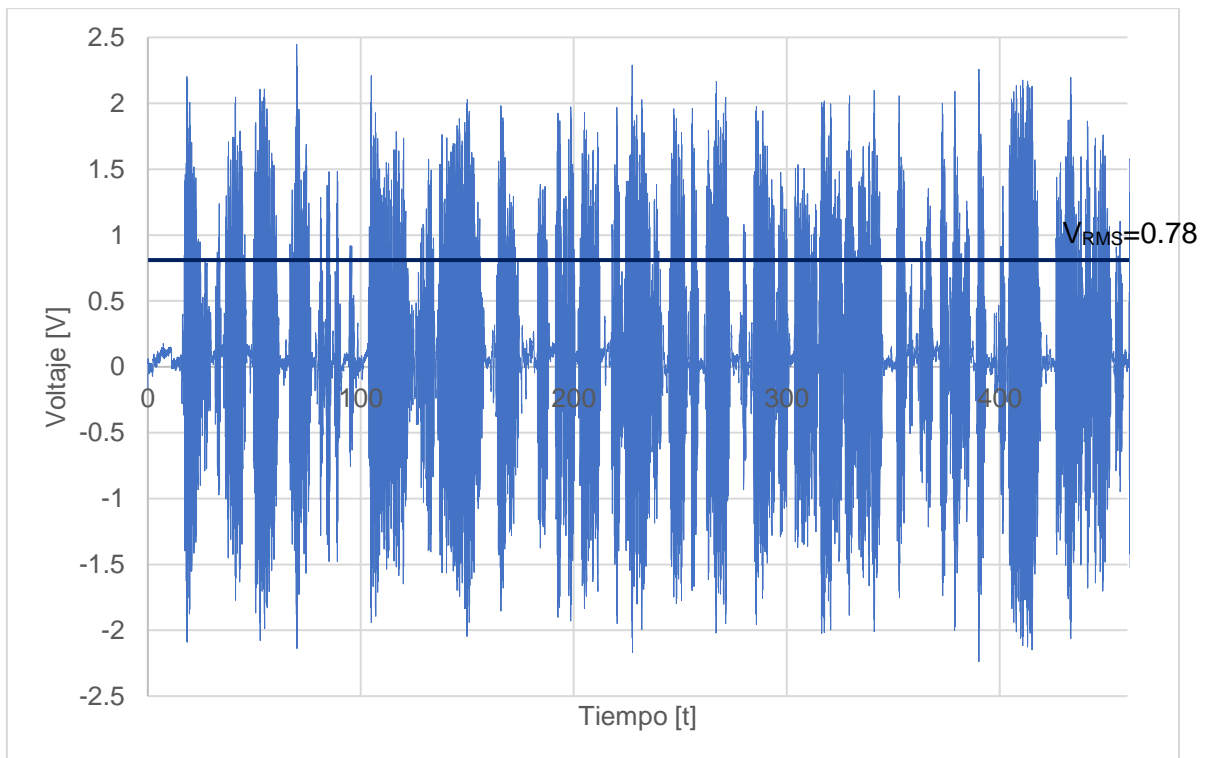


Figura 3.1.5 Voltaje RMS para la Prueba No. 82

En las Tablas 3.1.4, 3.1.5 y 3.1.6 se muestra el Voltaje RMS  $V_{RMS}$  calculado para todas las pruebas realizadas.

**Tabla 3.1.4 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.70 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	0.31	0.38	0.46	0.49	0.43	0.59
	1.8	0.43	0.42	0.47	0.53	-	0.57
	1.9	0.33	0.42	0.46	0.55	-	0.57
	2	0.42	0.41	0.48	0.52	0.58	0.62
	2.1	0.34	0.39	0.47	0.56	0.60	0.62
	2.2	0.37	0.41	0.45	0.54	0.56	0.62
	2.3	0.37	0.39	0.48	0.52	0.59	0.63

**Tabla 3.1.5 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.75 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	0.42	0.50	0.55	0.56	0.66	0.62
	1.8	0.46	0.52	0.58	0.64	0.65	0.64
	1.9	0.46	0.56	0.61	0.62	0.65	0.67
	2	0.45	0.54	0.59	0.65	0.65	0.71
	2.1	0.47	0.55	0.58	0.65	0.70	0.78
	2.2	0.47	0.52	0.62	0.66	0.72	0.75
	2.3	0.46	0.61	0.58	0.67	0.69	0.71

**Tabla 3.1.6 Voltaje RMS Obtenido para las Pruebas con una Profundidad de 0.80 m**

		Hs [m]					
		0.15	0.18	0.21	0.24	0.27	0.30
T [s]	1.7	0.37	0.52	0.51	-	0.63	0.63
	1.8	0.45	0.50	0.53	0.57	0.63	0.66
	1.9	0.43	0.52	0.55	0.61	0.68	0.68
	2	0.41	0.54	0.58	-	0.69	0.69
	2.1	0.50	0.54	0.63	0.64	0.74	0.72
	2.2	0.51	0.58	0.58	0.66	0.73	0.78
	2.3	0.49	0.52	0.58	0.65	0.68	0.78

Conocido el voltaje eficaz a partir de la ecuación 4 para cada experimento, se encontró una serie de ecuaciones que relacionara el valor obtenido en cada prueba con las condiciones de oleaje a las que había sido sometido, utilizando una técnica conocida como “análisis dimensional”.

