



**COMUNICACIONES**

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



# Desarrollo de un prototipo de generador de olas para el laboratorio de hidráulica marítima

---

Juan Esteban Flores Álvarez  
José Ángel Hernández Peña  
Francisco Javier Molina Gachuzo  
Etelberto Dionisio Serrano Flores

Publicación Técnica No. 827  
**Querétaro, México**  
**2024**

ISSN 0188-7297



Esta investigación fue planteada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera de este Instituto Mexicano del Transporte y se colaboró con la Unidad de Alta Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México dentro del marco de un acuerdo de confidencialidad.

Por parte del Instituto Mexicano del Transporte, participaron el M.C. Juan Esteban Flores Álvarez, el Ing. José Ángel Hernández Peña, el Ing. Francisco Javier Molina Gachuzo y el M.C. Etelberto Dionisio Serrano Flores.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna VI-30/23 Desarrollo de un prototipo de generador de olas para el laboratorio de hidráulica marítima.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores (as) y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.



# Tabla de Contenido

---

	Página
Sinopsis.....	vii
Abstract.....	ix
Introducción.....	1
1. Investigación del funcionamiento de generadores de olas.....	3
1.1 Definiciones.....	3
1.1.1 Oleaje y ola.....	3
1.1.2 Espectros de oleaje.....	5
1.1.2.1 Espectro de Bretschneider.....	6
1.1.2.2 Espectro Pierson-Moskowits.....	7
1.1.2.3 Espectro JONSWAP.....	9
1.1.3 Teorías de oleaje.....	11
1.1.3.1 Teoría no lineal.....	11
1.1.3.2 Teoría lineal (senoidal).....	11
1.1.3.3 Teoría trocoidal.....	12
1.1.3.4 Teoría de onda solitaria.....	12
1.1.3.5 Teoría cnoidal.....	13
1.1.4 Clasificación de las olas de acuerdo con su profundidad relativa.....	14
1.1.4.1 Aguas someras.....	14
1.1.4.2 Aguas de transición.....	15
1.1.4.3 Aguas profundas.....	17
1.1.4.4 Ecuaciones de la teoría lineal de Airy.....	18
1.2 Generador de olas.....	20
1.2.1 Funcionamiento.....	20
1.2.2 Antecedentes.....	21

1.2.2.1	Primeros enfoques mecánicos.....	22
1.2.2.1.1	Agitación manual.....	23
1.2.2.1.2	Dispositivos rudimentarios.....	23
1.2.2.1.3	Limitaciones de control .....	24
1.2.2.1.4	Replicación de condiciones oceanográficas .....	25
1.2.2.1.5	Exploración de conceptos básicos.....	27
1.2.3	Avances tecnológicos en hidráulica.....	28
1.2.3.1	Precisión en la generación de olas .....	28
1.2.3.2	Simulación de condiciones realistas.....	28
1.2.3.2.1	Modelación numérica .....	29
1.2.3.2.2	Hidrodinámica experimental de alta precisión .....	31
1.2.3.2.3	Replicación de topografía y batimetría.....	33
1.2.3.2.4	Inteligencia Artificial y aprendizaje automático.....	34
1.2.3.2.5	Tecnología de Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA).....	35
1.2.3.3	Estudios de interacción con estructuras marinas .....	38
1.2.3.3.1	Puertos y muelles.....	38
1.2.3.3.2	Rompeolas .....	39
1.2.3.4	Validación de modelos numéricos .....	41
1.2.3.5	Investigación en energía de las olas.....	42
1.2.3.5.1	Desarrollo tecnológico.....	43
1.2.3.5.2	Desafíos tecnológicos .....	43
1.2.3.5.3	Aspectos económicos y ambientales.....	43
1.2.3.5.4	Proyectos piloto y despliegue comercial .....	44
1.2.4	Innovación en Ingeniería Costera.....	44
1.2.4.1	Aplicaciones en ingeniería marítima .....	45
2	Propuesta del prototipo .....	47
2.1	Componentes mecánicos y electrónicos .....	47
2.1.1	Sistema Biela-Manivela .....	50
2.1.1.1	Biela.....	51
2.1.1.2	Manivela .....	52
2.1.2	Motor a Pasos.....	53

2.1.3	Driver 2DM860.....	54
2.1.4	Fuente de alimentación 48V 10A.....	56
2.1.5	Cople de unión mecánica.....	57
2.1.6	Arduino NANO.....	59
2.1.7	Impresora 3D Ultimaker 2+ Connect.....	60
2.2	Propuesta de diseño .....	61
3	Desarrollo de software y hardware para el prototipo.....	67
3.1	Software .....	67
3.2	Hardware .....	70
4	Prueba de funcionamiento del prototipo en ambiente controlado ....	71
4.1	Prueba 1.....	71
4.2	Prueba 2 .....	74
5	Ajustes del prototipo.....	79
	Conclusiones.....	87
	Bibliografía .....	89





# Sinopsis

---

El presente estudio la investigación se centra en comprender y analizar el funcionamiento de un generador de oleaje, un dispositivo diseñado para simular condiciones de oleaje en entornos controlados de laboratorio. Este tipo de generadores son fundamentales en la investigación en ingeniería portuaria, ya que permiten recrear condiciones específicas del océano de manera precisa para estudiar un prototipo a escala.

En la investigación, se examinan los diferentes componentes del generador de oleaje, tales como los sistemas de control y las estructuras mecánicas del sistema, para estudiar cómo estos elementos interactúan para producir oleaje de manera realista. Para ello se analizan las tecnologías utilizadas para medir y controlar la altura, la frecuencia y la forma de las olas generadas. Además, se aborda la importancia de estos generadores en la simulación de fenómenos oceanográficos, así como en la validación experimental de modelos numéricos. Se exploran aplicaciones prácticas, como revisión del comportamiento hidrodinámico de estructuras, estudios de erosión costera y evaluación de dispositivos basados en el aprovechamiento del oleaje.

Esta investigación proporciona una visión integral del funcionamiento de un generador de oleaje, con enfoque principal en investigación científica y en aplicación práctica para analizar los efectos del oleaje en el entorno marino portuario.



# Abstract

---

In the present study, the research focuses on understanding and analyzing the operation of a wave generator, a device designed to simulate wave conditions in controlled environments. These types of generators are essential in oceanographic research and in the testing of marine structures since they allow ocean conditions to be recreated and studied accurately.

In the research, the different components of the wave generator, such as control systems and wave structures, are examined. The aim is to understand how these elements interact to produce waves in a realistic and reproducible way. The technologies used to measure and control the height, frequency and shape of the waves generated are also analyzed. In addition, the importance of these generators in the modeling and simulation of oceanographic phenomena, as well as in the experimental validation of numerical models. Practical applications are explored, such as coastal erosion studies and evaluation of devices based on wave exploitation.

This research provides an integral view of the operation of a wave generator, focusing on scientific research and practical application to analyze the effects of waves in the marine port environment.



# Introducción

---

Un generador de olas es un dispositivo que reproduce con olas similares a las que se presentan en el océano en un entorno controlado, fenómeno que actualmente se reproduce en los tanques y canales de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte. Estos dispositivos permiten tener la capacidad de generar olas, donde investigadores e ingenieros pueden estudiar el comportamiento de obras civiles en interacción con los fenómenos que presenta el oleaje al arribar a la infraestructura portuaria y costera. Además, estos generadores de olas no solo ayudan a investigar, sino también permiten verificar la estabilidad de las obras de ingeniería marítima frente a condiciones marinas extremas.

Un generador de olas es un dispositivo útil en la ingeniería portuaria y en el desarrollo de tecnologías avanzadas que emplean ingeniería sofisticada para crear oleaje artificial de manera controlada, utiliza sistemas hidráulicos o electromecánicos. Los generadores pueden realizar movimientos precisos a través de software especializado que dan lugar a olas con características específicas, como altura, periodo e incluso dar forma específica al oleaje reproducido.

El laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte está dividido en dos secciones, la primera actualmente en operación cuenta con dos canales y dos tanques de olas, y la segunda (en proceso de construcción) con cuatro canales y dos tanques de grandes dimensiones. Para la adecuada generación del oleaje en un modelo físico de laboratorio es necesario reproducir variables que son consideradas en el análisis y diseño de estructuras portuarias y costeras, para ello, se utilizan dos herramientas con las que se instrumenta un modelo físico, la primera es el equipo generador (de olas) que reproduce las condiciones oceanográficas necesarias, y la segunda es la instrumentación con la que se mide la variación del nivel de agua de referencia. El impacto en la investigación de los generadores de oleaje es tal que resultan esenciales para verificar la estabilidad y seguridad de las obras marítimo-portuarias en el medio donde son construidas. Las empresas navieras, institutos de investigación y universidades utilizan estas herramientas para evaluar funcionalidad, resistencia y viabilidad de sus diseños bajo condiciones extremas de oleaje, lo que contribuye a la creación de vehículos marítimos, obras de protección y nuevas tecnologías mejoradas y confiables para una fácil interacción en este medio.

Actualmente el Laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte cuenta con generadores de manufactura japonesa los cuales, fueron donados por el gobierno de Japón gracias a una participación conjunta en un esfuerzo para expandir la tecnología y la investigación en el ámbito marítimo portuario en México. Los generadores de olas del Laboratorio de Hidráulica Marítima cuentan con una tecnología que representa un camino de oportunidad para desarrollar tecnología propia que permita modernizar la infraestructura para reproducir oleaje de tal manera que se aumente la precisión en los ensayos e investigaciones con la finalidad de atender los requerimientos actuales del sistema portuario nacional.

Otro objetivo del generador de oleaje es también ser utilizado para la validación y complementación de investigaciones realizadas con modelos matemáticos al comparar y verificar o complementar los resultados de las simulaciones numéricas con los datos obtenidos de los ensayos de modelos hidráulicos, que también sirvan para mejorar la precisión de los modelos numéricos. Esto lleva a una comprensión más profunda de los proyectos de ingeniería portuaria y costera y su interacción con las olas del océano, a través del principio de similitud hidráulica.

# 1. Investigación del funcionamiento de generadores de olas

---

Dentro de la modelación de la hidráulica marítima, la comprensión y reproducción de las olas se convierte en un desafío esencial para la investigación científica en la ingeniería portuaria y costera. En este contexto, los generadores de olas son una útil herramienta con capacidad de generar condiciones marinas específicas en entornos controlados. Este capítulo trata de la comprensión e innovación de estos dispositivos especializados y sus aplicaciones en la investigación marítima, el diseño de estructuras portuarias, pruebas de equipamiento, estudios de impacto ambiental y demás, desde la simulación de tormentas hasta la evaluación de la resistencia de estructuras costeras, donde el oleaje desempeñan un papel fundamental en la comprensión y desarrollo a escala del comportamiento de las olas como una de las principales variantes oceanográficas a reproducir en un laboratorio.

## 1.1 Definiciones

Antes de comenzar con los antecedentes y funciones de los generadores de olas, se presenta una breve explicación sobre los conceptos más importantes que abarcan la teoría sobre la génesis del oleaje para el desarrollo del presente proyecto.

### 1.1.1 Oleaje y ola

El término oleaje se refiere al conjunto de ondas que se forman en la superficie del mar o en otro cuerpo de agua debido a la acción del viento. Las olas son perturbaciones en la superficie del agua que se propagan a través de ella. La fuerza del viento interactúa con la superficie libre del agua, genera ondulaciones que se propagan en la dirección del viento.

El oleaje puede variar en tamaño y fuerza en función de factores como la velocidad y la consistencia del viento, la distancia sobre la cual ha actuado el viento y las condiciones geográficas tanto del fondo como las aledañas al cuerpo de agua. En general, el oleaje es un fenómeno natural común en los océanos, mares y otros cuerpos de agua, y es un componente importante en la dinámica de los sistemas marinos. El estudio del oleaje es esencial para diversas disciplinas, como la ingeniería portuaria y costera, la oceanografía y la meteorología.

Además de la definición de oleaje, una ola es una perturbación en la superficie del agua causada por el viento. Cuando el viento sopla sobre la superficie del océano, transfiere parte de su energía cinética al agua y crea ondas (oleaje). Estas ondas pueden propagarse a grandes distancias desde su fuente original y transportar energía a través del océano.

En la siguiente figura se observan las características esenciales que podemos observar y analizar sobre una ola.

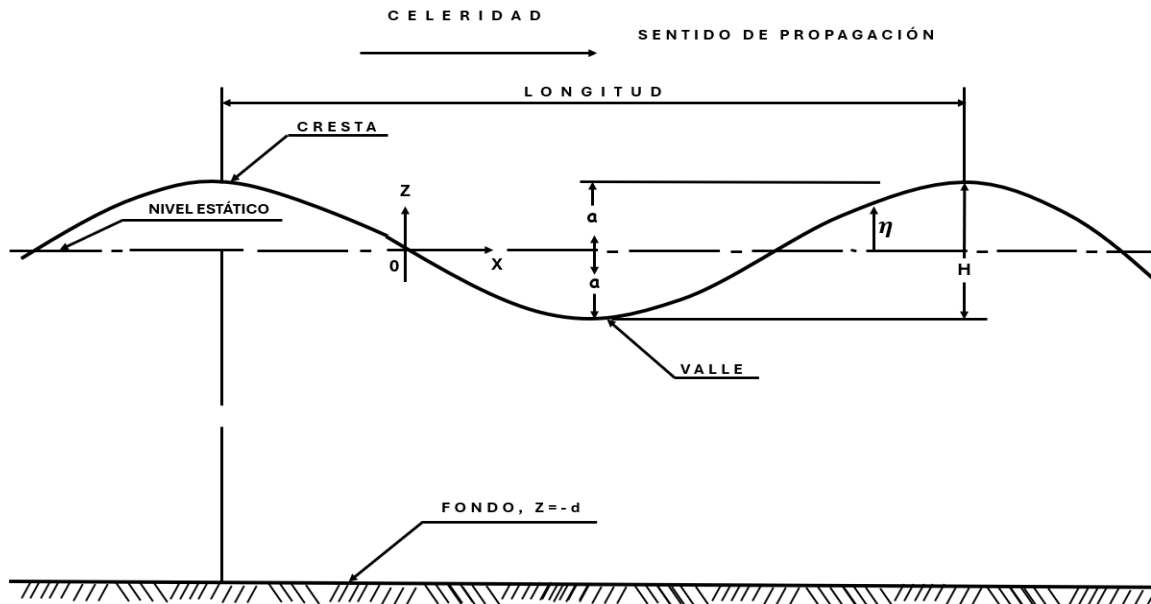


Figura 1.1 Características y partes de una ola

Fuente: Modificada de Frías, A. y Moreno, G. (1994).

De acuerdo con Frías, A. y Moreno, G. (1994), las características de una ola se definen de la siguiente manera:

- **Longitud de onda (L):** Es la distancia horizontal entre dos crestas o dos valles consecutivos de la ola.
- **Altura de la ola (H):** Es la distancia vertical entre el punto más bajo (valle) y la parte más alta (cresta) de la ola.
- **Celeridad (C):** Es la velocidad a la que viaja la ola, es decir, es el tiempo que tarda en pasar dos crestas o dos valles sucesivos por un punto fijo.
- **Cresta:** Es el punto más alto de una ola. Se caracteriza por ser la parte visible de la ola que se eleva sobre el nivel del agua.
- **Valle:** Es el punto más bajo de una ola. Se encuentra entre dos crestas consecutivas y se caracteriza por ser la parte hundida de la ola que se encuentra por debajo del nivel del agua.



- **Nivel estático:** Es el nivel del agua cuando no hay olas. Se considera la referencia para medir la altura de las olas o también denominado punto “cero”.
- **Sentido de propagación o dirección de incidencia:** Es la dirección en la que viaja la ola. Se puede determinar mediante la dirección en la que se mueven las crestas o los valles de la ola.

En la figura 1.1 se observan las partes que conforman una ola para entender mejor su comportamiento y cómo interactúan con el entorno. Conocer estas características nos ayuda a comprender cómo se forman, se mueven y se rompen las olas.

## 1.1.2 Espectros de oleaje

Los espectros de oleaje son representaciones gráficas que nos proporcionan información detallada sobre la distribución de la energía de las olas en relación con su frecuencia o periodo. Estos espectros son herramientas esenciales en disciplinas como la ingeniería portuaria y costera y la meteorología, ya que permiten analizar y comprender el comportamiento del oleaje en un cuerpo de agua específico y en la hidráulica experimental permite desarrollar el oleaje en los tanques o canales, para el análisis del comportamiento de las obras civiles construidas en los entornos portuarios y costeros.

El espectro de frecuencia nos muestra cómo se distribuye la energía de las olas en diferentes frecuencias. La frecuencia se refiere al número de ciclos de una onda que se producen en un segundo. Este tipo de espectro es valioso para entender la variabilidad de las frecuencias presentes en el oleaje.

Por otro lado, el espectro de periodo representa la distribución de la energía de las olas en función de sus periodos. El periodo es el tiempo que una onda necesita para completar un ciclo. Este tipo de espectro nos proporciona información sobre la duración y la regularidad de las olas en una ubicación específica.

Estos espectros se obtienen a partir de datos recopilados por instrumentos como boyas oceanográficas, boyas meteorológicas o sensores instalados en plataformas costeras. El análisis de los espectros de oleaje es crucial para comprender las condiciones del mar, anticipar eventos extremos, diseñar estructuras costeras resistentes y facilitar la navegación, entre otras aplicaciones prácticas.

De acuerdo con diferentes bibliografías consultadas existen tres espectros que son los más utilizados en la mayoría de los laboratorios marítimos, los cuales son:

- Espectro Bretschneider
- Espectro Pierson-Moskowitz
- Espectro Jonswap

Estos espectros nos permiten observar de manera gráfica y reproducir el comportamiento de las olas a través de los diferentes parámetros que se le asignen de acuerdo con el periodo y la frecuencia que se desea analizar y otros parámetros asignados a cada espectro según sea el caso; a continuación, se define su función de cada espectro.

### **1.1.2.1 Espectro de Bretschneider**

El espectro de Bretschneider, también conocido como el espectro de Bretschneider-Jonswap, es un modelo teórico utilizado en ingeniería portuaria y costera y meteorología para describir la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia.

El espectro de Bretschneider-Jonswap se utiliza para representar la variabilidad del oleaje en condiciones de viento moderado a fuerte. Incorpora parámetros específicos que se ajustan a la relación entre la altura significativa de las olas y el periodo pico. La forma funcional del espectro de Bretschneider-Jonswap es una combinación de una función exponencial para bajas frecuencias y una función de pico agudo para frecuencias altas.

Este espectro es valioso en la modelación numérica de olas y en estudios de ingeniería costera, ya que proporciona una representación más realista de la distribución de la energía de las olas en comparación con modelos más simples. La capacidad de capturar la variabilidad del oleaje en diferentes frecuencias hace que el espectro de Bretschneider sea una herramienta importante en la predicción de condiciones oceánicas y en el diseño de estructuras marinas.

De acuerdo con Frías, A. y Moreno, G. (1994), el espectro de Bretschneider de la siguiente manera:

$$E(f) = 0.430 \left( \frac{\bar{H}}{gT^2} \right)^2 \frac{g^2}{f^5} \exp \left[ -0.675 \left( \frac{1}{Tf} \right)^4 \right] \quad (1)$$

Donde:

$E$  está en  $(m^2 - seg)$

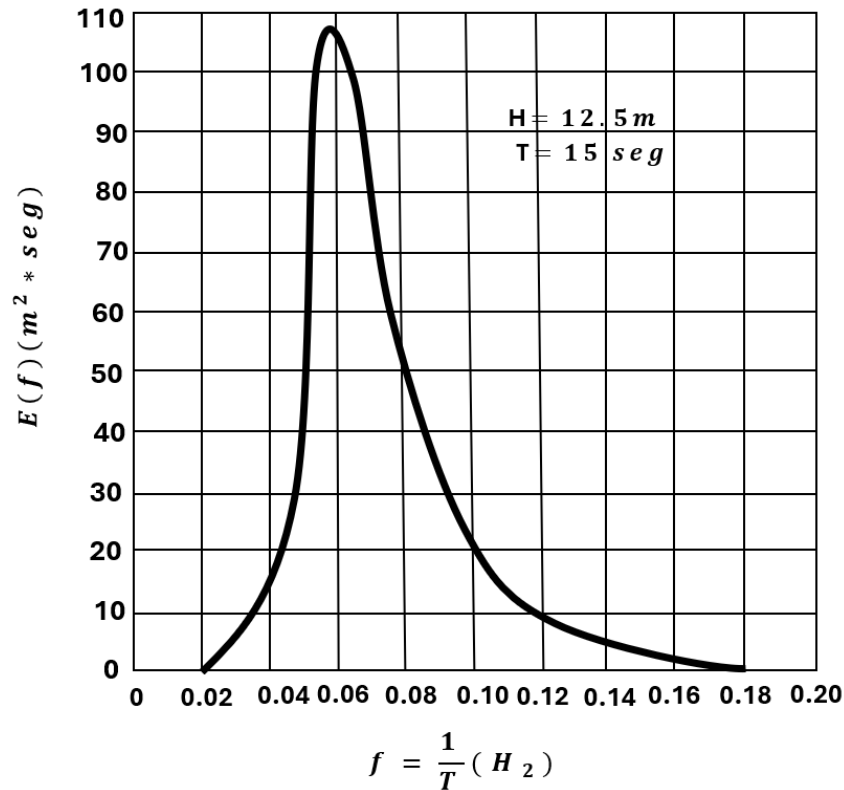
$$\bar{H} = 0.625H \frac{1}{3}$$

$$\bar{T} = 0.9T \frac{1}{3}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$f$  =frecuencia por estudiar

Su gráfica se representa de la siguiente manera de acuerdo con la figura 1.2 descrita por el autor antes mencionado.