### 3.1.3. Análisis Dimensional

El análisis dimensional es una herramienta utilizada para deducir relaciones físicas; frecuentemente en el campo de la ingeniería se usa para fabricar modelos hidráulico-experimentales que reproducen el comportamiento de un prototipo. El análisis dimensional permite reducir el número de variables que intervienen en un fenómeno de manera significativa, siendo una manera muy útil de abordar un problema, ya que este crece geométricamente con cada nueva variable [24].

Las unidades de referencia que se pueden utilizar son completamente arbitrarias, siempre cuidando que estos sean independientes entre sí. Para este proyecto se utilizaron las unidades del Sistema Internacional de masa, longitud y tiempo; [**M L T**] debido a su practicidad en el problema estudiado.

En la Tabla 3.1.7 se muestran las variables utilizadas para efectuar el análisis dimensional del dispositivo WEC.

**Tabla 3.1.7 Variables Utilizadas y sus Dimensiones**

	<b>Símbolo</b>	<b>M</b>	<b>L</b>	<b>T</b>
Altura de Ola Significante	$H_s$	0	1	0
Diámetro	$\Phi$	0	1	0
Densidad	$\rho$	1	-3	0
Francobordo	$f_b$	0	1	0
Gravedad	$g$	0	1	-2
Longitud de onda	$L$	0	1	0
Profundidad	$h$	0	1	0
Periodo	$T$	0	0	1
Voltaje	$V_{oc}$	1	2	-3

Para el análisis dimensional se utilizaron todas las variables que intervinieron en la experimentación, con la finalidad de llegar a un resultado confiable. Dichas variables se pueden clasificar en dependientes e independientes; siendo la dependiente la que interesa determinar y las independientes las que intervienen en el problema.

Para determinar la cantidad de energía que puede producir un dispositivo OWC y sus ecuaciones de diseño, las variables dependientes serían el voltaje en circuito abierto  $V_{oc}$ , el diámetro del dispositivo  $\Phi$  y el francobordo  $f_b$  del mismo. Una vez determinadas cuáles son las variables se crea la matriz de exponentes donde las variables se ponen en el lugar de las filas y las dimensiones en las columnas como se muestra a continuación.

	$V_{oc}$	$\rho$	$\Phi$	$g$
[M]	1	1	0	0
[L]	2	-3	1	1
[T]	-3	0	0	-2

El rango de la matriz será la mayor matriz cuadrada cuyo determinante sea diferente de cero.

El teorema  $\pi$  de Buckingham [27] es el sustento teórico del proceso que lleva a cabo el análisis dimensional con el cual es posible reducir el número de variables implicadas a un número de monomios sin dimensiones sin perder precisión del fenómeno. La forma matemática de representar el teorema se muestra a continuación:

$$F(a, b, c, d, \dots) = 0 \rightarrow \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots) = 0 \quad (5)$$

Donde:

- $F$  y  $\varphi$  \_\_\_\_\_ funciones
- $a, b, c, d$  \_\_\_\_\_ variables dimensionales
- $\pi_1, \pi_2, \pi_3$  \_\_\_\_\_ variables adimensionales

Se considera un fenómeno en el que intervienen un total de  $m$  parámetros, cuyas variables  $Q$  sean dependientes o independientes.

$$f(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = 0 \quad (6)$$

Sean  $a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}$  las dimensiones de  $Q_j$  respecto a las magnitudes fundamentales.

$$[Q_j] = [a_{j1} a_{j2} \dots a_{jm}]$$

Entonces la ecuación 5 es reducible a otra equivalente, de la forma:

$$\varphi(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{m-r}) = 0 \quad (7)$$

Siendo  $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{m-r}$ ,  $(m-r)$  monomios adimensionales formados por productos de potencias de las  $Q$  variables.

- *Voltaje Adimensional*

Para conocer la relación física que existe entre el voltaje con las condiciones de oleaje, las propiedades del fluido y los parámetros geométricos se siguieron los siguientes pasos.

Crear la matriz de exponentes:

	$V_{oc}$	$T$	$h$	$H_s$	$\rho$	$\Phi$	$g$
[M]	1	0	0	0	1	0	0
[L]	2	0	1	1	-3	1	1
[T]	-3	1	0	0	0	0	-2

Se eligen las variables  $\rho, \Phi, g$ , las cuales generan una terna con determinante no nulo

	$\rho$	$\Phi$	$g$
[M]	1	0	0
[L]	-3	1	1
[T]	0	0	-2



Se expresa de la siguiente forma:

$$\pi_i = Q_i \cdot \rho^a \cdot \Phi^b \cdot g^c$$

Debido a que intervienen 7 variables y el rango de la matriz es de 3, la función equivalente constará de 4 productos adimensionales.

$$F(V_{oc}, T, h, H_s, \rho, \Phi, g) = 0 \xrightarrow{R!} \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4) = 0 \quad (8)$$