**Figura 1.2 Espectro de Bretschneider**

Fuente: Modificada de Frías, A. y Moreno, G. (1994).

### 1.1.2.2 Espectro Pierson-Moskowitz

El espectro de Pierson-Moskowitz es un modelo teórico utilizado para describir la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia en condiciones de mar agitado. Este modelo fue propuesto por L. H. Pierson y M. Moskowitz en 1964 y es uno de los modelos más

conocidos y utilizados en la ingeniería portuaria y costera y la ingeniería oceánica.

El espectro de Pierson-Moskowitz se deriva de la teoría estadística de procesos aleatorios y se basa en la suposición de que el comportamiento del oleaje puede describirse de manera estadística. La fórmula matemática para el espectro de Pierson-Moskowitz proporciona la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia. La característica distintiva de este espectro es su forma de campana y su capacidad para describir condiciones extremas de oleaje.

La fórmula del espectro de Pierson-Moskowitz tiene en cuenta la velocidad del viento y la duración de éste sobre el área de generación de olas. Este espectro es particularmente aplicable en situaciones de viento constante y ha sido ampliamente utilizado en estudios de diseño de estructuras marítimas, pronósticos de olas y en la simulación numérica de condiciones oceánicas.

Es importante destacar que, aunque el espectro de Pierson-Moskowitz ha sido valioso en numerosas aplicaciones, existen otros modelos más avanzados que se utilizan en la actualidad para representar con mayor precisión la complejidad del oleaje en diversas condiciones.

El autor Armando Frías Valdez en su obra “ingeniería de costas” formula el espectro de Pierson-Moskowitz de la siguiente manera:

$$E(f) = \frac{8.10 \times 10^{-3} g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left(-0.74 \left(\frac{g}{2U_{19.5}f}\right)^4\right) \quad (2)$$

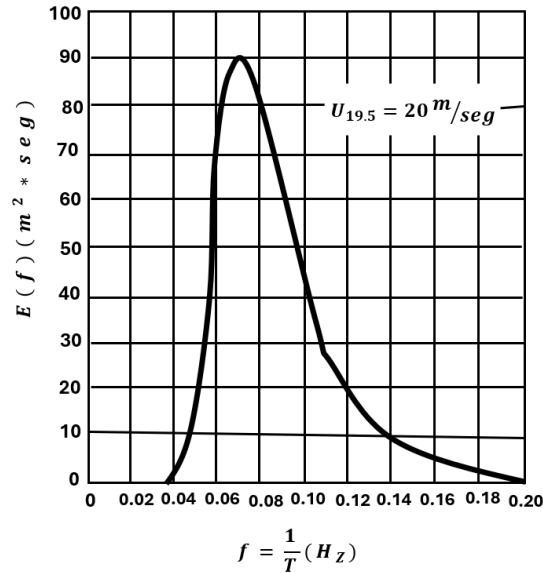
Donde:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$f$  = frecuencia por estudiar

$U_{19.5}$  = Velocidad del viento en  $m/seg$ , medida a  $19.5m$  sobre el nivel del mar.

Su gráfica se representa de la siguiente manera de acuerdo con la figura 1.3 descrita por el autor antes mencionado.



**Figura 1.3 Espectro Pierson-Moskowitz**

Fuente: Modificada de Frías, A. y Moreno, G. (1994).

### 1.1.2.3 Espectro JONSWAP

El espectro JONSWAP, cuyo nombre proviene de las iniciales del proyecto conjunto "Joint North Sea Wave Project" (Proyecto Conjunto de Oleaje del Mar del Norte), es un modelo teórico utilizado para describir la distribución de la energía de las olas en función de la frecuencia. Este espectro fue desarrollado a principios de la década de 1970 como parte de un esfuerzo colaborativo para mejorar la comprensión y la predicción del oleaje en el Mar del Norte entre Europa y América.

El espectro JONSWAP se diseñó específicamente para representar condiciones de oleaje en aguas profundas bajo la influencia de vientos fuertes. Su formulación matemática incorpora parámetros que tienen en cuenta la duración y la intensidad del viento, así como la influencia de olas mayores que son afectadas por la acción del viento. La característica distintiva del espectro JONSWAP es su capacidad para describir la variabilidad estacional y las condiciones de oleaje extremo. La fórmula del espectro incluye un factor de forma que modifica la distribución de energía de las olas la cual depende de la frecuencia y proporciona una mejor representación de las colas altas en el espectro de frecuencias.

El espectro JONSWAP ha sido ampliamente utilizado en estudios de ingeniería portuaria y costera, meteorología y en la ingeniería oceánica para la predicción y el diseño de estructuras marítimas. Aunque han surgido modelos más avanzados desde su introducción, el espectro

JONSWAP es una herramienta valiosa en diversas aplicaciones relacionadas con el oleaje.

De acuerdo con Frías, A. y Moreno, G. (1994), el espectro JONSWAP se describe de la siguiente manera:

$$E(f) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^{-4}\right] \gamma \exp\left[\frac{(f-f_m)^2}{2\lambda^2 f_m^2}\right] \quad (3)$$

Donde:

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

$f$  = frecuencia por estudiar

$f_m$  = frecuencia pico

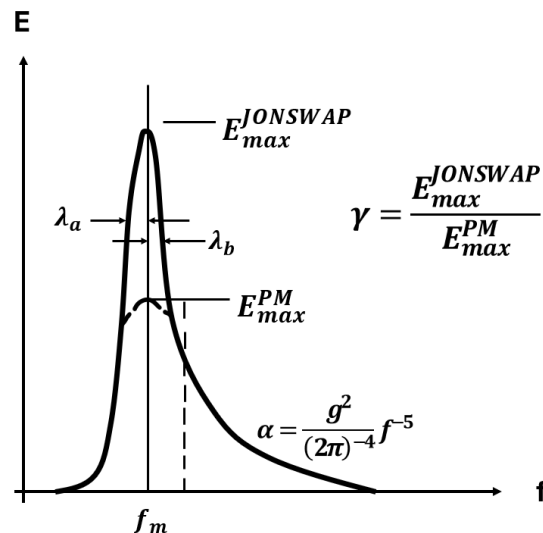
$\alpha$  = una constante con valor aceptado normalmente de 0.008

$\gamma$  = relación entre la máxima energía espectral del JONSWAP y la correspondiente al espectro de Pierson-Moskowits (PM)

$$\lambda a = 0.07, f \leq f_m$$

$$\lambda b = 0.09, f > f_m$$

Su gráfica se representa de la siguiente manera de acuerdo con la figura 1.4 descrita por el autor antes mencionado.



**Figura 1.4 Definición de parámetros del espectro JONSWAP**

Fuente: Modificada de Frías, A. y Moreno, G. (1994).

## 1.1.3 Teorías de oleaje

### 1.1.3.1 Teoría no lineal

La teoría no lineal de las olas es esencial cuando las perturbaciones en la superficie del agua, es decir, las variaciones en la elevación del nivel del mar causadas por las olas son significativas en términos de amplitud. La amplitud o altura de ola se refiere a la distancia vertical entre el punto más alto (cresta) y el punto más bajo (valle) de una ola. Cuando estas amplitudes son lo suficientemente grandes, las aproximaciones lineales, que asumen que las perturbaciones son pequeñas en comparación con la longitud de onda, ya no proporcionan una descripción precisa del fenómeno.

En otras palabras, la teoría no lineal se vuelve especialmente útil cuando las olas son de mayor amplitud o altura y frecuencia, y cuando las interacciones entre ellas se vuelven significativas. Este enfoque es crucial en situaciones donde la aproximación lineal podría subestimar la importancia de fenómenos como la modulación de amplitud, la generación de nuevas frecuencias y otros efectos no lineales que se vuelven más pronunciados en condiciones de oleaje más intenso. Por lo tanto, la teoría no lineal proporciona un marco más completo y preciso para describir y analizar el comportamiento del oleaje en estas condiciones más desafiantes.

Esta teoría es la más utilizada actualmente para los diversos estudios oceanográficos dentro de los laboratorios de hidráulica marítima, por ello, existen diversas metodologías desarrolladas para proporcionar los comportamientos de las olas en el mar.

### 1.1.3.2 Teoría lineal (senoidal)

La teoría lineal de las olas es un enfoque matemático que se utiliza para describir y analizar olas en cuerpos de agua, asume que las perturbaciones en la superficie del agua son pequeñas en comparación con la longitud de onda de las olas. Este enfoque es particularmente efectivo para estudiar olas de baja amplitud en condiciones de aguas profundas.

La teoría lineal se basa en la ecuación de onda de Airy, que describe la propagación de ondas sinusoidales en aguas profundas (figura 1.5). La suposición clave en esta teoría es que la amplitud de las olas es tan pequeña que los términos cuadráticos y superiores en las ecuaciones de movimiento pueden ser despreciados. Según la teoría lineal, las olas se propagan sin cambio en su forma básica, y la velocidad de propagación de la energía de las olas (la velocidad de grupo) es igual a la velocidad de

propagación de una onda individual (la velocidad de fase). Además, la teoría lineal asume que las olas no interactúan entre sí, lo que significa que se pueden superponer de manera lineal.

Esta teoría proporciona soluciones analíticas simples y elegantes para describir las características fundamentales de las olas, como su longitud de onda, frecuencia y velocidad de propagación. Sin embargo, es importante destacar que la teoría lineal tiene sus limitaciones y es más aplicable a condiciones de oleaje suave en aguas profundas. Para describir fenómenos más complejos, como olas de mayor amplitud o en áreas costeras, se requieren enfoques no lineales más avanzados.

De acuerdo con estas dos teorías que sentaron las bases para que diversos científicos e investigadores desarrollaran sus propias interpretaciones, las cuales fueron las siguientes:

### **1.1.3.3 Teoría trocoidal**

La teoría trocoidal de las olas es un enfoque más avanzado que la teoría lineal y se utiliza para describir olas con amplitudes más significativas y en condiciones donde las interacciones no lineales juegan un papel importante. Esta teoría es particularmente relevante en áreas costeras, donde la profundidad del agua puede ser comparable a la longitud de onda de las olas.

En la teoría trocoidal, se reconoce que las olas pueden tener amplitudes tales que los términos cuadráticos y superiores en las ecuaciones de movimiento. Por lo tanto, se permite que las olas adopten formas más complejas, conocidas como formas trocoidales, que son curvas que se asemejan a la cresta de una ola.

Un aspecto importante de la teoría trocoidal es que tiene en cuenta la variación de la profundidad del agua a medida que las olas se propagan. A diferencia de la teoría lineal, que se aplica principalmente en aguas profundas, la teoría trocoidal permite describir el comportamiento del oleaje en áreas donde la profundidad del agua es comparable con la longitud de onda.

### **1.1.3.4 Teoría de onda solitaria**

La teoría de onda solitaria es un enfoque que describe un fenómeno específico en el comportamiento de las olas: las llamadas "solitones" o "ondas solitarias". Una onda solitaria es una forma de onda que mantiene su forma y velocidad mientras se propaga sin disiparse, a diferencia de otras olas que tienden a dispersarse a medida que avanzan.



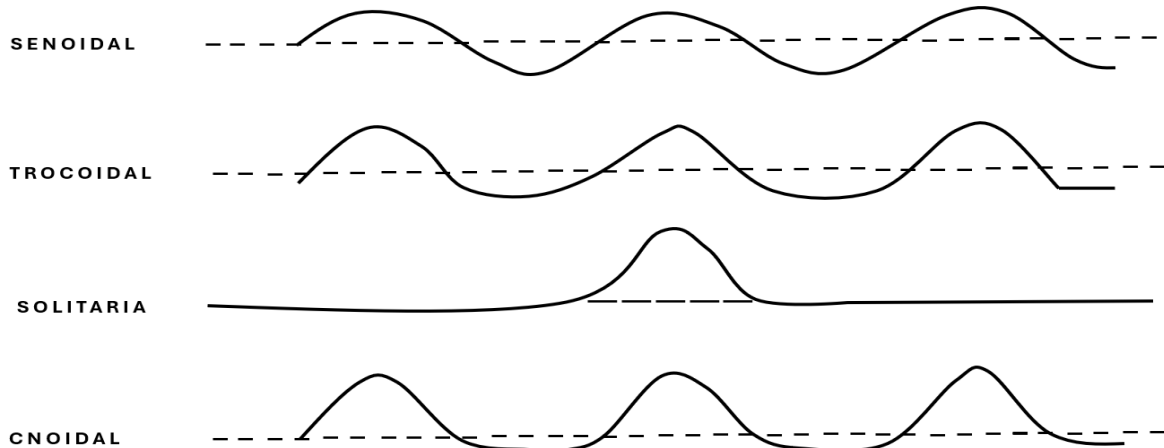
En la teoría de onda solitaria, se considera que estas ondas mantienen su integridad estructural debido a una delicada compensación entre los efectos de la no linealidad y la dispersión. La no linealidad tiende a hacer que la onda se agrande y se estire, mientras que la dispersión tiende a dispersar la energía de la onda. En una onda solitaria, estos dos efectos se equilibran de manera única, lo que permite que la onda se mueva como una entidad cohesiva a través del medio acuático. Un ejemplo común de onda solitaria es el famoso "solitón de Korteweg–de Vries" (solitón KdV), que se puede observar en canales o ríos. El solitón KdV es una onda única y localizada que mantiene su forma y velocidad mientras se propaga. Se forma debido a la interacción no lineal y la dispersión en un medio acuático.

El estudio de las ondas solitarias es relevante en varias disciplinas, desde la ingeniería portuaria y costera hasta la física no lineal. Este fenómeno se ha observado en la naturaleza y se ha modelado matemáticamente, proporciona una perspectiva sobre la complejidad del comportamiento de las olas en condiciones específicas. La teoría de onda solitaria destaca cómo ciertas condiciones pueden dar lugar a patrones únicos y estables en el movimiento ondulatorio.

### **1.1.3.5 Teoría cnoidal**

La teoría cnoidal es una aproximación matemática que describe un tipo específico de onda, conocida como onda cnoidal que puede observarse en cuerpos de agua. La onda cnoidal es una solución a las ecuaciones no lineales que describen la propagación de olas, y se caracteriza por tener crestas y valles más pronunciados que las olas sinusoidales, pero menos abruptos que las ondas solitarias (figura 1.5).

En la teoría cnoidal, se utilizan funciones matemáticas específicas llamadas funciones cnoidales para describir la forma de estas olas. Estas funciones tienen en cuenta tanto los efectos de la no linealidad como la dispersión, lo que permite modelar ondas que mantienen su forma a medida que se propagan. Las ondas cnoidales son especialmente relevantes en áreas costeras y pueden observarse en condiciones específicas, como la interacción entre corrientes y vientos. A diferencia de las ondas sinusoidales ideales, las ondas cnoidales son capaces de mantener su forma incluso cuando interactúan con obstáculos o se propagan en aguas someras.



**Figura 1.5 Clasificación de las diferentes teorías del oleaje**

Fuente: Modificada de Frías, A. y Moreno, G. (1994).

## 1.1.4 Clasificación de las olas de acuerdo con su profundidad relativa

La clasificación de las olas según su profundidad relativa se basa en la relación entre la profundidad del agua y la longitud de onda de las olas. Esta clasificación se divide en tres categorías principales: olas de aguas profundas, olas de transición y olas de aguas someras.

### 1.1.4.1 Aguas someras

En esta categoría, la profundidad del agua es significativamente menor que la mitad de la longitud de onda. Las olas de aguas someras experimentan una mayor interacción con el lecho marino, lo que afecta significativamente su comportamiento. La velocidad de fase depende en gran medida de la profundidad y la longitud de onda, y la dispersión es más pronunciada. Las olas de aguas someras tienden a modificar su forma y velocidad a medida que se propagan, y pueden llegar a romper en la costa.

Aquí hay algunas características clave de las olas en aguas someras:

#### **I. Interacción con el Lecho Marino:**

En aguas someras, la parte inferior de las olas interactúa más intensamente con el lecho marino. Esto puede dar lugar a la deformación de las olas, ya que la parte inferior de la ola experimenta fricción con el lecho marino y se reduce su velocidad en comparación con la parte superior.

#### **II. Mayor Dispersión:**

La dispersión es más pronunciada en aguas someras. La velocidad de propagación de las olas está influenciada por la profundidad y la longitud de onda, y esto conduce a una variación más significativa en las velocidades de fase a través del espectro de frecuencias.

### III. Transformación de la Ola:

A medida que las olas ingresan a aguas someras, tienden a modificar su forma y pueden llegar a romper. La ruptura de las olas se produce cuando la cresta de la ola se mueve más rápido que la propia ola, lo que da lugar a una elevación pronunciada y, finalmente, a la formación de la espuma en la cresta de la ola.

### IV. Efecto en la Energía de las Olas:

En aguas someras, la energía de las olas tiende a concentrarse en las frecuencias más altas. Esto significa que las olas de frecuencia más baja pueden disipar su energía más rápidamente, mientras que las de frecuencias más altas pueden mantener su energía por distancias más largas.

### V. Importancia en Ingeniería Costera:

La comprensión del comportamiento de las olas en aguas someras es crucial en ingeniería costera, ya que las características del oleaje influyen en la erosión de la costa, la estabilidad de estructuras marítimas y la planificación de actividades costeras.

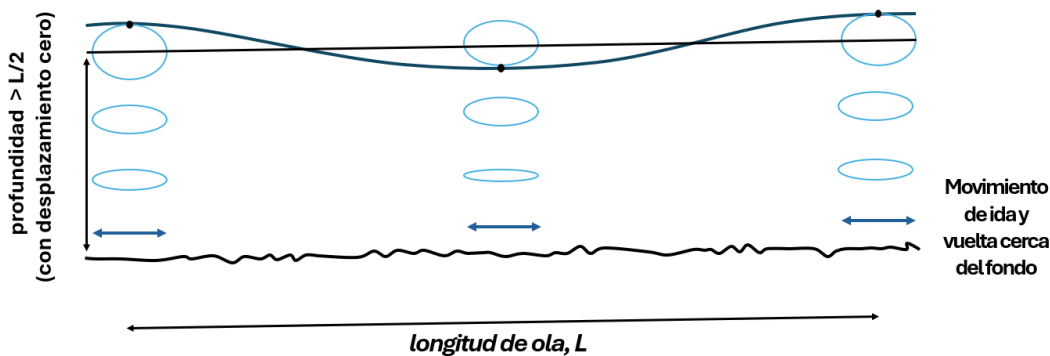


Figura 1.6 Movimiento de partículas en aguas someras

Fuente: Modificada de Waves, Tides and Shallow-Water Processes (1989).

#### 1.1.4.2 Aguas de transición

Las aguas de transición o aguas intermedias son áreas en las cuales la profundidad del agua se encuentra en una zona intermedia, es decir, es comparable a la mitad de la longitud de onda de las olas que se están propagando. Esta condición ubica a las olas en una categoría intermedia entre las aguas profundas y las aguas someras, lo que resulta en un comportamiento que refleja características de ambos extremos del espectro.

Estas olas se encuentran en una zona intermedia, donde la profundidad del agua es comparable a la mitad de la longitud de onda. En este caso, las olas experimentan una transición entre comportamientos característicos de las olas de aguas profundas y las de aguas someras. La dispersión empieza a jugar un papel más importante, y la velocidad de fase de las olas puede depender tanto de la profundidad como de la longitud de onda.

A continuación, se destacan algunas características clave de las olas en aguas de transición:

**I. Cambios en la velocidad de propagación:**

En aguas de transición, la velocidad de propagación de las olas puede depender tanto de la profundidad del agua como de la longitud de onda. A medida que las olas se mueven de aguas profundas a aguas someras, su velocidad de fase puede experimentar cambios significativos.

**II. Interacción con el lecho marino:**

Aunque la interacción con el lecho marino es menos intensa que en aguas someras, aún tiene un impacto en la propagación de las olas en aguas de transición. La forma de las olas puede cambiar debido a esta interacción, pero generalmente de manera menos pronunciada que en aguas someras.

**III. Dispersión intermedia:**

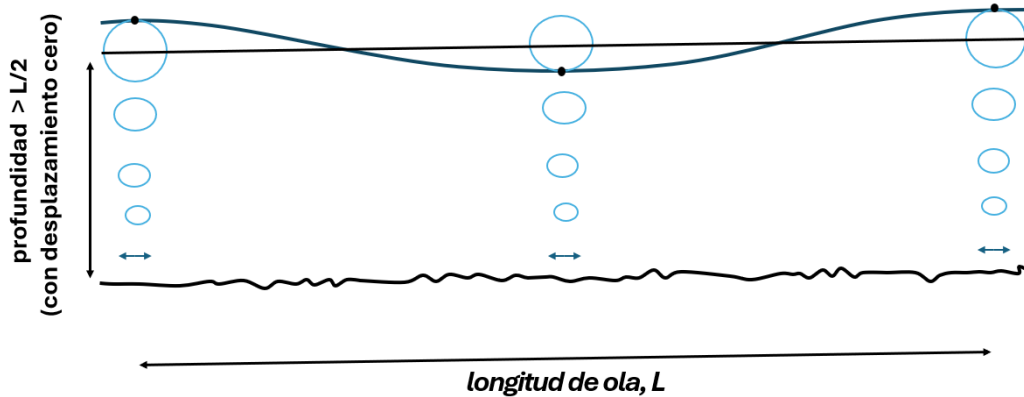
La dispersión en aguas de transición es intermedia entre las aguas profundas y las aguas someras. Existe una cierta dependencia de la frecuencia con la profundidad del agua, lo que significa que las diferentes frecuencias pueden experimentar velocidades de fase distintas.

**IV. Reflexión y atenuación:**

En aguas de transición, la reflexión y la atenuación de las olas pueden ser más significativas que en aguas profundas. La energía de las olas puede dispersarse y atenuarse más rápidamente que en aguas profundas, pero menos que en aguas someras.

**V. Relevancia en zonas costeras:**

Las aguas de transición son comunes en zonas costeras, donde la profundidad del agua puede variar significativamente debido a la topografía submarina y la cercanía a la costa. La comprensión del comportamiento del oleaje en estas áreas es crucial para la planificación y el diseño de estructuras costeras.



**Figura 1.7 Movimiento de partículas en aguas intermedias**

Fuente: Modificada de Waves, Tides and Shallow-Water Processes (1989).

### 1.1.4.3 Aguas profundas

Las aguas profundas se refieren a áreas donde la profundidad del agua es significativamente mayor que la mitad de la longitud de onda de las olas que se están propagando. Este entorno caracteriza a vastas extensiones de océanos y mares, donde la topografía submarina permite que las olas mantengan su forma y velocidad durante largas distancias. A continuación, se enumeran algunas características clave de las olas en aguas profundas:

**I. Propagación sin cambios significativos:**

En aguas profundas, las olas tienden a propagarse sin experimentar cambios significativos en su forma. La interacción con el fondo marino es mínima, lo que permite que las olas mantengan su estructura original a lo largo de distancias considerables.

**II. Velocidad de propagación:**

La velocidad de propagación de las olas en aguas profundas está determinada principalmente por la frecuencia y la longitud de onda, y no depende fuertemente de la profundidad del agua. Este comportamiento está en línea con las predicciones de la teoría lineal de ondas.

**III. Menor influencia del fondo marino:**

A diferencia de las aguas someras, donde el fondo marino afecta significativamente el comportamiento de las olas, en aguas profundas la interacción con el lecho marino es mínima. Esto permite que las olas se propaguen con mayor libertad y sin deformaciones notables.

**IV. Dispersión menos pronunciada:**

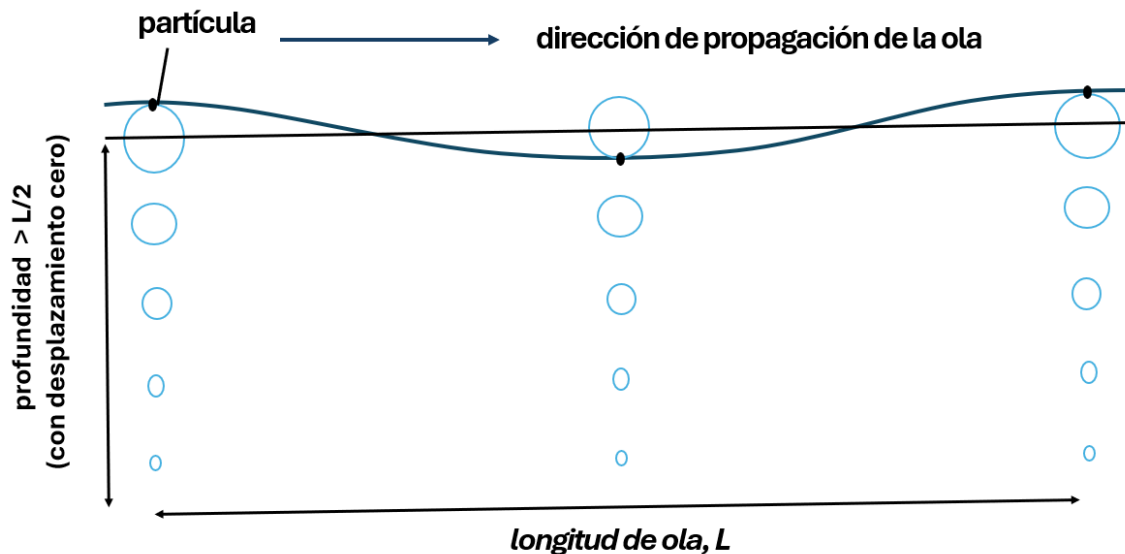
La dispersión, que se refiere a la variación de la velocidad de propagación con la frecuencia, es menos pronunciada en aguas profundas. Esto significa que las olas de diferentes frecuencias tienden a moverse a velocidades similares, lo que contribuye a la propagación uniforme de la energía de las olas.

**V. Importancia en navegación:**

Las aguas profundas son cruciales para la navegación marítima, ya que proporcionan rutas de transporte más predecibles y seguras. Las olas en aguas profundas tienen menos probabilidades de romper, lo que es beneficioso para la navegación de embarcaciones.

**VI. Investigación oceanográfica:**

La comprensión del comportamiento del oleaje en aguas profundas es esencial para la investigación oceanográfica, la modelización climática y la predicción meteorológica, ya que estas áreas representan la mayor parte de los océanos globales.



**Figura 1.8 Movimiento de partículas en aguas profundas**

Fuente: Modificada de Waves, Tides and Shallow-Water Processes (1989).

### 1.1.4.4 Ecuaciones de la teoría lineal de Airy

En la siguiente tabla podemos observar las fórmulas que nos permiten conocer la propagación de las ondas superficiales para obtener la energía y potencia que transportan las olas a través del agua, tal como se muestra en la siguiente clasificación:

Tabla 1.1 Ecuaciones de la teoría de propagación de Airy

Profundidad relativa	Aguas someras	Aguas intermedias	Aguas profundas
	$\frac{1}{20} \geq \frac{h}{\lambda}$	$\frac{1}{20} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$	$\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$
Perfil, $\eta$	$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$	$\eta = \frac{H}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T}\right)$
Velocidad, $C$	$C = \sqrt{gh}$	$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$C = C_0 = \frac{gT}{2\pi} = 1.56T$
Longitud de onda, $\lambda$	$\lambda = T\sqrt{gh}$	$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right)$	$\lambda = \lambda_0 = \frac{gT^2}{2\pi} = 1.56T^2$
Velocidad de grupo, $C_g$	$C_g = \sqrt{gh}$	$C_g = \frac{C}{2} \left[ 1 + \frac{\frac{4\pi H}{\lambda}}{\sinh\frac{4\pi H}{\lambda}} \right]$	$C_g = \frac{C}{2} = \frac{gT}{4\pi}$
Velocidad horizontal del agua, $u$	$u = \frac{H}{2} \sqrt{\frac{g}{h}} \cos\theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\cosh\left[\frac{2\pi(z+h)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \cos\theta$	$u = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \cos\theta$
Velocidad vertical del agua, $w$	$w = \frac{\pi H}{T} \left(1 + \frac{z}{h}\right) \sin\theta$	$\frac{H}{2} \frac{gT}{\lambda} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+h)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \sin\theta$	$w = \frac{\pi H}{T} e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \sin\theta$
Aceleración horizontal del agua, $a_x$	$a_x = \frac{\pi H}{T} \sqrt{\frac{g}{h}} \sin\theta$	$\frac{g\pi H}{\lambda} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+h)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \sin\theta$	$a_x = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \sin\theta$
Aceleración vertical del agua, $a_y$	$a_y = -2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 \left(1 + \frac{z}{h}\right) \cos\theta$	$\frac{g\pi H}{\lambda} \frac{\sinh\left[\frac{2\pi(z+h)}{\lambda}\right]}{\cosh\left[\frac{2\pi h}{\lambda}\right]} \cos\theta$	$a_y = 2H \left(\frac{\pi}{T}\right)^2 e^{\frac{2\pi z}{\lambda}} \cos\theta$

Fuente: Ingeniería de costas (1994).

## **1.2 Generador de olas**

Un generador de olas es un dispositivo diseñado para producir y controlar olas en un cuerpo de agua, como un tanque o un canal. Estos dispositivos se utilizan en entornos de laboratorio, instalaciones de investigación o en proyectos de ingeniería costera para realizar pruebas experimentales y estudiar el comportamiento de las olas en diferentes condiciones.

Existen diferentes tipos de generadores de olas y su diseño puede variar según el propósito específico de la investigación o el experimento. Algunos generadores de olas utilizan dispositivos mecánicos, como pistones o palas oscilantes, para crear perturbaciones en el cuerpo de agua y generar olas. Otros pueden emplear sistemas neumáticos, eléctricos o magnéticos para lograr el mismo propósito.

La capacidad de controlar parámetros como la altura de las olas, la frecuencia, el periodo y la dirección permite a los investigadores replicar y estudiar diferentes condiciones de oleaje en un entorno controlado. Estos generadores son útiles en la investigación de procesos oceanográficos, el diseño de estructuras marítimas, la evaluación de la respuesta de embarcaciones ante olas y en la simulación de eventos extremos, entre otras aplicaciones.

### **1.2.1 Funcionamiento**

En los laboratorios de hidráulica marítima se utilizan principalmente generadores de olas, ingeniosos inventos diseñados para reproducir con precisión las dinámicas del oleaje en un entorno controlado. En estos laboratorios, un extenso tanque de agua sirve como medio para la creación de condiciones marítimas simuladas a escala que sean iguales o semejantes al comportamiento de las olas reales. El generador de olas, a menudo desplazado por un motor que transmite el movimiento a través de un pistón mecánico desempeña un papel central al moverse estratégicamente en el extremo del tanque, genera ondas controladas en la superficie del agua. Un sofisticado sistema de control regula la frecuencia, amplitud y forma de las olas, lo que permite a los investigadores programar parámetros específicos para simular condiciones oceanográficas variadas.

Los instrumentos de medición utilizados dentro de los laboratorios miden la variación del nivel del agua producido por el movimiento del oleaje ocasionado por un generador de olas y al mismo tiempo estos datos son procesados por equipos de cómputo que traducen estas variaciones en datos precisos sobre las características del oleaje, en particular de la variación del nivel del agua como la altura, longitud y velocidad de las olas.



Modelos a escala de estructuras marinas, como plataformas petroleras o boyas, se colocan en el tanque para estudiar la interacción de las olas con estas estructuras y evaluar su estabilidad. Algunos laboratorios avanzados incorporan sistemas de acondicionamiento del agua para simular de manera más realista el entorno marino, mientras que otros cuentan con generadores de olas bidireccionales para recrear situaciones más complejas. En conjunto, estos dispositivos permiten a los científicos e ingenieros explorar y comprender a fondo el comportamiento de las olas, hecho que desempeña un papel esencial en la investigación y el diseño de estructuras marinas.



**Figura 1.9 Ejemplo del funcionamiento de un generador de olas dentro de un laboratorio**

Fuente: University of Plymouth (2017).

A continuación, se mostrarán los antecedentes más sobresalientes sobre los generadores de olas:

## 1.2.2 Antecedentes

Los orígenes de los generadores de olas se remontan a la necesidad de los científicos de comprender mejor el comportamiento de las olas en el océano. A medida que la investigación en ingeniería portuaria y costera se desarrolló en el siglo XIX y principios del siglo XX, se hizo evidente que las

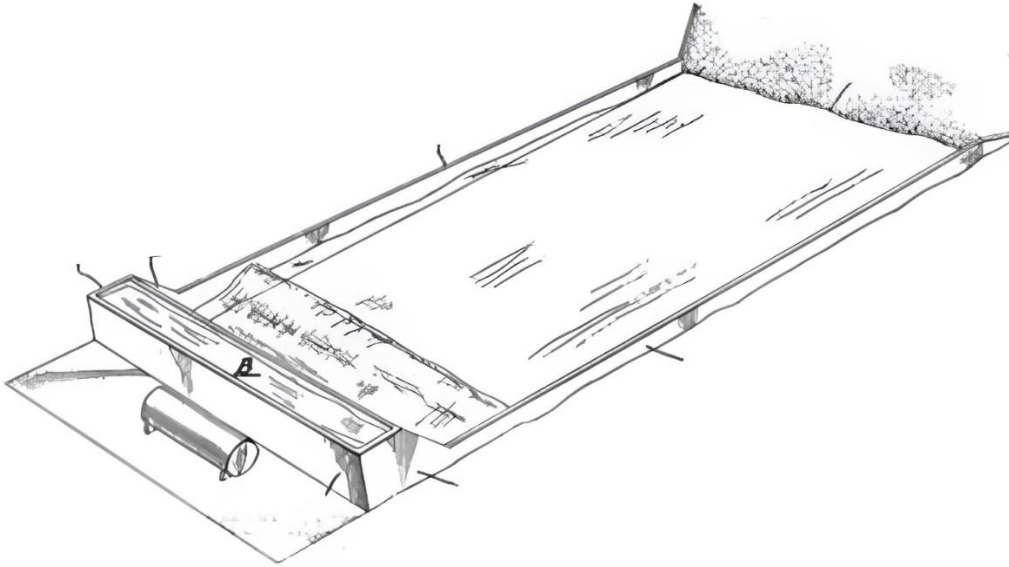
olas tenían un impacto significativo en una variedad de aspectos marinos, desde la erosión costera hasta la navegación y la seguridad en alta mar. Sin embargo, estudiar las olas en el entorno oceánico real presentaba desafíos considerables por lo que se volvió evidente que se requería de una manera de recrear olas controladas en laboratorios para estudiar sus características y efectos. Las olas en el océano son influenciadas por múltiples factores, como el viento, la profundidad del agua, la topografía del fondo marino y la interacción con corrientes. Esto hace que las condiciones sean altamente variables y difíciles de controlar para la investigación científica. Observar y medir con precisión estas olas en el océano abierto era un desafío en sí mismo, y no era posible reproducir y estudiar todas las posibles combinaciones de factores en un entorno controlado.

Para abordar esta limitación y permitir investigaciones más rigurosas y controladas, los científicos comenzaron a experimentar con la creación de olas en laboratorios y tanques de prueba. Los primeros enfoques involucraban sistemas simples, como agitar el agua manualmente o utilizar dispositivos rudimentarios para generar pequeñas ondas. Estos métodos iniciales eran limitados en términos de precisión y capacidad para replicar condiciones realistas de oleaje.

A lo largo del tiempo, los generadores de olas han experimentado un desarrollo significativo en términos de tecnología y diseño. Desde sus inicios modestos hasta las soluciones de vanguardia de hoy en día, los avances tecnológicos han desempeñado un papel crucial en la evolución de estos dispositivos.

### **1.2.2.1 Primeros enfoques mecánicos**

Los primeros enfoques mecánicos en los generadores de olas se remontan a los primeros intentos de los científicos por simular y estudiar el comportamiento de las olas en entornos controlados. Estos enfoques iniciales eran bastante rudimentarios en comparación con las soluciones sofisticadas de hoy en día, pero marcaron el comienzo de la evolución de los generadores de olas. Se enlistan los primeros enfoques que se obtuvieron a continuación:



**Figura 1.10 Primer diseño registrado del generador de olas de tipo tanque de descarga con piscina de planta regular**

Fuente: Modificada de Apparatus and method for producing waves (1969).

### 1.2.2.1.1 Agitación manual

En los primeros experimentos, los científicos utilizaban métodos manuales para generar pequeñas olas en tanques de agua. Esto podría involucrar agitar el agua con las manos o con herramientas simples. Aunque estos enfoques eran básicos, permitían a los investigadores observar cómo se propagaban las ondas en el agua y comenzar a comprender algunos de los conceptos básicos del oleaje.

### 1.2.2.1.2 Dispositivos rudimentarios

Los equipos rudimentarios eran las herramientas y dispositivos básicos que los científicos utilizaban en los primeros días de la investigación sobre el comportamiento de las olas. Aunque estos dispositivos eran simples y carecían de la sofisticación de los generadores de olas modernos, desempeñaron un papel crucial en la exploración inicial de cómo las olas interactúan y se propagan en el agua. A medida que la investigación en ingeniería portuaria y costera se desarrollaba, los científicos comenzaron a diseñar dispositivos más elaborados para generar olas controladas. Estos dispositivos tempranos incluían palas o barras que se movían mecánicamente en el agua para crear ondulaciones. Aunque estos dispositivos eran más efectivos que la agitación manual, todavía tenían limitaciones en términos de control y precisión.

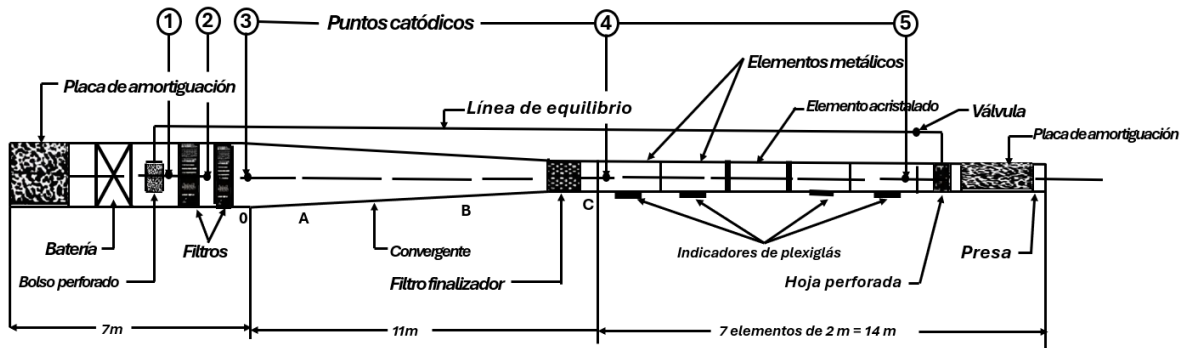
- **Palas y barras:** Uno de los primeros enfoques consistía en usar palas o barras móviles en el agua para generar olas. Los científicos podrían mover estas palas manualmente o mediante algún mecanismo simple, para crear ondulaciones en la superficie del agua. Aunque este enfoque era básico, permitía a los investigadores observar cómo las ondas se propagaban y cómo interactuaban con las características del agua.
- **Tablones de madera:** En algunos casos, los científicos utilizaban tablones de madera que se balanceaban o se movían en el agua para crear pequeñas olas. Estos tablones podían ser accionados manualmente o mediante algún tipo de mecanismo rudimentario. Aunque los resultados no eran tan controlados como los generadores modernos, proporcionaban una forma temprana de estudiar cómo las ondas se formaban y se movían en el agua.
- **Limitaciones y desafíos:** Estos equipos rudimentarios tenían varias limitaciones. La falta de control preciso sobre las características de las olas generadas dificultaba la repetibilidad de los experimentos. Además, la capacidad de recrear condiciones realistas de oleaje, como diferentes tipos de olas y su interacción, era limitada.
- **Exploración de conceptos básicos:** A pesar de sus limitaciones, estos equipos rudimentarios permitían a los científicos explorar conceptos básicos sobre la generación y propagación de las olas. Fueron esenciales para establecer las bases del campo de la ingeniería portuaria y costera y para inspirar desarrollos posteriores en generadores de olas más avanzados.

### **1.2.2.1.3 Limitaciones de control**

Uno de los desafíos clave de estos primeros enfoques mecánicos era la falta de control preciso sobre las características de las olas generadas. La altura, la frecuencia y la forma de las olas eran difíciles de ajustar de manera consistente, lo que limitaba la capacidad de los científicos para recrear condiciones de oleaje específicas y repetibles.

La falta de control preciso también resultaba en una variabilidad significativa en la repetición de los experimentos. Dado que los científicos dependían en gran medida de movimientos manuales o dispositivos rudimentarios, era difícil recrear las mismas condiciones de oleaje una y otra vez. Esta variabilidad dificultaba la obtención de datos confiables y la identificación de patrones consistentes. Los primeros enfoques mecánicos tenían dificultades para generar una amplia gama de tipos de olas. Esto se debía a que los dispositivos simples no podían imitar con precisión la complejidad de las condiciones de oleaje en el océano real. Por lo tanto,

los científicos solo podían estudiar un conjunto limitado de escenarios de oleaje.



**Figura 1.11 Esquema de componentes y partes de uno de los generadores iniciales**

Fuente: Modificada de Laboratory wave-generating apparatus (1953).

Como observamos en la figura 1.11 los primeros generadores solamente se basaban en la generación de movimiento oscilatorio sin algún tipo de retroalimentación como se utiliza actualmente, en su caso se guiaban a partir de pulsos que el mismo mecanismo de arranque generaba, por lo que era difícil tener un control correcto sobre los movimientos que se generaban.