Primer componente adimensional:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= f_1(V_{oc}) = V_{oc} \cdot \rho^a \cdot \Phi^b \cdot g^c \\ \{M \cdot L \cdot T\}^0 &= \{M \cdot L^2 \cdot T^{-3}\} \cdot \{M \cdot L^{-3}\}^a \cdot \{L\}^b \cdot \{L \cdot T^{-2}\}^c \\ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 &= M^{1+a} \cdot L^{2-3a+b+c} \cdot T^{-3-2c} \end{aligned}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$M \rightarrow 1+a=0 \rightarrow a = -1$$

$$T \rightarrow -3-2c \rightarrow c = -\frac{3}{2}$$

$$L \rightarrow 2-3a+b+c=0 \rightarrow b = -\frac{7}{2}$$

Entonces:

$$\pi_1 = f_1(V_{oc}) = V_{oc} \cdot \rho^{-1} \cdot \Phi^{-\frac{7}{2}} \cdot g^{-\frac{3}{2}} = \frac{V_{oc}}{\rho \cdot \Phi^{\frac{7}{2}} \cdot g^{\frac{3}{2}}} \quad (9)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{V_{oc}}{\Phi^{7/2} \cdot \rho \cdot g^{3/2}} \rightarrow \frac{\frac{[M][L]^2}{[T]^3}}{[L]^{7/2} \cdot \frac{[M]}{[L]^3} \cdot \left(\frac{[L]}{[T]^2}\right)^{3/2}} = \frac{[M][L]^2[L]^3[T]^3}{[L]^{7/2}[M][L]^{3/2}[T]^3} = [1]$$

Segundo componente adimensional:

$$\begin{aligned} \pi_2 &= f_2(T) = T \cdot \rho^a \cdot \Phi^b \cdot g^c \\ \{M \cdot L \cdot T\}^0 &= \{T\} \cdot \{M \cdot L^{-3}\}^a \cdot \{L\}^b \cdot \{L \cdot T^{-2}\}^c \\ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 &= M^a \cdot L^{-3a+b+c} \cdot T^{1-2c} \end{aligned}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$M \rightarrow a = 0$$

$$T \rightarrow 1-2c=0 \rightarrow c = \frac{1}{2}$$

$$L \rightarrow -3a+b+c=0 \rightarrow b = -\frac{1}{2}$$

Entonces:

$$\pi_2 = f_2(T) = T \cdot \rho^0 \cdot \Phi^{\frac{1}{2}} \cdot g^{\frac{1}{2}} = T \cdot \sqrt{\frac{g}{\Phi}}$$

Por Teorema [27] se puede elevar el monomio a cualquier valor

$$\pi_2 = f_2(T) = \left[ T \cdot \sqrt{\frac{g}{\Phi}} \right]^{-1} = \frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{\Phi}{g}} \quad (10)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{\Phi}{g}} \rightarrow \frac{1}{[T]} \cdot \left( \frac{[L]}{[T]^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{1}{[T]} \cdot \frac{[L]^{\frac{1}{2}} \cdot [T]}{[L]^{\frac{1}{2}}} = [1]$$

Tercer componente adimensional:

$$\begin{aligned} \pi_3 = f_3(h) &= h \cdot \rho^a \cdot \Phi^b \cdot g^c \\ \{M \cdot L \cdot T\}^0 &= \{L\} \cdot \{M \cdot L^{-3}\}^a \cdot \{L\}^b \cdot \{L \cdot T^{-2}\}^c \\ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 &= M^a \cdot L^{1-3a+b+c} \cdot T^{-2c} \end{aligned}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$M \rightarrow a = 0$$

$$T \rightarrow -2c = 0 \rightarrow c = 0$$

$$L \rightarrow 1-3a+b+c=0 \rightarrow b=-1$$

Entonces:

$$\pi_3 = f_3(h) = h \cdot \rho^0 \cdot \Phi^{-1} \cdot g^0 = h \cdot \Phi^{-1} = \frac{h}{\Phi} \quad (11)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{h}{\Phi} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Cuarto componente adimensional:

$$\pi_4 = f_4(H_s) = H_s \cdot \rho^a \cdot \Phi^b \cdot g^c$$

Resolviendo de forma análoga al tercer componente, queda:

$$\pi_4 = f_4(H_s) = H_s \cdot \rho^0 \cdot \Phi^{-1} \cdot g^0 = H_s \cdot \Phi^{-1} = \frac{H_s}{\Phi} \quad (12)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{H_s}{\Phi} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Finalmente, sustituyendo las ecuaciones 9, 10, 11 y 12 en la ecuación 8:

$$\frac{V_{oc}}{\rho \cdot \Phi^{\frac{7}{2}} \cdot g^{\frac{3}{2}}} = f\left(\frac{1}{T} \cdot \sqrt{\frac{\Phi}{g}}, \frac{h}{\Phi}, \frac{H_s}{\Phi}\right)$$

Debido a que son productos adimensionales, se les puede aplicar cualquier tipo de operación matemática siempre y cuando se le pueda dar un significado definido al resultado producto de esa operación. Por lo que se decidió multiplicar las variables independientes, quedando como resultado:

$$\frac{V_{oc}}{\rho \cdot \Phi^{\frac{7}{2}} \cdot g^{\frac{3}{2}}} = f\left(\frac{h \cdot H_s}{T \cdot \sqrt{g \cdot \Phi}^{3/2}}\right) \quad (13)$$

- *Diámetro Adimensional*

Siguiendo el mismo criterio, se encontró la relación física que existe entre el diámetro del dispositivo  $\Phi$  con respecto a las condiciones de oleaje, las propiedades del fluido y los parámetros establecidos por la ubicación de este.