#### 1.2.2.1.4 Replicación de condiciones oceanográficas

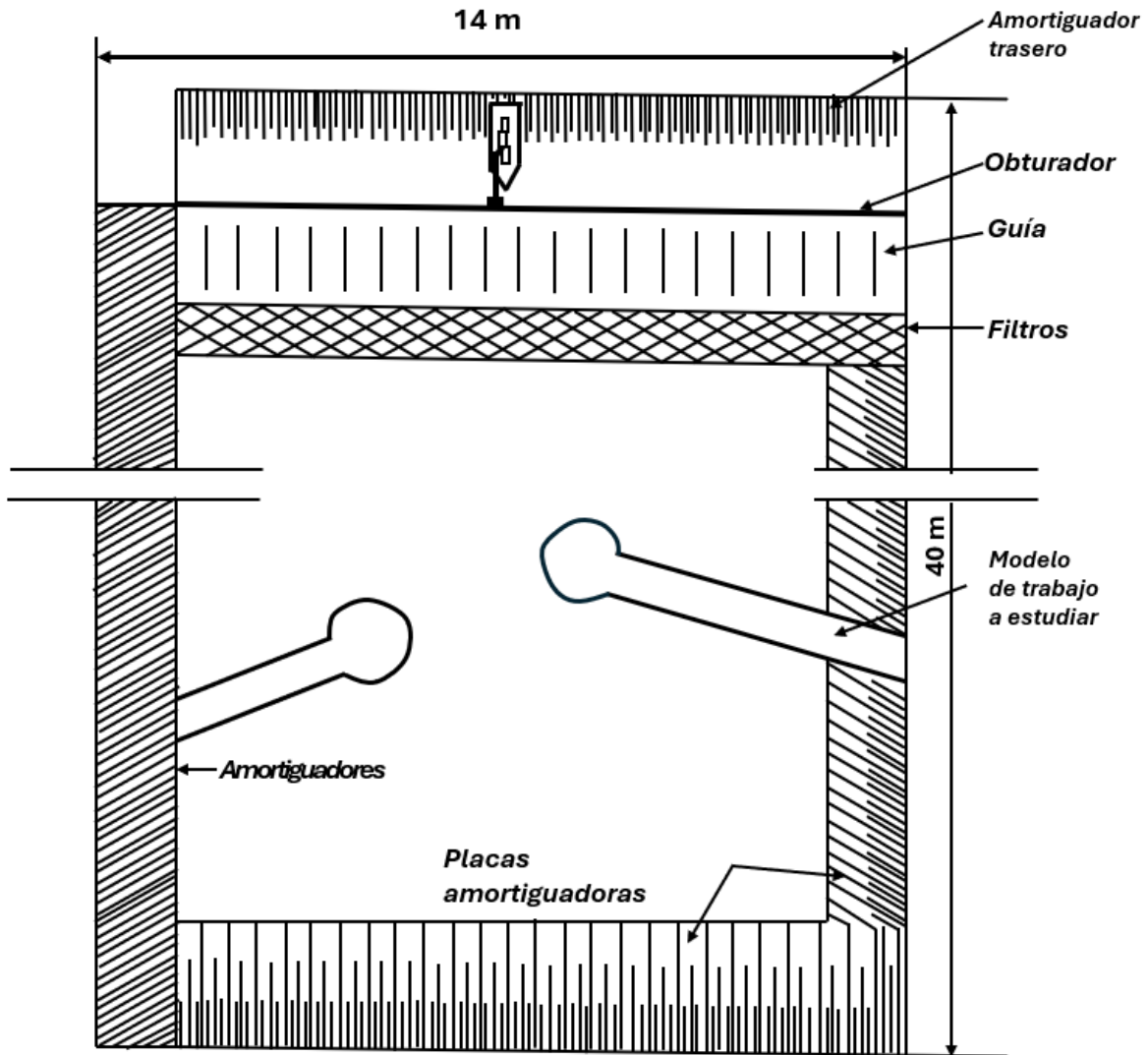
Los primeros enfoques mecánicos también tenían dificultades para replicar con precisión las condiciones complejas del océano, como la interacción entre diferentes tipos de olas y la influencia de factores externos como el viento y las corrientes. Esto hacía que los resultados de los experimentos fueran menos representativos de las condiciones reales del océano.

La réplica de las condiciones oceánicas en los generadores de olas es un aspecto crucial para garantizar que los experimentos y pruebas realizadas en laboratorios proporcionen resultados representativos y aplicables al entorno marino real. A continuación, se presenta más información sobre cómo se aborda la reproducción de condiciones oceánicas:

- **Complejidad de las condiciones oceánicas:** Las condiciones oceánicas son extremadamente complejas y variables. La generación de olas en laboratorios busca imitar la variabilidad natural del océano, considera factores como la dirección del viento, la profundidad del agua, la topografía del fondo marino y la

interacción con corrientes. Replicar estas condiciones con precisión es un desafío debido a la diversidad de factores involucrados.

- **Generación de olas multidireccionales:** La mayoría de los generadores de olas avanzados buscan replicar no solo la altura y la frecuencia de las olas, sino también su dirección. Los dispositivos modernos están diseñados para generar olas multidireccionales, permite que las pruebas en el laboratorio simulen situaciones más realistas donde las olas pueden provenir de diferentes ángulos.
- **Plataformas oscilantes y sistemas de paletas:** La implementación de plataformas oscilantes y sistemas de paletas ha sido esencial para replicar mejor las condiciones oceánicas. Estos mecanismos imitan los movimientos del agua del océano de manera más fiel, lo que resulta en olas con perfiles más realistas y permite estudiar cómo interactúan con diversas estructuras y dispositivos.
- **Simulación de oleaje direccional y espectral:** Los generadores de olas más avanzados pueden simular no solo la dirección de las olas, sino también su espectro de energía. La energía del oleaje oceánico está distribuida en diferentes frecuencias y direcciones. La capacidad de replicar esta distribución es fundamental para estudiar cómo ciertas estructuras responden a las condiciones oceánicas reales.
- **Control de parámetros específicos:** La replicación efectiva implica el control preciso de parámetros específicos, como la altura de las olas, la frecuencia y la longitud de onda. Los sistemas modernos permiten ajustar estos parámetros de manera precisa, lo que facilita la recreación de condiciones específicas y la repetición de experimentos para obtener resultados confiables.
- **Integración con modelos numéricos:** La replicación de condiciones oceánicas se ha beneficiado de la integración con modelos numéricos. Al comparar los resultados de los experimentos de laboratorio con los resultados de modelos numéricos, los científicos pueden mejorar la precisión de sus simulaciones y validar la representación de las condiciones oceánicas en sus generadores de olas.
- **Tamaño y escala:** La escala también es un factor crítico. A medida que los generadores de olas se han vuelto más grandes y capaces, se ha mejorado la capacidad para replicar condiciones oceánicas a una escala más cercana a la realidad. Esto es esencial para estudiar fenómenos a gran escala, como la interacción oleaje-estructura en plataformas fuera de costa (offshore).



**Figura 1.12 Ejemplo de los primeros modelos hidráulicos utilizados para la replicación de condiciones oceanográficas**

Fuente: Modificada de Laboratory wave-generating apparatus (1953).

### 1.2.2.1.5 Exploración de conceptos básicos

A pesar de estas limitaciones, los primeros enfoques mecánicos permitieron a los científicos explorar conceptos fundamentales del oleaje y cómo las ondas se propagan y se transforman en el agua. Estos experimentos pioneros sentaron las bases para el desarrollo de tecnologías más avanzadas en generadores de olas en las décadas posteriores.

## **1.2.3 Avances tecnológicos en hidráulica**

Los avances en hidráulica han desempeñado un papel fundamental en el desarrollo y la mejora de generadores de olas, lo cual proporciona herramientas más precisas y versátiles para la simulación de condiciones oceánicas en entornos de laboratorio. A continuación, se presenta información relevante sobre la importancia de estos avances:

### **1.2.3.1 Precisión en la generación de olas**

La hidráulica avanzada ha permitido una mayor precisión en la generación de olas en términos de forma, frecuencia y altura. La capacidad de ajustar estos parámetros con precisión es esencial para replicar condiciones oceánicas específicas y para realizar experimentos controlados que proporcionen datos confiables y repetibles.

La precisión en la generación de olas es un factor crítico en los generadores de olas modernos, permiten reproducir con fidelidad condiciones oceánicas específicas en entornos de laboratorio. Este atributo es crucial para estudios controlados y experimentos repetibles al posibilitar el control preciso de parámetros clave como la altura, frecuencia y longitud de onda de las olas. En la ingeniería marina, esta precisión facilita investigaciones detalladas sobre la interacción entre olas y estructuras marinas. Además, contribuye a la validación de modelos numéricos al comparar datos experimentales con predicciones modeladas, y es esencial para simular escenarios realistas en aplicaciones que van desde la evaluación de riesgos costeros hasta la investigación de energía de las olas. La precisión también juega un papel vital en el desarrollo de tecnologías de energía renovable, donde la capacidad de replicar condiciones precisas permite evaluar con precisión el rendimiento de dispositivos de captura de energía de las olas. Los avances en sensores y técnicas de medición mejoran aún más la calidad de los datos recopilados durante estos experimentos, consolidan la importancia fundamental de la precisión en la generación de olas en una variedad de disciplinas científicas y tecnológicas.

### **1.2.3.2 Simulación de condiciones realistas**

La capacidad de replicar de manera más precisa las condiciones oceánicas ha mejorado significativamente gracias a los avances en hidráulica. Los generadores de olas modernos pueden simular una gama más amplia de condiciones, incluidas olas multidireccionales, variabilidad en la altura y frecuencia, y otras características que imitan de cerca la complejidad del océano real.



La replicación de condiciones realistas en generadores de olas modernos es esencial para proporcionar entornos de laboratorio que imiten de cerca las complejidades del océano. Estos generadores buscan no solo reproducir la altura y frecuencia de las olas, sino también su dirección y el espectro de energía. La capacidad de simular olas multidireccionales y variabilidad en altura y frecuencia es crucial para estudios realistas de interacción oleaje-estructura en ingeniería marina. La tecnología hidráulica avanzada permite ajustar con precisión parámetros específicos, para lograr así una replicación más fiel de condiciones oceánicas. La integración con modelos numéricos contribuye a mejorar la precisión de las simulaciones, para validar los resultados experimentales. La replicación de condiciones realistas no solo beneficia la investigación científica sino también aplicaciones prácticas como la planificación de infraestructuras costeras y el diseño de dispositivos para la captura de energía de las olas.

Los avances tecnológicos en hidráulica han permitido replicar condiciones realistas con mayor precisión, lo que conlleva a mejorar la capacidad de modelar y entender el comportamiento del agua en diversas situaciones. A continuación, se mencionan las áreas clave en donde se desenvuelve con más enfoque la replicación de condiciones realistas dentro de los estudios hidráulicos:

#### **1.2.3.2.1 Modelación numérica**

La modelación numérica en hidráulica se refiere al uso de métodos numéricos avanzados para simular de manera precisa y detallada el comportamiento del agua en diversas situaciones. En particular, este enfoque se ha vuelto fundamental en la dinámica de fluidos computacional (CFD), que es una rama de la ingeniería que utiliza técnicas numéricas para resolver ecuaciones que describen el movimiento de fluidos. Dentro de estos modelos existen aspectos clave sobre modelación numérica que se describen a continuación:

##### **1. Ecuaciones de Navier-Stokes:**

Para la modelación numérica, se resuelven las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de los fluidos. Estas ecuaciones tienen términos que representan la aceleración, la presión, la viscosidad y otras fuerzas que representan la base para entender la dinámica del agua.

##### **2. Malla computacional:**

Para representar el dominio de simulación, se utiliza una malla computacional que divide el espacio en elementos finitos. Estos elementos forman una cuadrícula tridimensional que cubre la

región de interés. La calidad de la malla influye en la precisión de la simulación.

**3. Condiciones de contorno detalladas:**

Se incorporan condiciones de contorno detalladas para simular con precisión las características del entorno, como paredes, interfaces aire-agua, obstáculos y otros elementos que afectan el flujo del agua.

**4. Modelos de turbulencia:**

En el modelado de flujo turbulento, se aplican modelos de turbulencia para capturar efectos turbulentos a diferentes escalas. Esto es crucial en situaciones donde la turbulencia juega un papel importante, como en flujos cerca de estructuras o en cuerpos de agua con obstáculos.

**5. Interacción agua-estructura:**

El Modelado numérico detallado permite simular la interacción entre el agua y las estructuras de manera más realista. Esto incluye el estudio de la respuesta estructural frente a la acción del agua y la retroalimentación entre las olas y las estructuras.

**6. Adaptabilidad en el tiempo:**

Los métodos numéricos detallados suelen ser adaptativos en el tiempo, lo que significa que ajustan automáticamente la resolución temporal para capturar eventos rápidos o lentos de manera eficiente.

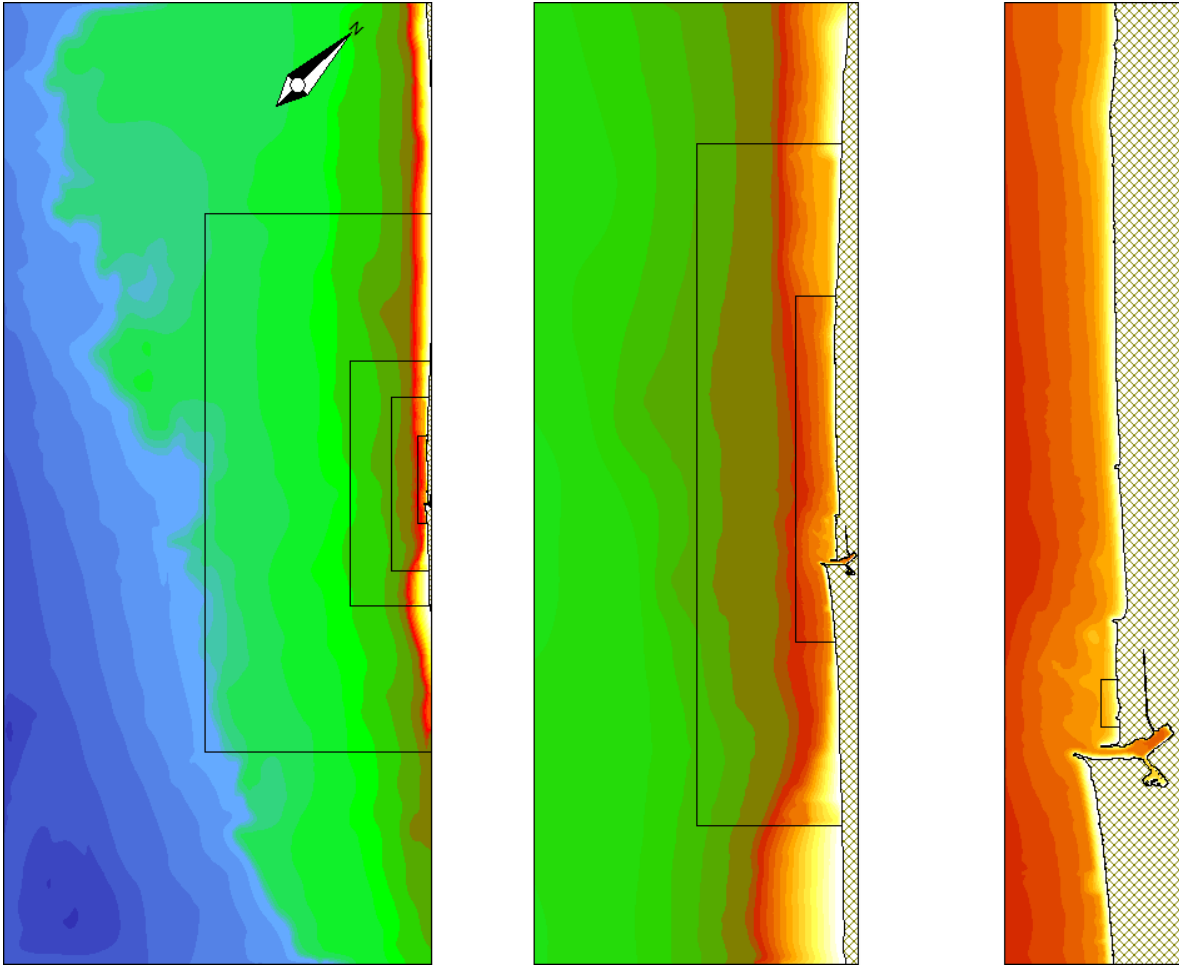
**7. Validación y verificación:**

Es fundamental validar y verificar los modelos numéricos detallados mediante datos experimentales o teóricos conocidos. Esto garantiza que el modelo sea confiable y preciso en la representación de condiciones reales.

**8. Alta resolución espacial y temporal:**

El Modelado numérico detallado se caracteriza por utilizar alta resolución espacial y temporal. Esto significa que la simulación puede capturar pequeños detalles del flujo y responder rápidamente a cambios en las condiciones.

Este enfoque avanzado en hidráulica no solo proporciona una mayor comprensión del comportamiento del agua, sino que también es valioso para el diseño de estructuras, la gestión de recursos hídricos, la planificación costera y otras aplicaciones donde la precisión es esencial.



**Figura 1.13 Ejemplo de modelación numérica para determinar la refracción del oleaje**

### 1.2.3.2 Hidrodinámica experimental de alta precisión

La Hidrodinámica experimental de alta precisión es una rama de la ingeniería que se enfoca en investigar y comprender detalladamente el comportamiento del agua a través de experimentos físicos realizados en laboratorios hidráulicos. En este enfoque, se emplean modelos físicos a escala, los cuales son representaciones reducidas de sistemas acuáticos del mundo real. Estos experimentos tienen como objetivo principal replicar condiciones específicas con una fidelidad tal que permita obtener datos precisos y relevantes para diversos propósitos, como el diseño de estructuras costeras, la gestión de recursos hídricos y la evaluación de impactos ambientales.

Los modelos físicos a escala son construidos cuidadosamente para reproducir la topografía del fondo marino, la geometría de estructuras, y otras características del entorno acuático que se desea estudiar. La escala

de estos modelos puede variar en función de la complejidad del sistema y los detalles que se buscan capturar y analizar. Además, se utilizan materiales que imitan las propiedades mecánicas del agua y del entorno submarino para garantizar una representación precisa de las interacciones hidrodinámicas.

En los laboratorios hidráulicos especializados en alta precisión, se implementa instrumentación avanzada para medir y registrar datos durante los experimentos. Esto puede incluir sensores de presión, velocímetros láser, cámaras de alta velocidad, y otros dispositivos de medición especializados. La información recopilada se utiliza para analizar la dinámica del agua, estudiar la interacción con estructuras, evaluar patrones de flujo y comprender fenómenos específicos. Estos sensores son los que mejor precisión manejan y los que comúnmente se utilizan para generar retroalimentación a los generadores de olas (figura 1.14). Este enfoque experimental no solo proporciona datos detallados y confiables para comprender mejor los procesos hidrodinámicos, sino que también permite validar y mejorar modelos numéricos y teóricos. La combinación de experimentos físicos y análisis avanzados contribuye al desarrollo de soluciones efectivas en campos como la ingeniería costera, la planificación urbana y la gestión sostenible de recursos hídricos.



**Figura 1.14 Sensores de resistencia de alta tecnología**

Fuente: HR Wallingford (2021).

### 1.2.3.2.3 Replicación de topografía y batimetría

La replicación de topografía y batimetría en experimentos de Hidrodinámica experimental de alta precisión es un componente crítico para lograr una representación fiel de las condiciones del mundo real en laboratorios hidráulicos. La topografía se refiere a las características superficiales de la tierra, mientras que la batimetría se enfoca en la forma y profundidad del fondo marino. En estos experimentos, se busca reproducir con precisión tanto la geometría de la costa como la configuración del lecho marino para entender mejor cómo el agua interactúa con estas características.

La replicación de la topografía implica reproducir detalles como playas, dunas, o cualquier elevación significativa en la superficie terrestre. Esto se logra al modelar cuidadosamente la forma y posición de estas características en los modelos físicos a escala utilizados en los laboratorios hidráulicos. La batimetría, por otro lado, se recrea para reflejar la profundidad del agua y la configuración del fondo marino, esto puede incluir cañones submarinos, plataformas continentales u otros rasgos submarinos que afectan el flujo de agua.

La precisión en la representación a escala de topografía y batimetría es crucial para garantizar que los resultados de los experimentos sean representativos de situaciones del mundo real. Para lograr esto, se utilizan métodos avanzados de medición y escaneo topográfico para capturar con precisión la geometría del terreno. Estos datos se incorporan en la construcción de los modelos físicos, de tal manera que la forma y profundidad del agua en el laboratorio se asemejen lo más posible a las condiciones naturales.



**Figura 1.15 Ejemplo de topografía y batimetría realizados para análisis de terreno costero**

Fuente: Instituto Mexicano del Transporte (2018).

Este enfoque detallado en la replicación de topografía y batimetría no solo mejora la validez de los experimentos, sino que también permite a los investigadores estudiar cómo diferentes características del terreno influyen en la dinámica del agua, la propagación de olas y la interacción con estructuras costeras. La información obtenida es esencial para el diseño y la planificación en ingeniería costera, gestión de recursos hídricos y estudios medioambientales.

Se emplean técnicas avanzadas para capturar con precisión la forma y características del entorno terrestre y submarino. El proceso de adquisición de datos topográficos puede incluir el uso de tecnologías como LIDAR (Light Detection and Ranging) para generar mapas detallados de la superficie terrestre. Además, en el caso de la batimetría, se utilizan ecosondas y sistemas acústicos para medir la profundidad del agua y mapear el fondo marino con alta resolución. La información topográfica y batimétrica recopilada se incorpora con detalle en la construcción de los modelos físicos a escala utilizados en los laboratorios hidráulicos. Estos modelos pueden estar hechos de materiales transparentes para facilitar la visualización y el estudio detallado de la interacción del agua con las características del terreno. Las elevaciones, pendientes y formas específicas se replican con precisión para garantizar que el modelo sea representativo de la topografía y la batimetría reales.

La replicación precisa de la topografía y batimetría es esencial para abordar preguntas específicas de investigación, como la influencia de la forma de la costa en la propagación de olas, el impacto de la geometría submarina en la circulación de corrientes, o la respuesta de estructuras costeras ante condiciones realistas. La combinación de datos topográficos y batimétricos detallados con modelos físicos a escala proporciona una plataforma robusta para estudiar fenómenos hidrodinámicos complejos y validar modelos numéricos utilizados en estudios de ingeniería e impacto ambiental.

#### **1.2.3.2.4 Inteligencia Artificial y aprendizaje automático**

La aplicación de Inteligencia Artificial (IA) y Aprendizaje Automático (AA) en hidrodinámica y estudios hidráulicos ha revolucionado la forma en que se abordan problemas complejos relacionados con el comportamiento del agua. La IA se refiere a la capacidad de las máquinas para realizar tareas que normalmente requieren inteligencia humana, mientras que el Aprendizaje Automático es una rama de la IA que se centra en el desarrollo de algoritmos que permiten a las computadoras aprender patrones y realizar tareas sin intervención humana directa.

En hidrodinámica, los algoritmos de AA pueden utilizarse para analizar grandes conjuntos de datos generados por simulaciones numéricas, experimentos de laboratorio o datos observacionales. Estos algoritmos son capaces de identificar patrones complejos en los datos, lo que proporciona una comprensión más profunda de los fenómenos hidráulicos. Además, la IA puede utilizarse para optimizar modelos numéricos, ajustar parámetros automáticamente y mejorar la precisión de las simulaciones.

La IA también ha demostrado ser valiosa en la predicción de eventos hidrodinámicos y en la toma de decisiones en tiempo real. Los modelos impulsados por IA pueden analizar datos en tiempo real, como condiciones climáticas, niveles de agua y otros factores, para prever y gestionar eventos como inundaciones costeras o cambios en la circulación de corrientes.

En el ámbito del Aprendizaje Automático, las redes neuronales y otros enfoques permiten la creación de modelos predictivos sofisticados. Estos modelos pueden aprender de datos históricos para predecir, por ejemplo, la evolución de un oleaje en una costa específica o la respuesta de una estructura frente a condiciones hidrodinámicas cambiantes.

La combinación de IA y Aprendizaje Automático también se ha aplicado en la optimización de diseños de infraestructuras hidráulicas, a fin de encontrar soluciones más eficientes y resistentes. Estos avances tecnológicos abren nuevas posibilidades para abordar desafíos complejos en la gestión del agua, la ingeniería costera y la comprensión de los sistemas hidrodinámicos, lo que permite una toma de decisiones más informada y adaptativa en entornos acuáticos.

#### **1.2.3.2.5 Tecnología de Realidad Virtual (RV) y Realidad Aumentada (RA)**

La Tecnología de Realidad Virtual (mejor conocida como VR por sus siglas en inglés '**Virtual Reality**') y Realidad Aumentada (mejor conocida como AR por sus siglas en inglés '**Augmented Reality**'), ha experimentado una expansión notoria en su aplicación, abarca diversos campos, entre ellos la hidrodinámica y los estudios relacionados con el agua. Este crecimiento se ha visto impulsado por los avances tecnológicos que han permitido un mayor acceso y la mejora continua en la calidad de estas herramientas.

En el ámbito de la hidrodinámica, la RV y la RA se han convertido en recursos esenciales al ofrecer herramientas poderosas para la visualización, el análisis y la comprensión de manera más inmersiva de los

fenómenos hidráulicos y los entornos acuáticos. Estas tecnologías posibilitan la creación de entornos virtuales tridimensionales que permiten a los profesionales sumergirse en simulaciones realistas, que proporcionan una perspectiva detallada y contextual de los sistemas hidráulicos.

La visualización inmersiva que brinda la RV permite a los investigadores y profesionales explorar modelos hidrodinámicos complejos en un entorno virtual controlado, lo que facilita la identificación de patrones, la detección de posibles problemas y la toma de decisiones más informada en el diseño de infraestructuras acuáticas. Esta capacidad no solo agiliza el proceso de diseño, sino que también contribuye a la optimización de soluciones hidráulicas.

Por otro lado, la RA complementa la experiencia en el terreno al superponer información digital relevante en tiempo real sobre el entorno físico. Esto resulta valioso en tareas como inspecciones de infraestructuras, donde los ingenieros pueden acceder a datos cruciales de manera eficiente, lo que facilita la detección de anomalías y la toma de decisiones durante el mantenimiento y la operación de instalaciones hidráulicas.

En conjunto, la aplicación creciente de la RV y la RA en la hidrodinámica está transformando la manera en que se estudian, diseñan y gestionan los sistemas acuáticos. Estas tecnologías no solo mejoran la eficiencia y la precisión en los procesos, sino que también fomentan una comprensión más profunda y dinámica de los fenómenos hidráulicos lo que contribuye a avances significativos en la ingeniería y la gestión del agua.

Algunas de las aplicaciones prácticas que se pueden desarrollar con el uso de estas tecnologías son las siguientes:

### **1. Diseño y planificación de infraestructuras hidráulicas:**

- **RV:** Los ingenieros pueden utilizar entornos virtuales para visualizar y analizar proyectos hidráulicos complejos antes de su construcción. Esto facilita la identificación de posibles problemas, la optimización del diseño y la toma de decisiones informada en la fase de planificación.
- **RA:** Durante las inspecciones de campo, los ingenieros pueden utilizar gafas de RA para superponer datos relevantes, como información topográfica o detalles de infraestructuras, en tiempo real. Esto mejora la eficiencia en la toma de decisiones durante las etapas de diseño y planificación.



## 2. Formación e investigación en entornos virtuales:

- **RV:** La RV se emplea para crear simulaciones de laboratorio virtuales, mediante la cual estudiantes e investigadores pueden explorar entornos hidrodinámicos de manera segura y repetitiva. Esto es especialmente útil para comprender conceptos complejos y para la formación en situaciones de emergencia.
- **RA:** Durante las investigaciones de campo, la RA puede proporcionar información contextual en tiempo real, para que los investigadores puedan recopilar datos precisos y realizar análisis sobre el terreno.

## 3. Inspección y mantenimiento de infraestructuras hidráulicas:

- **RA:** Los ingenieros y personal de mantenimiento pueden utilizar dispositivos de RA para superponer información sobre el estado de las infraestructuras hidráulicas, con objeto de facilitar la detección de posibles problemas y simplificar las tareas de mantenimiento preventivo.

## 4. Gestión de desastres naturales:

- **RV:** La RV se emplea en la planificación y simulación de escenarios de desastres naturales como inundaciones. Esto permite a los equipos de gestión de emergencias practicar respuestas y evaluar estrategias de evacuación en entornos virtuales.
- **RA:** Durante situaciones de desastre, la RA puede ser utilizada para proporcionar información en tiempo real a los equipos de rescate y a las comunidades afectadas, lo que facilita la coordinación y la toma de decisiones.

## 5. Modelado de cambios en la topografía y batimetría:

- **RV:** La RV permite a los científicos y planificadores visualizar cambios en la topografía y batimetría a lo largo del tiempo, lo cual la convierte en una herramienta valiosa para la gestión sostenible de zonas costeras y cuerpos de agua.
- **RA:** La RA puede utilizarse para superponer datos de cambios topográficos en tiempo real durante la inspección de áreas costeras o lechos de ríos.

Estas aplicaciones prácticas destacan cómo los profesionales de la hidrodinámica abordan los desafíos y aprovechan la información en entornos acuáticos con apoyo de la RV y la RA. Desde la visualización de datos hasta la toma de decisiones en tiempo real, estas tecnologías ofrecen beneficios significativos en la gestión del agua, la ingeniería hidráulica y la ingeniería de costas.



**Figura 1.16 Ejemplo de uso de tecnologías inmersivas como la RV y RA**

Fuente: Wondershare (2022).

### **1.2.3.3 Estudios de interacción con estructuras marinas**

La hidráulica avanzada ha facilitado la realización de estudios más detallados sobre cómo las olas interactúan con estructuras marinas, como plataformas fuera de costa (offshore), diques y estructuras costeras. Esto es vital para el diseño y la evaluación de infraestructuras marítimas, así como para comprender los riesgos y la seguridad en entornos oceánicos.

#### **1.2.3.3.1 Puertos y muelles**

Los puertos y muelles son infraestructuras marítimas vitales que desempeñan un papel central en la facilitación del transporte marítimo y la conectividad global. Estas instalaciones son puntos estratégicos para el comercio internacional, la logística y la actividad económica en regiones costeras. Su función principal radica en proporcionar áreas seguras y estructuras de atraque para embarcaciones de diversos tamaños, realicen las operaciones de carga y descarga de mercancías y pasajeros de forma eficiente.

Estos complejos marítimos ofrecen servicios integrales que van más allá del simple atraque de barcos. Incluyen instalaciones para el almacenamiento temporal de mercancías, con almacenes y patios destinados a mantener y manipular la carga de manera eficaz. Además, cuentan con una variedad de equipos y maquinaria especializada, como

grúas y montacargas, para facilitar las operaciones de carga y descarga, que permiten optimizar el flujo de mercancías.

Otro aspecto clave de los puertos y muelles es su capacidad para actuar como centros de transbordo, para la transferencia eficiente de carga entre distintos modos de transporte. Esto implica la coordinación fluida entre el transporte marítimo, terrestre y, en algunos casos, ferroviario, lo que contribuye a la integración del transporte intermodal y la eficacia logística.



**Figura 1.17 Puerto de Salina Cruz, Oaxaca**

Fuente: ASIPONA Salina Cruz (2022).

### **1.2.3.3.2 Rompeolas**

Los rompeolas son estructuras marinas diseñadas para reducir el impacto de las olas y proteger áreas costeras, puertos y embarcaciones de los efectos dañinos de la energía del oleaje. Estas construcciones se implementan con el propósito de disminuir la altura y la fuerza de las olas que ingresan a una zona protegida, para crear condiciones más seguras y tranquilas en su interior. Los rompeolas pueden presentar diversas formas y tamaños, adaptándose a las características específicas del entorno y a los objetivos de protección.



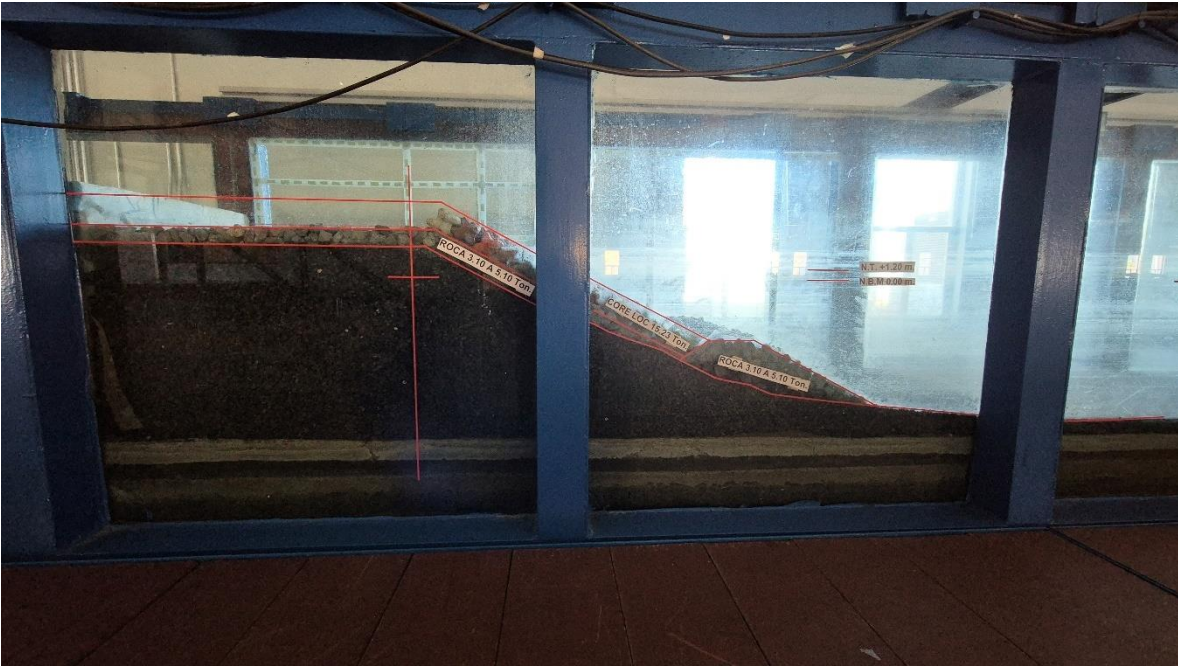
**Figura 1.18 Rompeolas del puerto de Veracruz**

Fuente: ASIPONA Veracruz (2018).

Existen dos tipos principales de rompeolas: los de tipo vertical, que se proyectan hacia arriba desde el fondo del mar, y los de tipo horizontal, que descansan sobre la superficie del agua. Ambos tipos buscan alterar la acción de las olas, disipan su energía y reducen su impacto en la costa o en las estructuras circundantes.

La construcción de rompeolas involucra consideraciones detalladas sobre la hidrodinámica local, la dirección y la frecuencia de las olas, así como la profundidad del agua. Además de su función protectora, los rompeolas también pueden servir como muelles, paseos marítimos o plataformas de observación. Su diseño y construcción requieren un enfoque cuidadoso para garantizar su resistencia a las condiciones ambientales adversas y su capacidad para cumplir con los objetivos de mitigación del oleaje y la erosión costera. Estas estructuras desempeñan un papel esencial en la planificación costera y en la gestión de riesgos asociados a eventos climáticos, lo que a su vez contribuye a la seguridad y estabilidad de las zonas costeras y los puertos.

La construcción a escala de los rompeolas dentro del laboratorio de Hidráulica Marítima en el Instituto Mexicano del Transporte sirve para realizar la experimentación de modelos hidráulicos y conocer su resistencia a las fuerzas de oleaje y así como su comportamiento con el paso del tiempo (figura 1.19).



**Figura 1.19 Ejemplo de construcción de un rompeolas a escala en laboratorio**

Fuente: Elaboración propia (2024).

### 1.2.3.4 Validación de modelos numéricos

Los estudios realizados en modelos físicos que utilizan generadores de olas sirven para validar modelos numéricos y simulaciones por computadora. Comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los resultados predichos por modelos ayuda a mejorar la precisión de las simulaciones y a garantizar que los modelos sean representativos del comportamiento real del oleaje.

La validación de modelos numéricos constituye un componente crítico en la investigación en ingeniería portuaria y costera y la ingeniería marina, lo que es fundamental para asegurar la precisión y confiabilidad de las simulaciones computacionales. Los generadores de olas avanzados desempeñan un papel esencial en este proceso al permitir la comparación de datos experimentales generados en laboratorio con las predicciones proporcionadas por modelos matemáticos. La capacidad de replicar condiciones oceánicas específicas con precisión facilita la validación de modelos que buscan prever la interacción entre olas y estructuras marinas. Por ejemplo, en la simulación de la respuesta de una plataforma fuera de costa (offshore) a condiciones de oleaje variable, la validación con datos experimentales contribuye a ajustar y mejorar la exactitud del modelo numérico.

Además, la validación de modelos numéricos mediante generadores de olas avanzados se extiende a campos como la investigación de energía de las olas. Al simular la captura de energía de dispositivos en laboratorio y comparar estos resultados con las predicciones del modelo, se valida la eficiencia y rendimiento del diseño antes de su implementación en entornos oceánicos reales. Esta validación integral garantiza que los modelos numéricos proporcionen representaciones precisas del comportamiento de las olas y su interacción con diversas estructuras, lo que es esencial para aplicaciones prácticas y avances en el diseño de tecnologías relacionadas con el océano.

### **1.2.3.5 Investigación en energía de las olas**

La energía de las olas se origina por la acción del viento sobre la superficie del agua, genera ondas que contienen una importante cantidad de energía cinética. Este fenómeno presenta un vasto potencial energético, estimándose que podría superar la capacidad global de generación de energía si se aprovecha eficientemente. Diversas tecnologías están en desarrollo para convertir la energía de las olas en electricidad, entre ellas convertidores undimotrices, dispositivos flotantes y sistemas de absorción de energía. A pesar de sus ventajas, como la disponibilidad constante y la baja emisión de gases de efecto invernadero, la industria de la energía de las olas enfrenta desafíos tecnológicos, económicos y ambientales, incluye la resistencia a las condiciones marinas extremas y la eficiencia de conversión. Aunque en fase inicial, proyectos piloto alrededor del mundo buscan demostrar la viabilidad y eficacia de estas tecnologías, lo que podría contribuir a diversificar la matriz energética y proporcionar una fuente sostenible de electricidad en áreas costeras en el futuro.

La hidráulica avanzada también ha sido crucial para la investigación en energía de las olas. Los generadores de olas se utilizan para simular condiciones de oleaje específicas con el objetivo de evaluar el rendimiento y la eficiencia de dispositivos de captura de energía de las olas, como convertidores de energía oceánica. La variabilidad y complejidad de las olas presentan desafíos y oportunidades únicas en la investigación de energía de las olas. Se busca comprender cómo los dispositivos pueden capturar y convertir eficientemente la energía cinética de las olas en electricidad. La investigación incluye la optimización de diseños para mejorar la eficiencia, la evaluación del impacto ambiental y la integración con redes eléctricas. Además, se exploran enfoques innovadores, como tecnologías de conversión piezoeléctrica y sistemas híbridos, para mejorar la viabilidad y la sostenibilidad de la captura de energía de las olas.

Un ejemplo destacado de investigación en energía de las olas es el desarrollo y prueba de convertidores de energía oceánica. Estos

dispositivos, como boyas flotantes, columnas de agua oscilantes y sistemas basados en el movimiento de las olas, buscan capturar la energía de manera eficiente. Los generadores de olas avanzados permiten simular condiciones específicas para evaluar cómo estos dispositivos responden a diferentes patrones de oleaje, lo que contribuye a la mejora continua de las tecnologías de energía de las olas. La investigación en este campo es crucial para avanzar hacia una fuente de energía renovable más sostenible y contribuir a la diversificación de la matriz energética.

La exploración y desarrollo de la energía de las olas continúa en evolución a medida que los investigadores y la industria buscan superar desafíos y optimizar la eficiencia de las tecnologías asociadas. A continuación, se presenta más información sobre algunos aspectos específicos:

#### 1.2.3.5.1 Desarrollo tecnológico

- **Convertidores undimotrices:**  
Estos dispositivos buscan capturar la energía de las olas mediante movimientos verticales u horizontales inducidos por el oleaje. Pueden ser sistemas flotantes, fijos en el lecho marino o ubicados en la superficie.
- **Dispositivos flotantes:**  
Algunas tecnologías emplean estructuras flotantes que se mueven con el movimiento ondulatorio. Estas pueden estar ancladas al lecho marino o ser flotantes libres.
- **Columnas de agua oscilante:**  
Este enfoque implica columnas de agua oscilantes en las que el movimiento ascendente y descendente de las olas induce el movimiento de aire, que luego se utiliza para generar electricidad.

#### 1.2.3.5.2 Desafíos tecnológicos

- **Resistencia a condiciones marinas extremas:**  
La construcción de dispositivos resistentes a tormentas, olas fuertes y corrosión es esencial. Los dispositivos deben soportar las condiciones marinas adversas a largo plazo.
- **Eficiencia de conversión:**  
Mejorar la eficiencia de conversión de la energía cinética de las olas en electricidad es un objetivo clave. Se buscan diseños más eficientes para maximizar la captura de energía.

#### 1.2.3.5.3 Aspectos económicos y ambientales

- **Costos de implementación:**

Los costos de implementación y mantenimiento son factores críticos. La reducción de costos es esencial para que la energía de las olas sea competitiva con otras fuentes de energía.

- **Impactos ambientales:**

Se deben realizar evaluaciones exhaustivas del impacto ambiental para garantizar que la implementación de tecnologías de energía de las olas no cause daños ecológicos significativos.

#### **1.2.3.5.4 Proyectos piloto y despliegue comercial**

- **Proyectos en curso:**

Varias regiones del mundo han implementado proyectos piloto para probar la viabilidad de las tecnologías de energía de las olas. Esto incluye plataformas de prueba en el océano para evaluar el rendimiento real.

- **Despliegue comercial:**

Aunque en una fase inicial, se prevé que, con los avances tecnológicos y la reducción de costos, la energía de las olas podría desplegarse comercialmente en el futuro, lo que contribuye a la diversificación de las fuentes de energía renovable.

## **1.2.4 Innovación en Ingeniería Costera**

La hidráulica avanzada ha impulsado la innovación en ingeniería costera, lo que permite estudios más detallados sobre cómo las olas afectan las costas y cómo se pueden diseñar estructuras para mitigar la erosión costera y proteger áreas vulnerables.

La innovación en ingeniería costera implica el desarrollo de soluciones creativas y eficientes para abordar desafíos relacionados con la dinámica costera, la gestión de riesgos y la protección de áreas vulnerables frente a la erosión y eventos extremos. Generadores de olas avanzados desempeñan un papel crucial al permitir estudios detallados sobre cómo las olas interactúan con la costa y las estructuras costeras, situación que contribuye a la mejora de técnicas de ingeniería costera.