Crear la matriz de exponentes:

	$\Phi$	$h$	$H_s$	$\rho$	$L$	$g$
[M]	0	0	0	1	0	0
[L]	1	1	1	-3	1	1
[T]	0	0	0	0	0	-2

Se comprueba que la matriz cuadrada elegida tenga un determinante diferente de 0. Para ello se toman la terna conformada por las variables  $\rho$ ,  $L$ ,  $g$ .

	$\rho$	$L$	$g$
[M]	1	0	0
[L]	-3	1	1
[T]	0	0	-2

Se expresa de la siguiente forma:

$$\pi_i = Q_i \cdot \rho^a \cdot L^b \cdot g^c$$

Intervienen 6 variables y el rango de la matriz es de 3 por lo tanto la función equivalente constará de 3 productos adimensionales.

Se expresa de la siguiente manera:

$$F(\Phi, h, H_s, \rho, L, g) = 0 \rightarrow \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (14)$$

Primer componente adimensional:

$$\begin{aligned}\pi_1 = f_1(\Phi) &= \Phi \cdot \rho^a \cdot L^b \cdot g^c \\ \{M \cdot L \cdot T\}^0 &= \{L\} \cdot \{M \cdot L^{-3}\}^a \cdot \{L\}^b \cdot \{L \cdot T^{-2}\}^c \\ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 &= M^a \cdot L^{1-3a+b+c} \cdot T^{-2c}\end{aligned}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$M \rightarrow a = 0$$

$$T \rightarrow -2c = 0 \rightarrow c = 0$$

$$L \rightarrow 1-3a+b+c = 0 \rightarrow b = -1$$

Entonces:

$$\pi_1 = f_1(\Phi) = \Phi \cdot \rho^0 \cdot L^{-1} \cdot g^0 = \frac{\Phi}{L} \quad (15)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{\Phi}{L} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Segundo componente adimensional:

$$\pi_2 = f_2(h) = h \cdot \rho^a \cdot L^b \cdot g^c$$

Resolviendo de forma análoga al primer componente, queda:

$$\pi_2 = f_2(h) = h \cdot \rho^0 \cdot L^{-1} \cdot g^0 = \frac{h}{L} \quad (16)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{h}{L} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Tercer componente adimensional:

$$\pi_3 = f_3(H_s) = H_s \cdot \rho^a \cdot L^b \cdot g^c$$

Resolviendo de forma análoga al primer componente, queda:

$$\pi_3 = f_3(H_s) = H_s \cdot \rho^0 \cdot L^{-1} \cdot g^0 = \frac{H_s}{L} \quad (17)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{H_s}{L} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Quedando finalmente, al sustituir las ecuaciones 15, 16 y 17 en la ecuación 14:

$$\frac{\Phi}{L} = f\left(\frac{h}{L}, \frac{H_s}{L}\right)$$

Multiplicando las variables independientes como en el caso del voltaje, obtenemos por resultado:

$$\frac{\Phi}{L} = f\left(\frac{h \cdot H_s}{L^2}\right) \quad (18)$$

- *Francobordo Adimensional*

Por último, se analizó la relación física existente entre el francobordo  $f_b$  y sus variables independientes.

Crear la matriz de exponentes:

	$f_b$	$h$	$L$	$\rho$	$H_s$	$g$
[M]	0	0	0	1	0	0
[L]	1	1	1	-3	1	1
[T]	0	0	0	0	0	-2

Se checa que la matriz cuadrada elegida tenga un determinante diferente de 0. Para ello se toman las variables  $\rho$ ,  $H_s$ ,  $g$ .

	$\rho$	$H_s$	$g$
[M]	1	0	0
[L]	-3	1	1
[T]	0	0	-2

Se expresa de la siguiente forma:

$$\pi_i = Q_i \cdot \rho^a \cdot H_s^b \cdot g^c$$

Ya que intervienen 6 variables y el rango de la matriz es de 3, la función equivalente constará de 3 productos adimensionales.

$$F(f, h, L, \rho, H_s, g) = 0 \xrightarrow{R!} \varphi(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (19)$$

Primer componente adimensional:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= f_1(f_b) = f_b \cdot \rho^a \cdot H_s^b \cdot g^c \\ \{M \cdot L \cdot T\}^0 &= \{L\} \cdot \{M \cdot L^{-3}\}^a \cdot \{L\}^b \cdot \{L \cdot T^{-2}\}^c \\ M^0 \cdot L^0 \cdot T^0 &= M^a \cdot L^{1-3a+b+c} \cdot T^{-2c} \end{aligned}$$

Se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$M \rightarrow a = 0$$

$$T \rightarrow -2c = 0 \rightarrow c = 0$$

$$L \rightarrow 1 - 3a + b + c = 0 \rightarrow b = -1$$

Entonces:

$$\pi_1 = f_1(f_b) = f_b \cdot \rho^0 \cdot H_s^{-1} \cdot g^0 = \frac{f_b}{H_s} \quad (20)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{f_b}{H_s} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Segundo componente adimensional:

$$\pi_2 = f_2(h) = h \cdot \rho^a \cdot H_s^b \cdot g^c$$

Resolviendo de forma análoga al primer componente, queda:

$$\pi_2 = f_2(h) = h \cdot \rho^0 \cdot H_s^{-1} \cdot g^0 = \frac{h}{H_s} \quad (21)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{h}{H_s} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Tercer componente adimensional:

$$\pi_3 = f_3(L) = L \cdot \rho^a \cdot H_s^b \cdot g^c$$

Resolviendo de forma análoga al primer componente, queda:

$$\pi_3 = f_3(L) = L \cdot \rho^0 \cdot H_s^{-1} \cdot g^0 = \frac{L}{H_s} \quad (22)$$

Se comprueba la adimensionalidad:

$$\frac{L}{H_s} \rightarrow \frac{[L]}{[L]} = [1]$$

Quedando finalmente al sustituir las ecuaciones 20, 21 y 22 en la ecuación 19:

$$\frac{f_b}{H_s} = f\left(\frac{h}{H_s}, \frac{L}{H_s}\right)$$

Multiplicando las variables independientes como en los casos anteriores, obtenemos por resultado:

$$\frac{f_b}{H_s} = f\left(\frac{h \cdot L}{H_s^2}\right) \quad (23)$$

### 3.2. RESULTADOS

Una vez obtenidas las relaciones físicas del voltaje  $V_{oc}$  (ecuación 13), diámetro  $\Phi$  (ecuación 18) y el francobordo  $f_b$  (ecuación 23) con respecto a las variables independientes, se graficaron los datos buscando una relación en ellos. Se observó que, siendo agrupados en función de  $L$  y  $H_s$ , existía una tendencia. A continuación, se muestran las ecuaciones obtenidas para cada grupo, así como su porcentaje de validación con los resultados experimentales.

Longitud de onda [L]	Ecuación de ajuste	Error [<10%]	Error [<15%]
4.51-5.06	$y = -0.0107 x^2 + 5.3 \times 10^{-3} x + 3 \times 10^{-5}$	71%	88%
5.64-6.25	$y = -0.0208 x^2 + 8.2 \times 10^{-3} x - 1 \times 10^{-4}$	82%	91%
6.89-8.26	$y = -0.0101 x^2 + 6.3 \times 10^{-3} x + 4 \times 10^{-5}$	72%	87%

Altura de ola significativa [Hs]	Ecuación de ajuste	Error [<5%]	Error [<10%]
0.15-0.18	$y = -781.22 x^2 + 14.39 x + 0.0225$	57%	100%
0.21-0.24	$y = -357.41 x^2 + 10.101 x - 0.0232$	73%	100%
0.27-0.30	$y = -204.49 x^2 + 7.6617 x + 0.0239$	78%	100%

Longitud de onda [L]	Ecuación de ajuste	Error [<5%]	Error [<10%]
4.51-5.06	$y = -8 \times 10^{-6} x^2 + 3.6 \times 10^{-3} x + 0.1346$	75%	100%
5.64-6.25	$y = -7 \times 10^{-6} x^2 + 4.5 \times 10^{-3} x - 0.2256$	86%	100%
6.89-8.26	$y = -6 \times 10^{-6} x^2 + 4.8 \times 10^{-3} x + 0.3166$	78%	100%

Las gráficas obtenidas producto de las ecuaciones 13, 18 y 23 se pueden ver en la Figura 3.2.1 para el caso del voltaje  $V_{oc}$ , Figura 3.2.2 para el diámetro  $\Phi$  y la Figura 3.2.3 para el francobordo  $f_b$ .