Uno de los enfoques innovadores en ingeniería costera es el diseño de estructuras que no solo resisten la acción de las olas, sino que también interactúan de manera positiva con el entorno marino. Esto incluye la implementación de técnicas de restauración de playas, como la construcción de arrecifes artificiales y la regeneración de dunas, que no solo proporcionan protección costera, sino que también contribuyen a la preservación del ecosistema marino.



Además, se han desarrollado sistemas de monitoreo avanzados que utilizan tecnologías como sensores remotos, modelos numéricos y generadores de olas para evaluar y predecir la dinámica costera con mayor precisión. Estos sistemas permiten una respuesta más rápida a cambios en las condiciones y mejoran la capacidad de adaptación de las estrategias de ingeniería costera.

Un ejemplo notable de innovación en ingeniería costera es la integración de soluciones basadas en la naturaleza. Estas soluciones buscan imitar procesos naturales para fortalecer la resistencia costera. El uso de vegetación costera, manglares y sistemas de humedales como barreras naturales no solo ayuda a reducir la erosión, sino que también mejora la biodiversidad y la calidad del hábitat.

La investigación continua en generadores de olas y tecnologías de modelos numéricos contribuye a perfeccionar la comprensión de la interacción oleaje-costa y permite la evaluación de nuevas estrategias de ingeniería costera. La innovación en este campo es esencial para enfrentar los desafíos cada vez mayores asociados con el cambio climático y el aumento del nivel del mar, crea soluciones adaptativas y sostenibles para proteger las áreas costeras y las comunidades circundantes.

#### **1.2.4.1 Aplicaciones en ingeniería marítima**

Las aplicaciones en ingeniería marítima han experimentado una transformación significativa a lo largo de la historia, adaptándose a las crecientes demandas y desafíos que enfrenta la interacción humana con los océanos. En sus inicios, la ingeniería marítima se centró en aspectos fundamentales como la navegación y la construcción de barcos. Los antiguos marinos desarrollaron métodos rudimentarios de cartografía y técnicas de navegación estelar para explorar y comerciar a través de los océanos, lo que dio inicio a la ingeniería marítima como disciplina.

Con el tiempo, el crecimiento del comercio marítimo llevó al desarrollo de infraestructuras portuarias, donde la ingeniería marítima desempeñó un papel fundamental en la construcción de muelles, rompeolas y diques para facilitar el intercambio de mercancías. La expansión de los imperios y la necesidad de conexiones marítimas más eficientes impulsaron la ingeniería de canales y técnicas de dragado para mantener vías navegables clave.



**Figura 1.20 Puertos inteligentes a través de tecnologías de la información y digitalización**

Fuente: eSMARTCITY (2022).

En la era moderna, la ingeniería marítima se ha diversificado para abordar desafíos contemporáneos. La explotación de recursos marinos ha llevado al desarrollo de nuevas tecnologías, incluidas plataformas petroleras y parques eólicos marinos. La ingeniería marítima también ha asumido un papel crucial en la protección del medio ambiente marino, en respuesta a las preocupaciones sobre la contaminación y la sostenibilidad.

La investigación en ingeniería portuaria y costera ha impulsado la creación de tecnologías, como vehículos autónomos y sistemas de monitoreo remoto, que permiten la exploración detallada de los océanos y el estudio de sus complejos ecosistemas. Además, la ingeniería marítima ha colaborado en el desarrollo de medidas para mitigar los impactos ambientales, desde sistemas de gestión de desechos hasta tecnologías de propulsión más limpias para embarcaciones.

## 2 Propuesta del prototipo

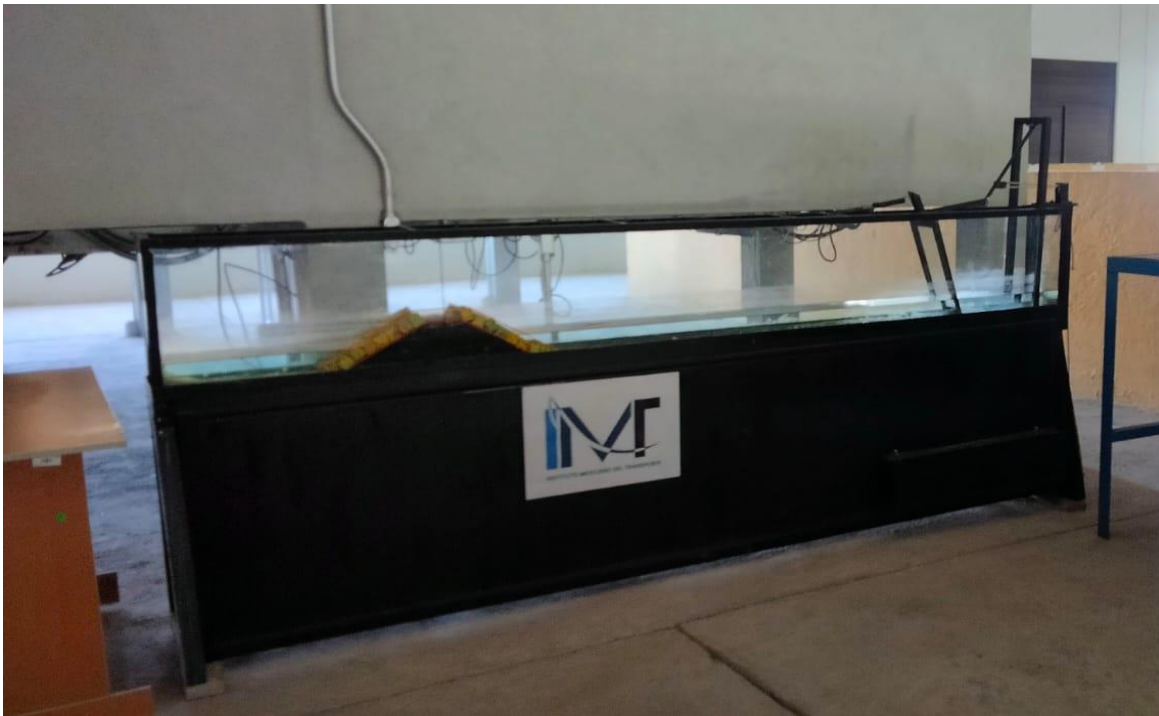
---

El diseño propuesto para la construcción del prototipo del generador de oleaje, sus componentes mecánicos, eléctricos y de control para el funcionamiento óptimo, así como las distintas piezas diseñadas en software 3D utilizadas para la construcción se describen a continuación:

### 2.1 Componentes mecánicos y electrónicos

Para el desarrollo del prototipo se utilizó el canal a escala que se encuentra en el laboratorio de Hidráulica Marítima, el cual se usa sólo con fines didácticos y cuyas dimensiones son las siguientes:

- Ancho: 0.2 m
- Largo: 3.02 m
- Alto: 1.08 m



**Figura 2.1 Canal de olas miniatura del IMT**

Este canal anteriormente contaba con un mecanismo que generaba el movimiento para reproducir olas a través de un motor que funcionaba a

corriente alterna (AC) como se muestra en la figura 2.3 y su respectivo variador eléctrico (figura 2.4), este sistema contaba con eslabones de aluminio que sujetaban la paleta y una polea que transmitía el movimiento del motor hacia los eslabones mediante una cuerda. En conjunto este sistema permitía el movimiento a una paleta de vidrio con marco de aluminio con las siguientes dimensiones:

- Alto: 40 cm
- Ancho: 16 cm



**Figura 2.2 Mecanismo del canal de olas a escala del Laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT**



Figura 2.3 Motor de corriente alterna (AC) utilizado en el canal miniatura

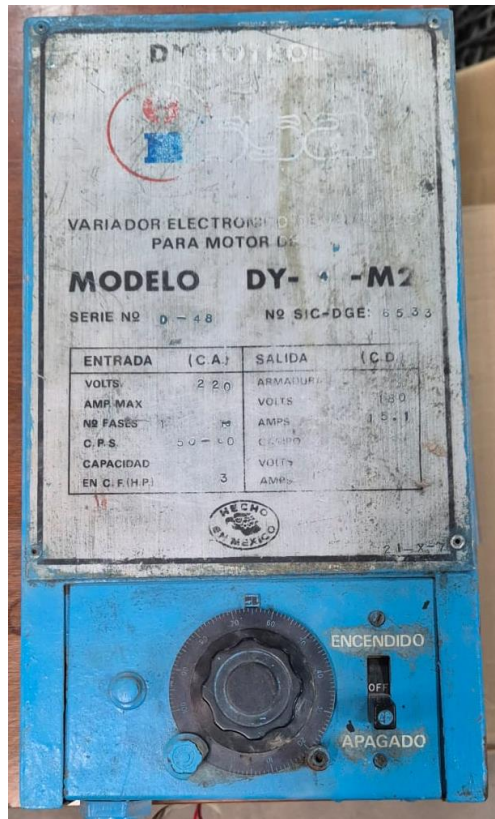


Figura 2.4 Variador electrónico para motor AC

Como se observa en las figuras 2.2 y 2.3 tanto el variador como el motor son demasiado robustos y pesados, lo cual dificulta el traslado del canal de un lugar a otro, por ello, se planteó minimizar el costo del mantenimiento del equipo mecánico y eléctrico por lo que se buscó una alternativa que hiciera al canal más fácil de trasladar y principalmente que proporcionará una variedad amplia en la generación de ondas. Esta mejora se enfocó principalmente en la automatización y la precisión del sistema generador de oleaje, para lograr tal objetivo, se planteó la implementación de los siguientes componentes para integrar en este proyecto:

- Motor a pasos NEMA 34 de 8 N/m
- Driver 2DM860 para el control de movimiento del motor
- Fuente de alimentación 40V 10A
- Cople de unión
- Arduino NANO
- Botón de encendido
- Ultimaker 2+ Connect para impresión en 3D

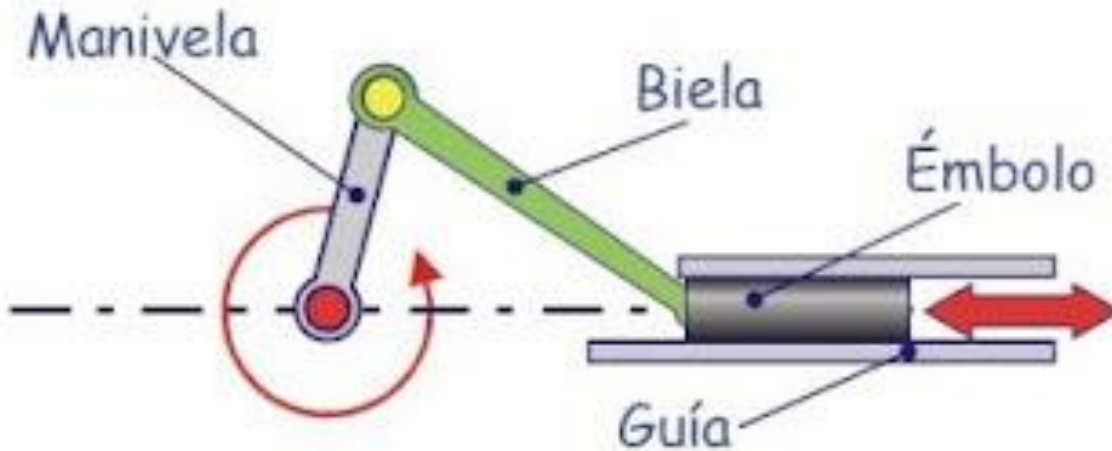
De acuerdo con la lista anterior, se realizaron diversas adecuaciones con materiales que ya contenía el canal de olas desde un principio, por lo que se implementó un nuevo sistema mecánico de movimiento de la paleta, el cual se basa en un sistema “Biela-Manivela” que se explica a continuación:

### **2.1.1 Sistema Biela-Manivela**

El sistema biela-manivela es un mecanismo simple y fundamental utilizado en ingeniería mecánica para transformar el movimiento rotativo en movimiento lineal y viceversa. Consiste en dos elementos principales: la biela, que es una barra conectada a un punto fijo, y la manivela, que es una barra conectada a la biela en un punto móvil. Cuando la manivela gira, genera un movimiento rotativo que se transmite a través de la biela, lo que resulta en un desplazamiento lineal de otro punto conectado a la biela. Este sistema se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde motores de combustión interna en automóviles hasta mecanismos simples como los encontrados en juguetes y herramientas.

La versatilidad y eficacia del sistema biela-manivela lo convierten en una herramienta esencial en la ingeniería mecánica, ya que permite convertir diferentes tipos de movimiento de manera eficiente y sencilla. Su aplicación se extiende a una variedad de industrias, contribuye a la creación de maquinaria y dispositivos que aprovechan su capacidad para convertir movimientos rotativos en movimientos lineales y viceversa.

El sistema biela-manivela es ampliamente utilizado en diversas aplicaciones, desde motores de combustión interna en vehículos hasta máquinas y herramientas. En un motor de combustión interna, por ejemplo, la manivela está conectada al pistón a través de la biela. Cuando la mezcla de combustible y aire se quema en la cámara de combustión, la expansión resultante empuja el pistón hacia abajo, provoca la rotación de la manivela y convierte el movimiento lineal del pistón en movimiento rotativo en el cigüeñal.



**Figura 2.5 Representación del mecanismo Biela – Manivela**

Fuente: Taller de robótica educativa (2017).

Este sistema consta de dos componentes principales:

### 2.1.1.1 Biela

Una biela es una barra que puede moverse de forma lineal en una dirección específica. Tiene un extremo fijo y un extremo móvil. Algunas de sus características más importantes son las siguientes.

- **Función en el sistema biela-manivela:**  
La biela conecta el punto móvil de la manivela con el objeto de que experimenta el movimiento lineal. En el contexto de un motor de combustión interna, la biela está conectada al pistón. Cuando la manivela gira, la biela transmite el movimiento rotativo de la manivela al pistón, lo que genera un movimiento lineal ascendente y descendente del pistón dentro del cilindro del motor.
- **Construcción y diseño:**  
Las bielas suelen tener una forma alargada y pueden estar hechas de materiales resistentes y ligeros, como aleaciones de aluminio o acero. Su diseño y longitud son cruciales para determinar la relación de movimiento entre la manivela y el objeto en movimiento lineal.

- **Conexiones articuladas:**  
La biela está conectada a la manivela en un extremo y al objeto en el otro extremo. Ambas conexiones son articuladas para permitir el movimiento rotativo de la manivela y el movimiento lineal de la biela.
- **Aplicaciones adicionales:**  
Además de motores de combustión interna, las bielas se utilizan en una variedad de aplicaciones, como máquinas herramientas, compresores, motores alternativos y otros dispositivos mecánicos que requieren la conversión controlada entre movimiento rotativo y lineal.
- **Consideraciones de diseño:**  
En el diseño de la biela, se deben tener en cuenta factores como la resistencia a la fatiga, la rigidez y la durabilidad. La geometría de la biela y su material de construcción son seleccionados para garantizar un rendimiento eficiente y seguro.

### 2.1.1.2 Manivela

Manivela: La manivela es otra barra que está conectada a la biela en un punto móvil. La manivela se utiliza para producir un movimiento circular o rotativo al girar alrededor de un eje. Algunas de sus características más importantes son las siguientes.

- **Función en el sistema biela-manivela:**  
La manivela es una barra conectada a un eje rotativo. Cuando la manivela gira alrededor de este eje, genera un movimiento circular. La función principal de la manivela en el sistema biela-manivela es convertir ese movimiento circular en un movimiento lineal en el extremo conectado a la biela.
- **Construcción y diseño:**  
Las manivelas suelen tener una forma alargada, con un extremo conectado al eje rotativo y otro extremo conectado a la biela. El diseño de la manivela determina la relación entre el movimiento rotativo de la manivela y el movimiento lineal resultante de la biela.
- **Máquinas y motores:**  
La manivela es comúnmente utilizada en una variedad de máquinas y motores, como motores de combustión interna, máquinas herramientas, bombas y otros dispositivos mecánicos. En un motor, por ejemplo, la manivela está conectada al cigüeñal y, al girar, convierte el movimiento rotativo en movimiento lineal a través de la biela conectada al pistón.
- **Ángulo de la manivela:**



El ángulo en el que gira la manivela con respecto al eje rotativo afecta la amplitud y la dirección del movimiento lineal de la biela. Este ángulo es un factor crítico en el diseño para lograr el tipo de movimiento lineal deseado.

## 2.1.2 Motor a Pasos

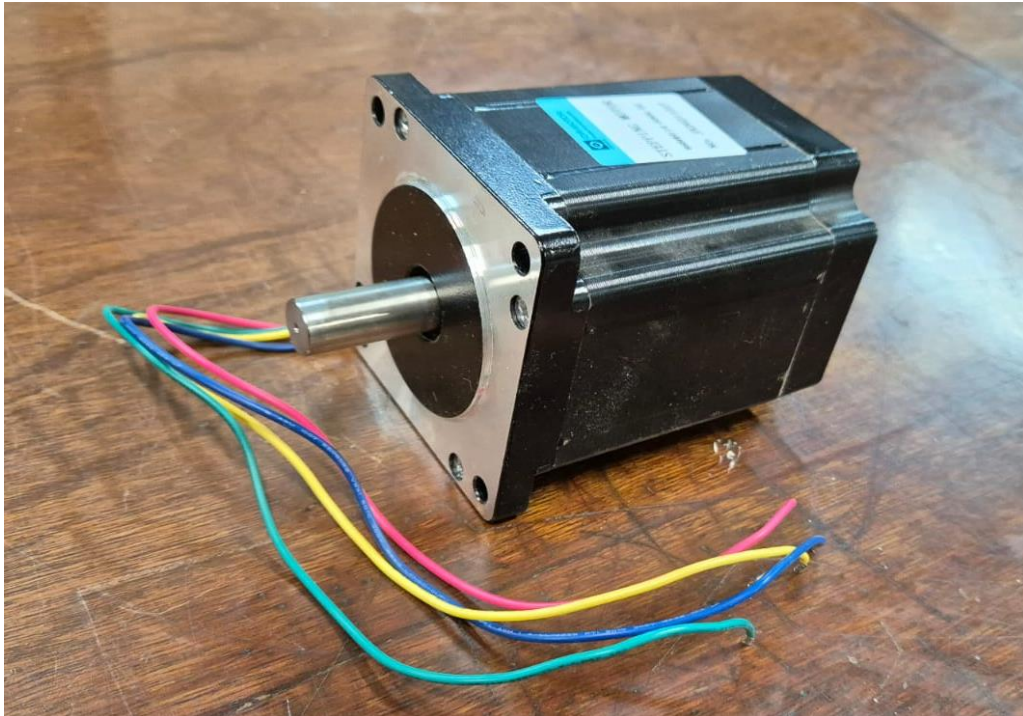
Un motor a pasos es un tipo de motor eléctrico que se distingue por su capacidad para realizar movimientos angulares en pasos discretos en respuesta a señales eléctricas específicas. A diferencia de los motores convencionales, los motores a pasos no giran de manera continua, sino que avanzan en incrementos predeterminados, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un control de posición preciso. Estos motores operan mediante la aplicación de pulsos eléctricos, donde cada pulso desencadena un paso angular en el rotor. La resolución del motor, determinada por el número de pasos para completar una rotación, influye en la precisión de su movimiento.

La principal ventaja de los motores a pasos radica en su capacidad para realizar movimientos muy precisos, lo que los convierte en una opción popular en campos como la automatización industrial, la impresión 3D y las máquinas CNC. Existen diferentes tipos de motores a pasos, entre ellos el unipolar y el bipolar, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas. Además, estos motores ofrecen un par constante en reposo, lo que significa que pueden sostener una carga estática sin necesidad de un freno adicional. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los motores a pasos pueden tener limitaciones en términos de velocidad, especialmente a velocidades más altas donde el torque puede disminuir.

La facilidad de control es otra característica distintiva de los motores a pasos. Se pueden controlar mediante controladores específicos que envían secuencias de pulsos eléctricos para lograr el movimiento deseado. Aunque son ideales para aplicaciones de posicionamiento preciso, es importante considerar que los motores a pasos pueden no ser la elección óptima para aplicaciones que requieren altas velocidades. En resumen, los motores a pasos son componentes valiosos en la ingeniería eléctrica y mecánica, destacándose por su precisión y control en entornos donde la repetibilidad y la exactitud son esenciales.

El motor a pasos propuesto para el presente proyecto (figura 2.6) es un motor Nema 34 de 8 Nm con las siguientes especificaciones:

- Números de fases: 2
- Angulo de paso:  $1.8^\circ$
- Corriente: 5A
- Resistencia:  $0.65\% \Omega$
- Inductancia:  $3.6\% \text{ mH}$
- Diámetro del eje: 14 mm
- Diámetro exterior: 60 mm
- Torque: 68 kg\*cm
- Longitud: 114 mm



**Figura 2.6 Motor NEMA 34 de 8 Nm marca CW Motor**

### **2.1.3 Driver 2DM860**

El controlador de motor a pasos 2DM860 es un componente fundamental en sistemas que requieren un control preciso de motores a pasos bipolares. Diseñado para la alimentación y el control de este tipo de motores, el 2DM860 ofrece versatilidad al permitir ajustes en la corriente suministrada al motor, lo que es esencial para adaptarse a las necesidades específicas de la aplicación. Además, destaca por su capacidad para operar en modos de micropasos, una característica que divide cada paso completo en pasos más pequeños, este proceso mejora la resolución y suaviza el movimiento del motor. Esto es especialmente valioso en aplicaciones donde la precisión y la suavidad del movimiento son críticas, como en máquinas CNC y sistemas de automatización industrial.