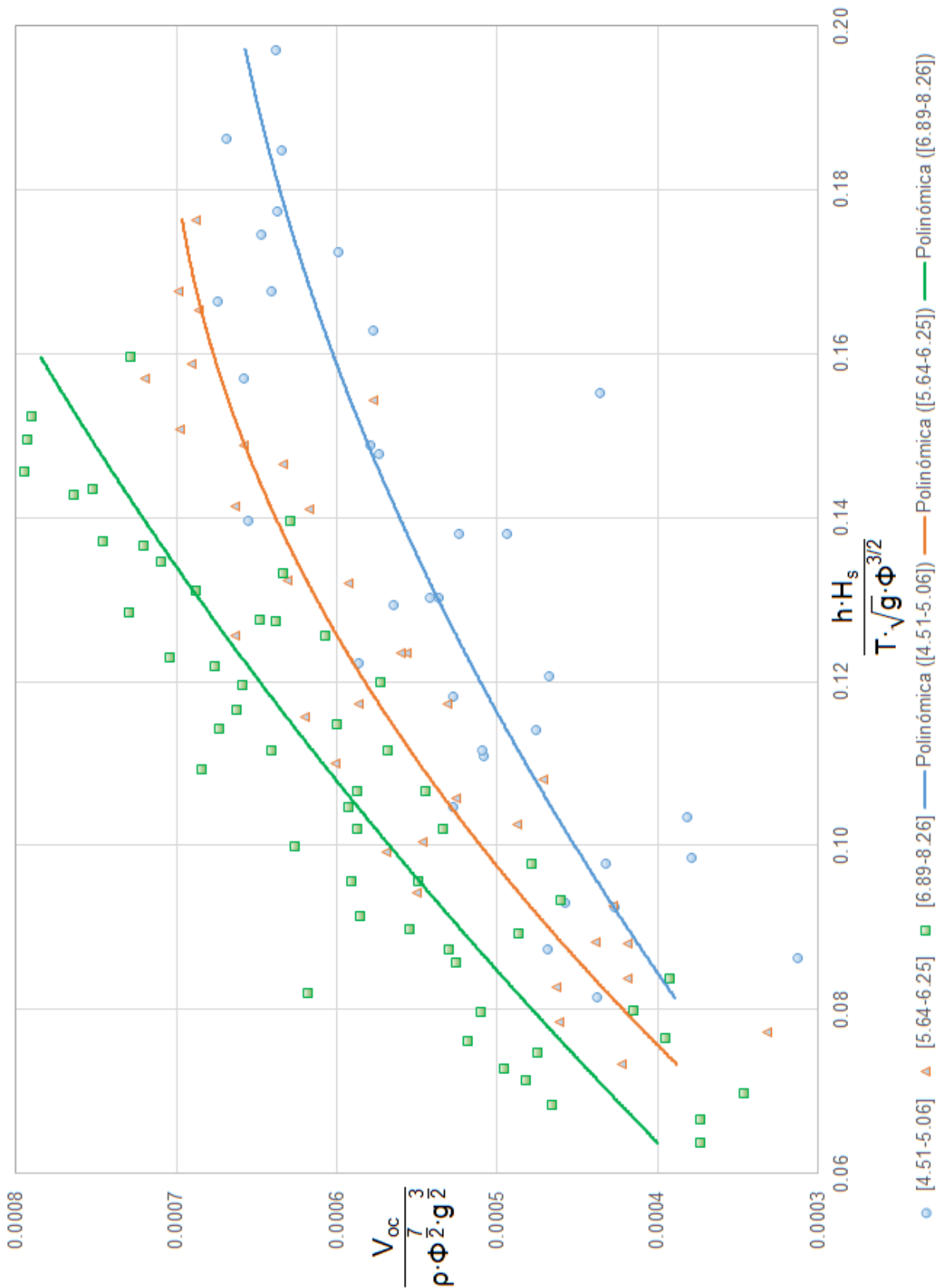


Figura 3.2.1 Gráfica Voltaje Adimensional



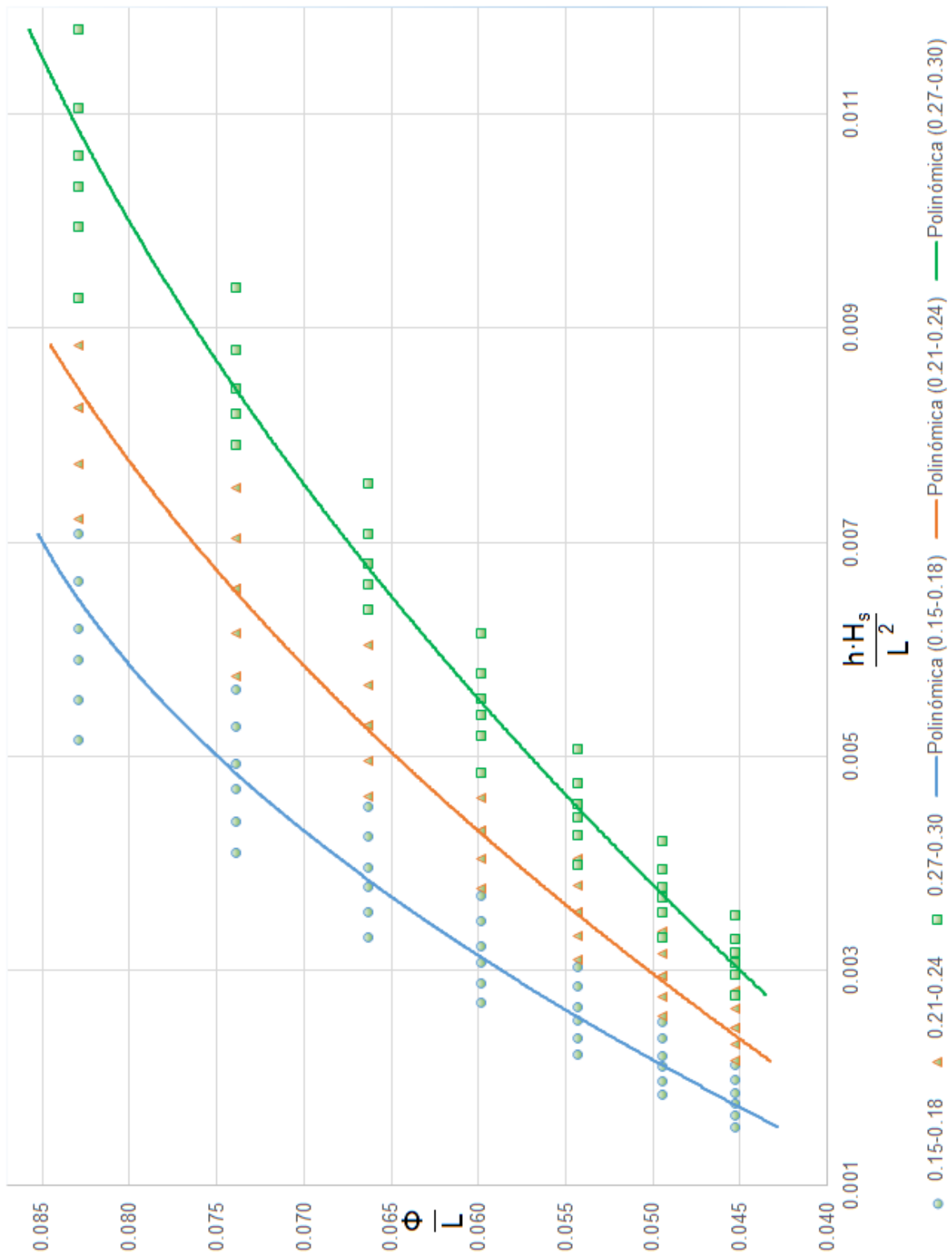


Figura 3.2.2 Gráfica Diámetro Adimensional



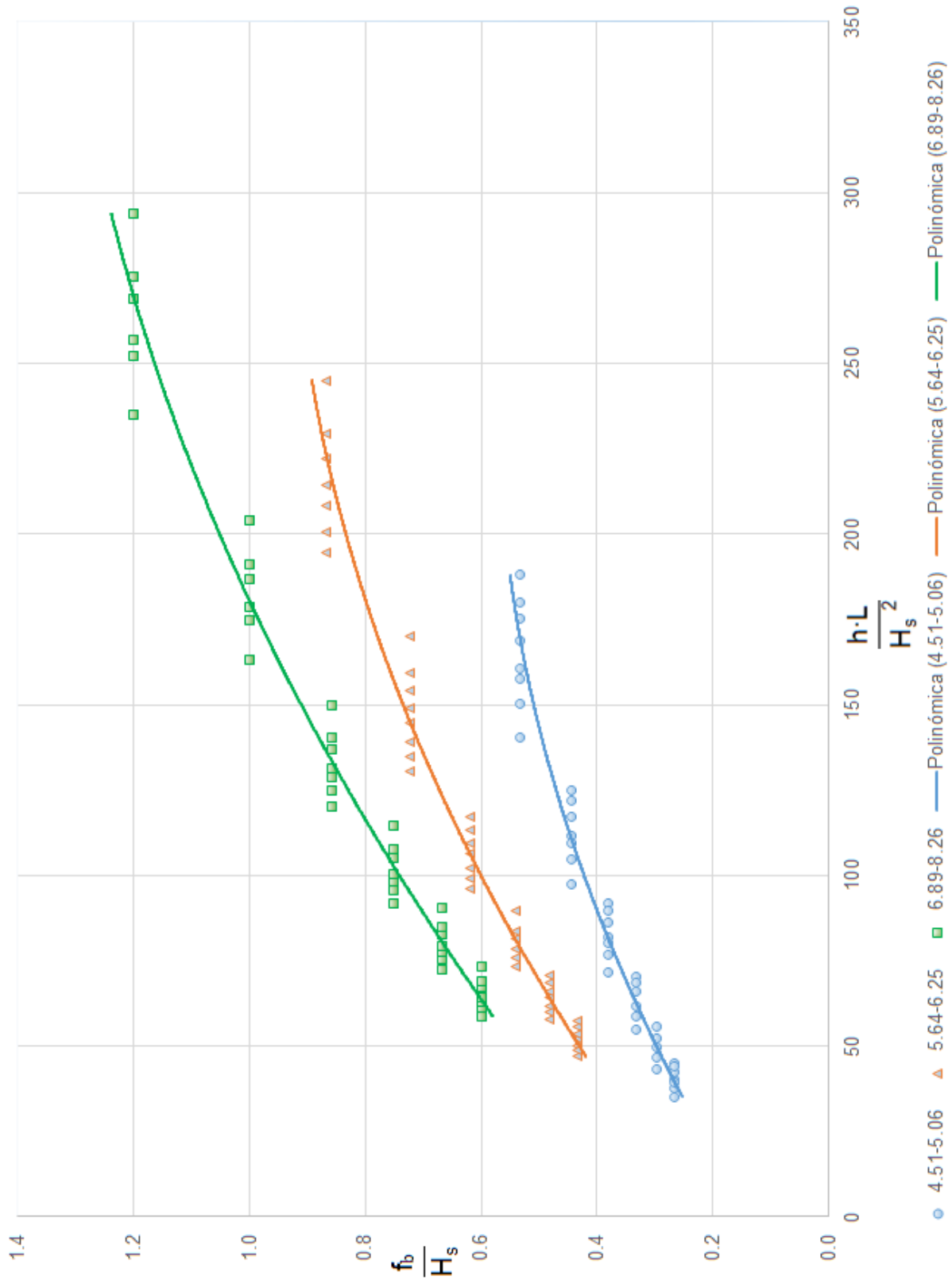


Figura 3.2.3 Gráfica Francobordo Adimensional



## CONCLUSIONES

- La maduración tecnológica que ha tenido la energía oceánica en los últimos años ofrece una oportunidad de crecimiento en nuestro país. La inversión económica y el desarrollo en este tipo de tecnología diversifica la matriz energética existente, la cual propone una nueva forma de abastecimiento energético local a partir del aprovechamiento de energías renovables.
- En nuestro país han existido pocos sistemas undimotrices de los que se haya hecho pruebas bajo condiciones reales de operación, siendo limitado su desarrollo por falta de financiamiento e interés político. Aunque en las costas mexicanas existe un bajo potencial energético del oleaje, no se debe menospreciar y se debe de utilizar como una fuente de energía alternativa, ayudando así a la creciente demanda energética.
- Las ecuaciones desarrolladas para la caracterización del dispositivo, al ser validadas con los resultados experimentales con un error menor al 10% sirven como herramienta de diseño en dispositivos OWC. Al estar agrupadas por longitud de onda  $L$  y altura significativa  $H_s$ , es intuitivo identificar qué ecuación utilizar en función de las condiciones de oleaje predominante en el sitio.
- Las pruebas de laboratorio demostraron que el dispositivo es funcional para diferentes estados de mar, observando que para una profundidad  $h$  de 0.75 m, altura significativa  $H_s$  de 0.30 m y periodos  $T$  mayores a 2.1 s, se genera una mayor cantidad de voltaje eficaz.
- Es necesario seguir con el trabajo en esta línea de investigación, llevando a cabo proyectos que incluyan pruebas en campo con modelos a escala, los cuales puedan recopilar información *in-situ*. Lo anterior, con la intención de generar mejores propuestas para el desarrollo de dispositivos de aprovechamiento energético.





**BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS**

- [1] M. Flores, “Energía del mar, una prometedora fuente de energía para México,” 2016. [Online]. Available: <http://www.proyectofose.mx/2016/04/20/energia-del-mar-prometedora-fuente-de-energia-para-mexico/>. [Accessed: 23-Jan-2020].
- [2] L. A. Vega, “Ocean Energy, Introduction,” in *Renewable Energy Systems*, M. Kaltschmitt, N. J. Themelis, L. Y. Bronicki, L. Söder, and L. A. Vega, Eds. New York, NY: Springer New York, 2013, pp. 1271–1272.
- [3] M. G. Ortiz Gallardo, “CARTERA DE NECESIDADES DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO,” pp. 1–48, 2017.
- [4] WCED, “Vol. 17 - doc. 149,” *WCED*, vol. 17, pp. 1–91, 1987.
- [5] J. P. D. Velilla, *Sistemas de energías renovables*. 2015.
- [6] J. M. Fernández Salgado, *Guía Completa de la Energía Eólica*. 2011.
- [7] D. Al Katsaprakakis and D. G. Christakis, “Wind parks design, including representative case studies,” in *Comprehensive Renewable Energy*, 2012, pp. 169–223.
- [8] R. Salgado Garciglia, “PARQUES EÓLICOS: FUENTE RENOVABLE DE ENERGÍA.” [Online]. Available: <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/188-numero-2361/365-parques-eolicos-fuente-renovable-de-energia.html>. [Accessed: 08-Dec-2019].
- [9] S. Ramirez and J. C. Vega de Kuyper, *Fuentes de Energía, Renovables y no Renovables. Aplicaciones*. 2014.
- [10] “CFE.” [Online]. Available: <https://twitter.com/gobmx/status/430493545586511872>. [Accessed: 29-Nov-2019].
- [11] “Cómo funciona una central hidroeléctrica,” 2015. [Online]. Available: <https://www.tucucu.com/2015/05/26/como-funciona-una-central-hidroelectrica/>. [Accessed: 23-Jan-2020].
- [12] “GOODENERGY.” [Online]. Available: <http://www.goodenergy.cl/images/central-paso.png>. [Accessed: 23-Jan-2020].
- [13] O. Guillén Solis, *Energías renovables. Una perspectiva ingenieril*. 2004.
- [14] J. A. Roca, “Makai Ocean pone en marcha la mayor planta térmica oceánica del mundo en Hawai,” 2015. [Online]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/makai-ocean-pone-en-marcha-la-mayor-planta-termica-oceanica-del-mundo-en-hawai/>. [Accessed: 15-Oct-2019].
- [15] “Instalaciones Mareomotrices.” [Online]. Available: <https://mareomotrizate.wordpress.com/instalaciones-mareomotrices/>. [Accessed: 23-Jan-2020].



- [16] A. Madrid, *Guía Completa de las Energías Renovables*. 2011.
- [17] A. F. O. Falcão, “Modelling of Wave Energy Systems,” *Wrec*, 2014.
- [18] A. F. O. Falcão, *Historical aspects of wave energy conversion*, vol. 8. Elsevier Ltd., 2012.
- [19] “Pelamis la serpiente energética,” 2011. [Online]. Available: <http://www.morisarros.es/pelamis-la-serpiente-energetica/>. [Accessed: 20-Nov-2019].
- [20] “Could Salter’s Duck have solved the oil crisis? | HowStuffWorks,” 2008. [Online]. Available: <https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/salters-duck.htm>. [Accessed: 20-Jan-2020].
- [21] “Archimedes Waveswing - AWS Ocean Energy - clean renewable marine energy - sub-sea wave power - power converter for remote communities - autonomous power generator - award-winning design - the future of wave power - Archimedes Waveswing.” [Online]. Available: <http://www.awsocan.com/archimedes-waveswing.html>. [Accessed: 20-Jan-2020].
- [22] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, “A review of wave energy converter technology,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, 2009.
- [23] “Investigacion.” [Online]. Available: <http://www.dinel.upm.es/proyectos.html>. [Accessed: 23-Jan-2020].
- [24] G. Echávez Aldape, *Introducción a los Modelos Hidráulicos de Fondo Fijo y a la Ingeniería Experimental*. 1996.
- [25] R. Silva Casarín, *Análisis y descripción estadística del oleaje*. 2005.
- [26] J. A. Sánchez Morfín, “Diseño de un dispositivo de almacenamiento y acondicionamiento de energía para un dispositivo WEC,” 2019.
- [27] A. Martínez de Azagra, V. Pando, and J. del Río, “Generalizaciones al teorema de Pi de Buckingham con algunas aplicaciones,” no. 2007, p. 21, 2007.