El 2DM860 no solo proporciona alimentación eficiente al motor, sino que también integra características de protección, como la detección de sobrecorriente, sobretensión y recalentamiento, lo que garantiza la seguridad y durabilidad del sistema. Su interfaz de control permite la conexión con sistemas más amplios, acepta señales de pulsos y direcciones para determinar el sentido y la cantidad de movimiento del motor. Este controlador es una elección común en entornos donde la precisión y el control meticuloso de motores a pasos son esenciales para el rendimiento y la eficiencia de la aplicación.

A continuación, se proporciona información general sobre el controlador (driver) para motor 2DM860:

➤ **Funciones principales:**

El 2DM860 es un controlador que proporciona energía y control para motores a pasos bipolares. Su función principal es convertir las señales de control de entrada en corriente y voltaje adecuados para impulsar el motor a pasos y lograr un movimiento preciso.

➤ **Compatibilidad del motor:**

Este driver está específicamente diseñado para motores a pasos bipolares, que son motores que tienen dos bobinas. Es importante asegurarse de que el motor que se va a utilizar sea compatible con el driver en términos de corriente y voltaje.

➤ **Corriente ajustable:**

Uno de los aspectos destacados del 2DM860 es su capacidad para ajustar la corriente del motor. Esto permite adaptar la corriente suministrada al motor según las necesidades específicas de la aplicación, lo que puede ser beneficioso para el rendimiento y la eficiencia energética.

➤ **Micropasos:**

Muchos drivers, incluido el 2DM860, admiten la operación en modos de micropasos. Los micropasos dividen cada paso completo en pasos más pequeños, mejora la resolución y suaviza el movimiento del motor.

➤ **Protecciones:**

Los controladores de motores a pasos, como el 2DM860, suelen incluir protecciones contra condiciones adversas como sobrecorriente, sobretensión y recalentamiento. Estas características contribuyen a la seguridad y durabilidad del sistema.

➤ **Interfaz de control:**

Los controladores de motor a pasos suelen tener interfaces de control que permiten la conexión con sistemas de control más amplios. Pueden aceptar señales de pulsos y direcciones para determinar el sentido y la cantidad de movimiento del motor.



**Figura 2.7 Driver 2DM860 utilizado en el prototipo**

Fuente: Elaboración propia (2024).

## 2.1.4 Fuente de alimentación 48V 10A

Una fuente de alimentación en un circuito eléctrico cumple un papel crucial al suministrar energía constante y adecuada para el funcionamiento de los dispositivos conectados. Su función principal es convertir la energía eléctrica de una forma a otra, es decir, convierte un voltaje y/o corriente con variaciones a flujos estables de energía que se ajusten a los requisitos específicos de cada componente del circuito. Esta fuente de alimentación, además de adaptar y regular la tensión, también incluyen circuitos de protección contra sobrecorriente y cortocircuitos para prevenir daños a los dispositivos y al propio circuito. Lo que la convierte en un componente esencial entre una variedad de dispositivos electrónicos, desde electrodomésticos hasta equipos industriales, al asegurar un suministro de energía confiable y eficaz para el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos.

En la siguiente tabla se enlistan las especificaciones técnicas (datasheet) de la fuente de alimentación de 48V y 10A implementada en el presente proyecto (figura 2.8):

**Tabla 2.1 Especificaciones técnicas de la fuente de alimentación**

Modelo	S-500-48
Voltaje DC de salida	48 V
Error de voltaje en salida	±1%
Corriente de salida nominal	10 A
Rango de corriente de salida	0 – 10 A
Ruido y onda	300 mVp-p
Estabilidad de entrada	±0.5%
Estabilidad de carga	±0.5%
Potencia de salida DC	500 W
Eficacia	87%
Rango ajustable para voltaje	±10%

Fuente: Mulview (2016).



**Figura 2.8 Fuente de alimentación de 48V y 10<sup>a</sup>**

Fuente: Elaboración propia (2024).

## 2.1.5 Cople de unión mecánica

Un acople para motores (figura 2.9) es un componente mecánico utilizado para conectar dos ejes de manera que puedan transmitir movimiento de una pieza mecánica a otra. Los acoples desempeñan un papel crucial en

la transmisión de potencia y movimiento entre el motor y la carga dinámica que el motor está destinado a impulsar. Aquí se describen algunos propósitos y funciones clave de los acoples para motores:

- **Transmisión de torque y movimiento:**  
El acople para motores permite la transferencia eficiente de torque y movimiento entre el eje del motor y el eje de la carga. Esto asegura que la energía generada por el motor se transmita adecuadamente para realizar el trabajo necesario.
- **Compensación de desalineaciones:**  
Los acoples son útiles para compensar pequeñas desalineaciones entre los ejes del motor y la carga. Las desalineaciones pueden ocurrir debido a tolerancias de fabricación, vibraciones o cambios en la posición de los componentes. El acople ayuda a minimizar la carga y el desgaste asociados con estas desalineaciones.
- **Amortiguación de vibraciones y choques:**  
Algunos acoples están diseñados para absorber vibraciones y choques, a fin de proteger tanto al motor como a la carga de posibles daños. Esta capacidad de amortiguación contribuye a una operación más suave y a una mayor vida útil de los componentes.
- **Facilita el mantenimiento:**  
El uso de acoples facilita el mantenimiento al proporcionar una conexión que se puede desmontar con relativa facilidad. Esto simplifica la tarea de reemplazar o dar servicio a componentes específicos sin la necesidad de desmontar todo el sistema.
- **Variedad de tipos y diseños:**  
Existen diferentes tipos de acoples, como los flexibles, los rígidos y los elásticos, cada uno diseñado para aplicaciones específicas. La elección del tipo de acople depende de factores como el tipo de carga, la velocidad, la precisión y los requerimientos de alineación.



**Figura 2.9 Cople de unión mecánica utilizado para el prototipo**

## 2.1.6 Arduino NANO

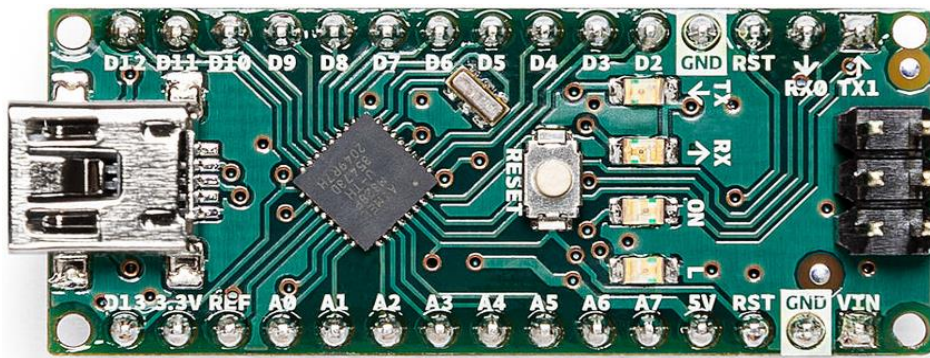
El Arduino Nano (figura 2.10) es una placa de desarrollo compacta basada en el microcontrolador ATmega328P, la cual ofrece funcionalidades similares a su contraparte más grande tal como el Arduino Uno, pero en un formato más pequeño. Con pines digitales y analógicos, capacidades de PWM, interfaces de comunicación serial y conectividad USB para programación y alimentación. Su versatilidad se ve respaldada por la compatibilidad con componentes (shields) diseñados para el Arduino Uno, y existen versiones operativas a 5V y 3.3V para adaptarse a diferentes requisitos de voltaje.

En la tabla 2.2 se enlistan las especificaciones técnicas más importantes de este componente:

**Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del Arduino NANO.**

Microcontrolador	ATMEGA328
Arquitectura	AVR
Voltaje de operación	5 V
Memoria Flash	32 kB de los cuales 2 kB son
SRAM	2 kB
Velocidad de reloj	16 MHz
Pines de entrada analógica	8
EEPROM	1 kB
Corriente DC por pines I/O	20 mA (Pines I/O)
Voltaje de entrada	7 - 12 V
Pines I/O digitales	22 (6 de ellos son de PWM)
Salidas PWM	6
Consumo de energía	19 mA
Tamaño de PCB	18 x 45 mm
Peso	7 g

Fuente: Arduino (2024).



**Figura 2.10 Placa Arduino NANO**

Fuente: Arduino (2024).

## 2.1.7 Impresora 3D Ultimaker 2+ Connect

La Impresora 3D Ultimaker 2+ Connect (figura 2.11) es una versión mejorada de su predecesora, la Ultimaker 2+, con la adición de características y conectividad mejoradas. A continuación, se muestra información clave sobre la Ultimaker 2+ Connect:

➤ **Tecnología de impresión:**

La Impresora 3D Ultimaker 2+ Connect utiliza la tecnología de fabricación de filamento fundido (FFF o FDM), que es un proceso de impresión 3D donde el material termoplástico se extruye capa por capa para construir el objeto tridimensional.

➤ **Volumen de construcción:**

Ofrece un área de construcción generosa que permite imprimir objetos de tamaño considerable. Este factor es importante para aquellos que buscan capacidad para imprimir piezas más grandes o múltiples componentes a la vez.

➤ **Materiales compatibles:**

Es compatible con una variedad de materiales de filamento, incluye PLA, ABS, CPE, Nylon y otros, lo que brinda flexibilidad a los usuarios para elegir el material adecuado para sus aplicaciones específicas.

➤ **Conectividad mejorada:**

La adición de "Connect" en el nombre indica una mejora en la conectividad. La Ultimaker 2+ Connect ofrece conectividad a través de Wi-Fi y Ethernet, lo que facilita la gestión y monitoreo remoto de la impresión desde dispositivos conectados en red.

➤ **Pantalla táctil:**

Incorpora una pantalla táctil a color que simplifica la navegación por el menú y la configuración directamente desde la impresora, lo que facilita y mejora la experiencia del usuario.

➤ **Compatibilidad con cámara:**

Incluye una cámara integrada que permite a los usuarios supervisar visualmente el progreso de la impresión a través de la transmisión de video. Esto es útil para la monitorización remota y la detección de posibles problemas durante el proceso.

➤ **Sistema de extrusión dual (Opcional):**

Al igual que su predecesora, la Ultimaker 2+ Connect tiene la opción de utilizar un cabezal de impresión dual, lo que permite imprimir con dos materiales o colores diferentes en la misma impresión.

➤ **Entorno de software abierto:**

La Ultimaker 2+ Connect es compatible con el software Cura de código abierto de Ultimaker, que proporciona a los usuarios control sobre la configuración de impresión y opciones avanzadas para ajustar parámetros según sus necesidades.



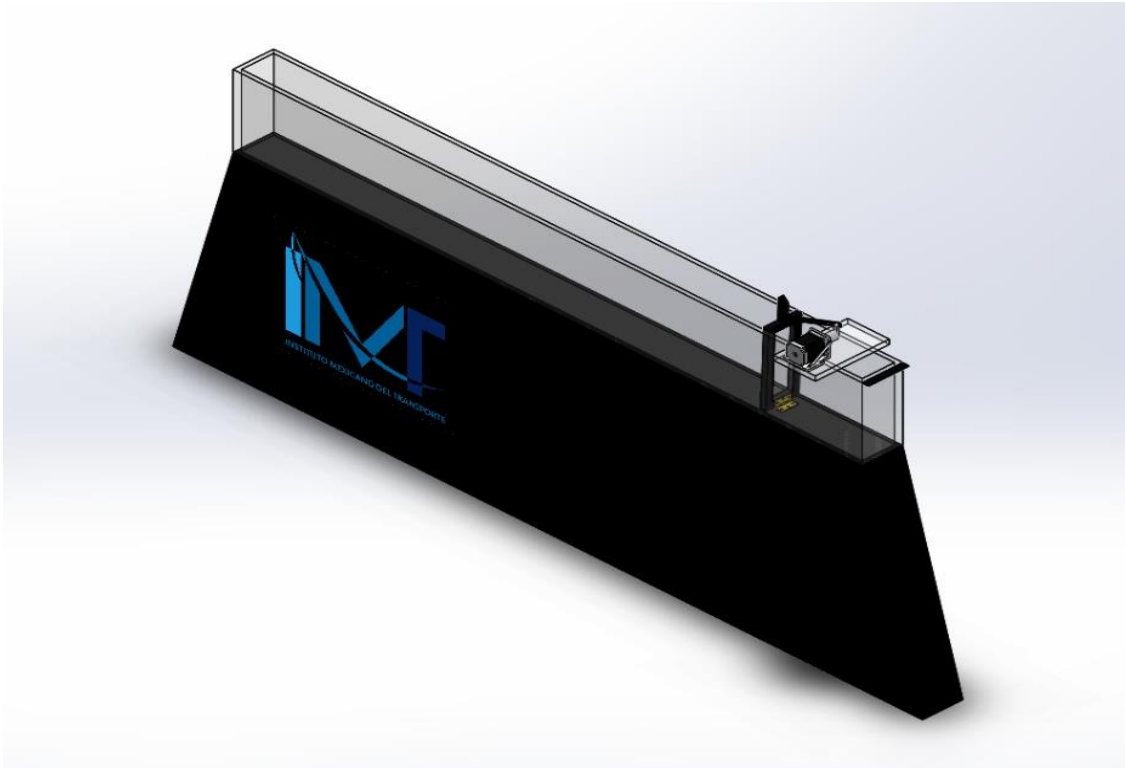
Esta impresora 3D se dirige a usuarios profesionales, educativos y de investigación que buscan una solución confiable y de alta calidad para la fabricación aditiva. Con su conectividad mejorada y otras características avanzadas, la Ultimaker 2+ Connect ofrece una plataforma sólida para proyectos de impresión 3D en una variedad de contextos.



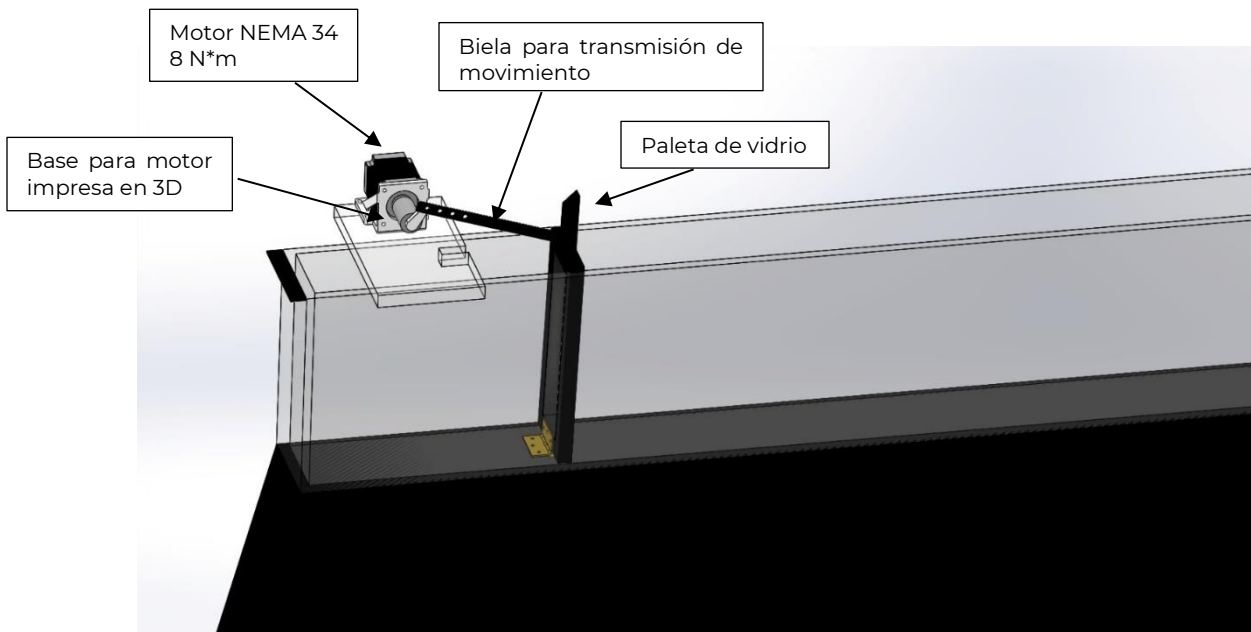
**Figura 2.11 Impresora 3D utilizada para impresión de piezas**

## 2.2 Propuesta de diseño

El modelo tridimensional para el ensamble de la nueva propuesta del sistema de generación de oleaje se diseñó mediante software especializado para modelado mecánico, dicha propuesta se muestra en la figura 2.12. En la figura 2.13 se observa a detalle el nuevo mecanismo que se implementó para tener un mejor control de movimiento con la paleta.

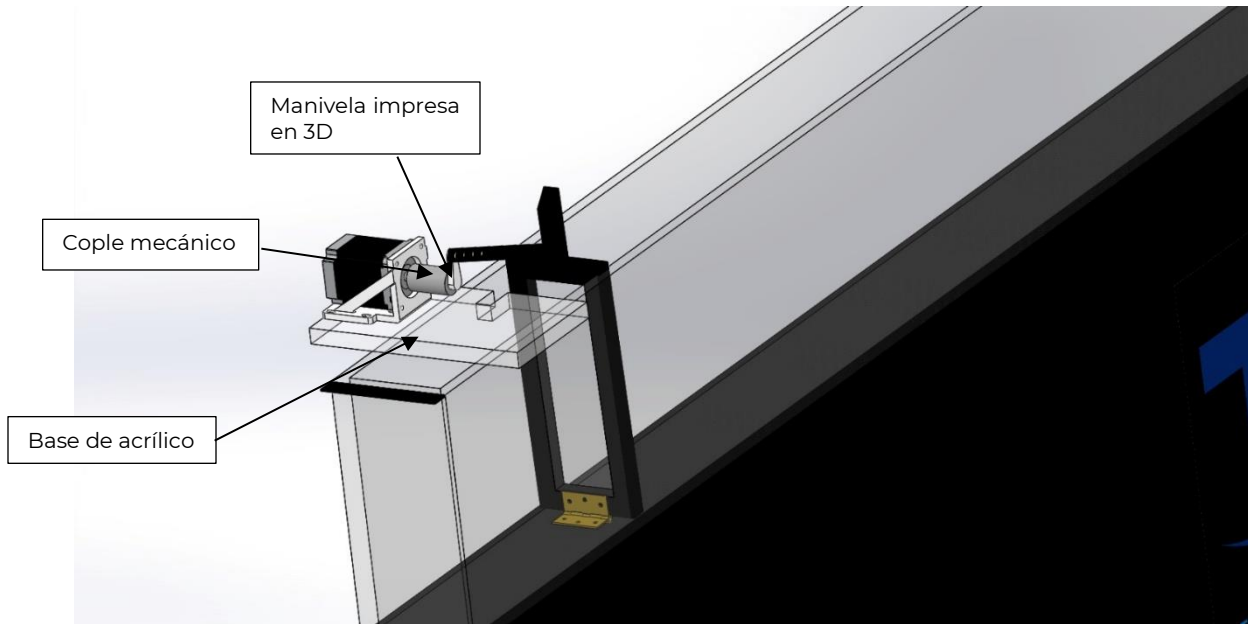


**Figura 2.12 Modelo 3D de propuesta de diseño**



**Figura 2.13 Vista lateral del nuevo mecanismo creado a partir de los nuevos componentes**

En la figura 2.14 se observa cómo está ensamblado el motor a una base creada desde cero por los investigadores involucrados, un soporte para asentar el motor y la unión entre el acople y una biela-manivela que moverá a la paleta. En el ensamble diseñado en 3D, la paleta se encuentra enganchada en el fondo del canal a través de una bisagra, esto solo es demostrativo para simular el movimiento que tendrá ya que en el canal real la paleta está sujeta con una base que se hizo con silicón.



**Figura 2.14 Vista detallada de la propuesta del ensamble entre componentes**

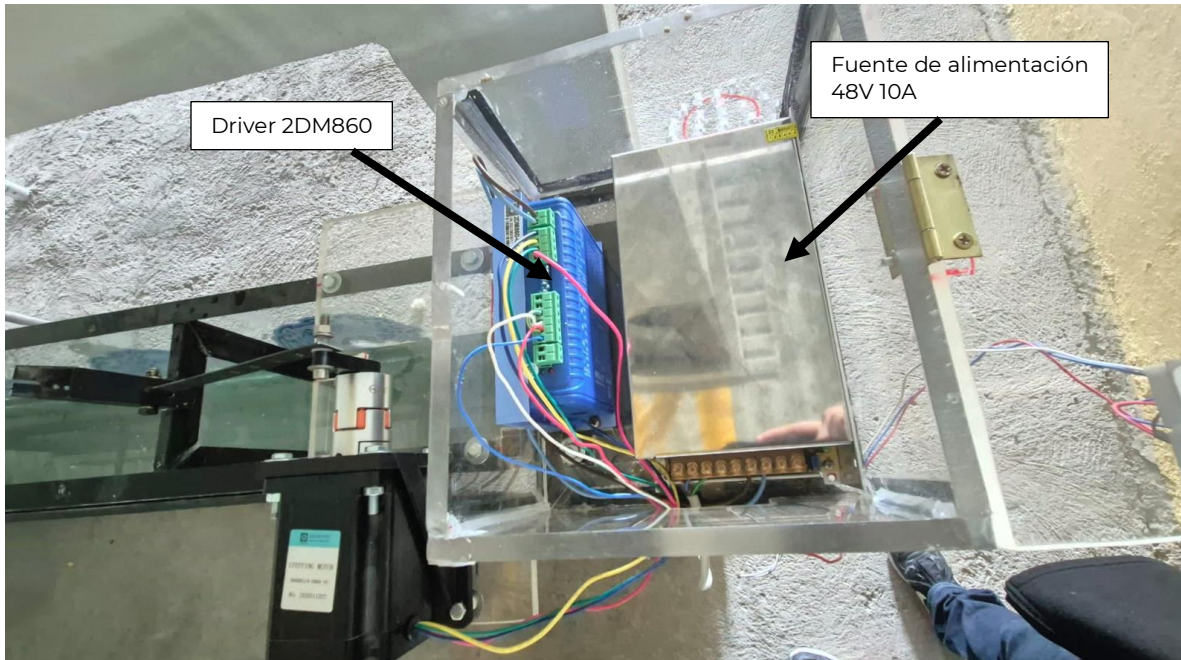
Fuente: Elaboración propia (2024).

Además, en el diseño 3D no se muestra por completo en ensamble final que se realizó en físico ya que también se hizo la construcción de una caja de acrílico (figura 2.15) en la cual se colocaron y protegieron los componentes electrónicos como el driver, la fuente y la protoboard con el Arduino y el botón como se muestra a continuación:

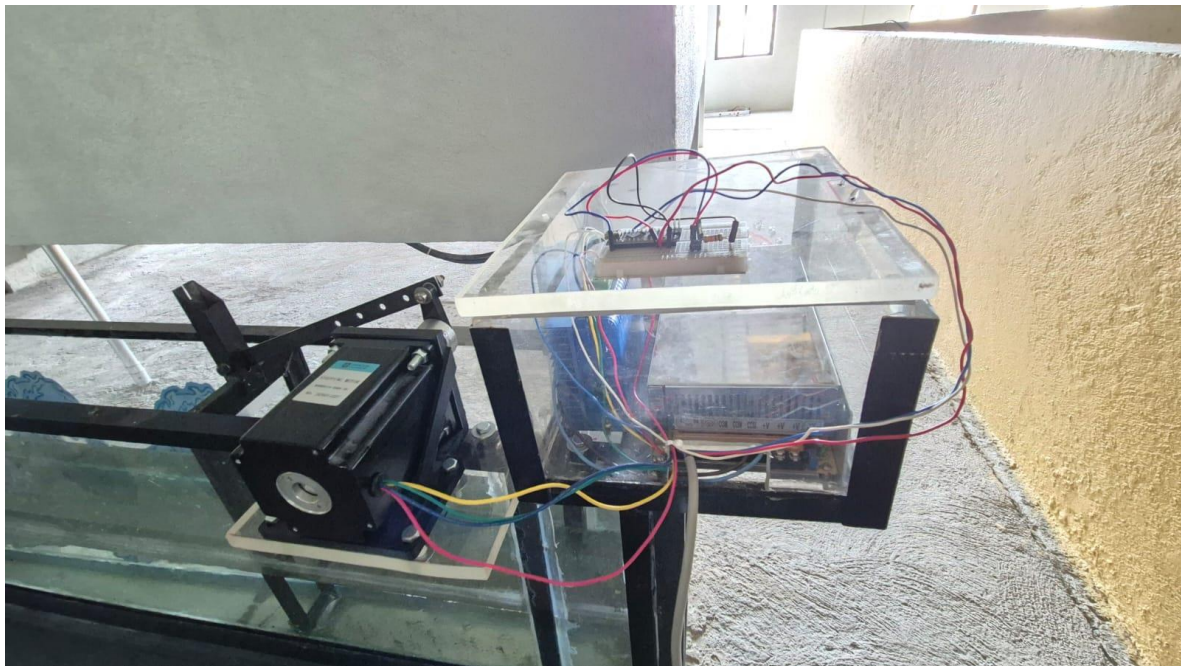


**Figura 2.15 Caja de acrílico para guardar componentes electrónicos del sistema de generación de oleaje**

La caja que se observa en la figura 2.15, se colocó detrás de la base de acrílico donde se encuentra fijado el motor, esto para tener mejor acceso a los componentes en caso de algún fallo eléctrico. Como se mencionó anteriormente, en esta caja solo se encuentran los componentes electrónicos de control como se muestra en la figura 2.16 y 2.17.



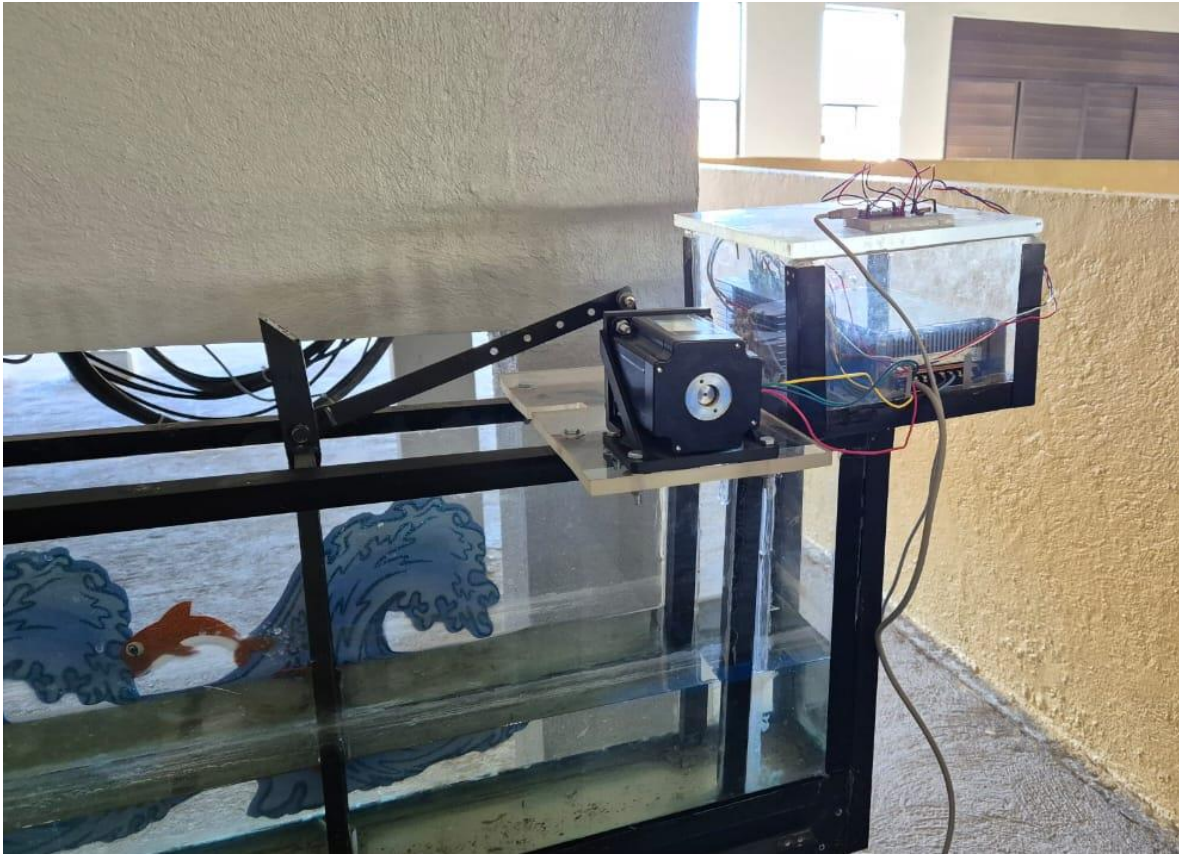
**Figura 2.16 Caja de acrílico con componentes de control**



**Figura 2.17 Caja de acrílico con todos los elementos conectados**

En el capítulo siguiente se detallarán las conexiones que se realizaron para el correcto funcionamiento del prototipo; cabe destacar que de acuerdo a

los parámetros de diseño que se plantaron desde un principio se buscaba implementar un sistema automático donde el sistema se controlara con una tarjeta programable (en este caso el Arduino NANO), la cual sería la responsable de realizar, a través de parámetros dados por el usuario, los diferentes movimientos de oleaje así como distintos tipos de olas, por ello se simplificó bastante la parte de control (motor y controlador) por uno de menores dimensiones en comparación con el motor de corriente alterna (AC) pero con una alta capacidad de respuesta y precisión, por lo tanto el ensamble final del prototipo se observa en la figura 2.18.



**Figura 2.18 Ensamble final del prototipo de acuerdo con diseño propuesto**

## 3 Desarrollo de software y hardware para el prototipo

---

En este capítulo se menciona el desarrollo del software y hardware necesario para un correcto funcionamiento del prototipo. En la programación del software se utilizó el compilador de Arduino el cual es de uso libre para desarrollar el programa que nos permitirá realizar el movimiento necesario para simular el oleaje, mientras que para el ensamble del hardware únicamente se necesitaron los componentes electrónicos y de control enlistados en el capítulo anterior para desarrollar un diagrama de conexiones eléctricas adecuado para su funcionamiento correcto.

### 3.1 Software

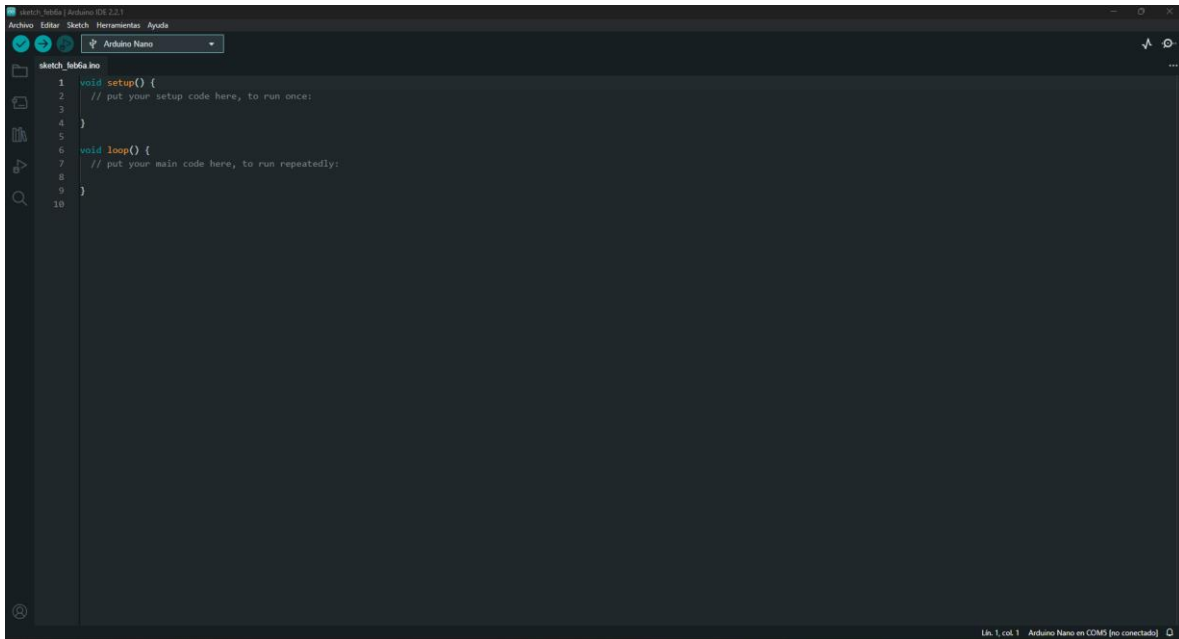
Para el desarrollo del software que controla todo el sistema se utilizó el compilador Arduino IDE versión 2.2.1 (figura 3.1), que fue la versión más reciente al momento de realización de este proyecto.



**Figura 3.1** Logo del compilador utilizado para el desarrollo del software

Fuente: Arduino (2024).

El compilador Arduino IDE versión 2.2.1 es fácil de operar por nuevos usuarios, ya que contiene las siguientes funciones: imprimir gráficas, inicializar variables, introducir comandos para que el código ejecute indicaciones, visualizar las indicaciones que el compilador realiza en tiempo real, etc., es por ello que se decidió utilizar una tarjeta de desarrollo Arduino ya que además de ser un microcontrolador potente y versátil nos permite realizar diversas actividades y rutinas a nuestro código: en la figura 3.2 observamos como es la interfaz del compilador IDE al crear un nuevo programa o proyecto(sketch).



**Figura 3.2 IDE de Arduino al iniciar nuevo proyecto**

Para realizar el correcto y adecuado funcionamiento del software desarrollado por la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, se descargó una librería de uso libre llamada **AccelStepper** que, de acuerdo con lo indicado en su documentación técnica, la librería es una herramienta muy útil para controlar motores paso a paso de manera sencilla y precisa con placas Arduino u otras placas de desarrollo compatibles. Proporciona funciones para controlar la velocidad, la aceleración y la desaceleración del motor de manera gradual, lo que permite movimientos suaves y precisos.

A continuación, se enlistan algunas de las funcionalidades principales de la librería AccelStepper:



- **Control de velocidad:** Permite establecer la velocidad a la que el motor debe girar, tanto en términos de velocidad máxima como de velocidad actual.
- **Control de aceleración y desaceleración:** Permite establecer la aceleración y la desaceleración del motor, lo que significa que el motor puede arrancar suavemente, alcanzar su velocidad máxima y detenerse gradualmente.
- **Movimientos absolutos y relativos:** Puede controlar el motor para que se mueva a una posición específica (movimiento absoluto) o para que se mueva una cantidad determinada de pasos desde su posición actual (movimiento relativo).
- **Control de múltiples motores:** La librería permite manejar varios motores paso a paso de forma independiente en la misma placa Arduino.

Aunque no se aproveche el máximo potencial de esta librería (por ahora), esta, permitió tener movimientos más precisos sobre el mecanismo, por lo que fue la mejor opción para realizar este tipo de movimiento ya que Arduino posee por defecto una librería en específico para el control de motores a paso, pero por sus características técnicas no permite tener un mejor control por lo que fue descartada.

Para llamar a la librería solo se utiliza la siguiente línea de código:

```
1 #include <AccelStepper.h>
```

**Figura 3.3** Línea de código para llamar a la librería

Después se declaran los parámetros que la librería debe controlar como se muestra en la figura 3.4.

```
7 AccelStepper stepper(1, pasos, direccion);
```

**Figura 3.4** Declaración de parámetros de entrada de la librería

Cabe señalar que como parte de la colaboración entre la Unidad de Alta Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México y el IMT, se desarrolló la programación para el control del prototipo de generador, por lo que, debido a la confidencialidad de dicha colaboración el código no se proporcionará en el presente documento. Dentro del presente informe solo se presenta el uso del software IDE adecuado y las librerías,

parámetros, notas, fórmulas y/o propuestas de código que se utilizaron para el desarrollo del código final.

## **3.2 Hardware**

De igual forma, como parte del acuerdo de confidencialidad, el hardware desarrollado que se utilizó para la implementación del prototipo dentro del Laboratorio de Hidráulica Marítima no puede ser revelado en el presente informe.

## 4 Prueba de funcionamiento del prototipo en ambiente controlado

---

Para el presente trabajo se realizaron diversas pruebas realizadas con el prototipo de generador de olas para conocer el óptimo funcionamiento con la integración de los elementos mecánicos diseñados, con los componentes electrónicos y de control de acuerdo con su función principal.

### 4.1 Prueba 1

En esta primera prueba se integró el mecanismo de generación de oleaje, mencionado en los capítulos anteriores, en donde aún no se contaba con la incorporación del acople mecánico ya que desde el principio se pensaba utilizar el mismo eslabón unido al eje del motor, esto causó un primer problema ya que era imposible unirlos así, por lo que se diseñó un eslabón que serviría como manivela para así poder unir la biela con el eje del motor. El diseño de esta “manivela” es el siguiente:



**Figura 4.1 Primer diseño de manivela**

Como se observa en la figura 4.1, en la parte derecha de esta manivela se rompió un pequeña muesca (ver figura 4.5) que servía para sujetar la biela que conecta con la paleta, esto sucedió por la misma presión que se generaba en la manivela durante el movimiento del mecanismo; mientras que de lado izquierdo observamos un barreno, este se introducía en el eje del motor para así tener la conexión entre paleta y motor, el problema de este diseño además de que la muesca se rompió, después de un tiempo el barreno al no estar sujeto por algo “fijo” con el eje del motor se barrió ya que al ser de la misma medida que el eje (14 mm) y con el constate movimiento y fricción entre ambas partes la manivela cedió y no permitió girar junto con el eje. En la figura 4.2 se muestra como era la conexión de esta manivela en la primera prueba de funcionamiento del prototipo.



**Figura 4.2 Funcionamiento de la primera prueba**

En la figura 4.2 se observa el correcto funcionamiento del sistema, sin embargo, la manera en que está sujeto la manivela con la biela (figura 4.3) de la paleta no era la forma óptima y que por el tiempo de uso dañara el mecanismo, por lo que esta opción de prueba no fue recomendable.



**Figura 4.3** Ensamble entre el primer diseño de manivela y la paleta



**Figura 4.4** Evidencia de funcionamiento de la primera prueba

## **4.2 Prueba 2**

En la segunda prueba se modificó el diseño de la manivela ya que esta no nos permitía realizar los movimientos por fallas mecánicas como el barrido del barreno que se conecta con el eje del motor, la rotura de la muesca que permitía la conexión entre la manivela con la biela de la paleta hacia el eje del motor para la realización del movimiento rotatorio e implementar el sistema biela-manivela mencionado en el capítulo dos del presente informe.

Por lo tanto, para evitar que se barrierá el orificio de conexión con el eje se diseñó la siguiente propuesta mostrada en la figura 4.5.



**Figura 4.5 Segunda propuesta de diseño de la manivela**

Como podemos observar en la figura 4.5, justo en el lugar donde se encontraba el orificio (figura 4.1) se decidió extraer el mismo barreno en vez de cortarlo como desde el principio, esto nos permitió usar el acople mecánico para tener una unión más firme entre el eje del motor con la manivela. En la figura 4.6 se muestra el ensamble de esta manivela con el sistema del prototipo.



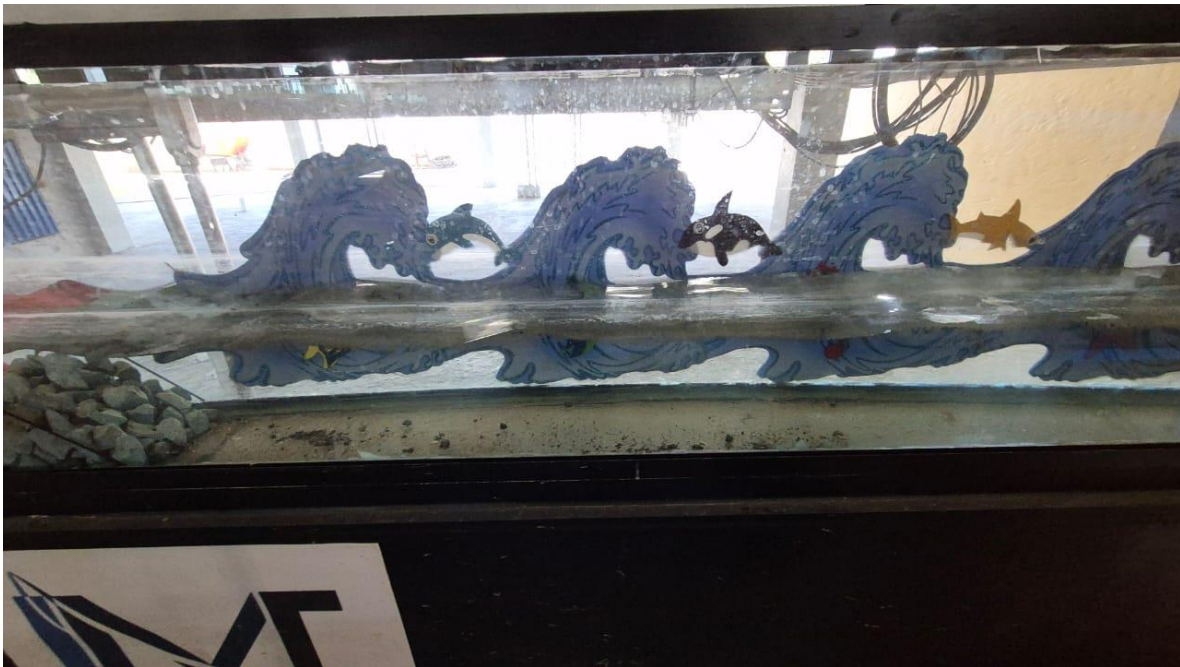
**Figura 4.6** Ensamble de manivela con eslabón de paleta para segunda prueba



**Figura 4.7** Vista lateral del ensamble para realización de segunda prueba

Como se observa en las figuras anteriores, el mecanismo ya no presentaba inconveniente al momento de realizar los movimientos ya que con la ayuda del acople mecánico le permitió tener más firmeza con la unión entre el eje y la biela de la paleta, este sistema tuvo solo un problema entre la unión biela – manivela ya que tendía a tener demasiado movimiento por lo que se decidió reducir ese movimiento involuntario limitándolo con una tuerca, por ello, se realizó la prueba de funcionamiento durante un periodo de tiempo necesario para conocer la resistencia del mecanismo, se llegó a la conclusión de que existía un efecto negativo la implementación de la tuerca ya que no lo sujetaba de manera adecuada aunque sí tendría un tiempo de vida bastante mayor al anterior, por lo que, la pieza se deformaría o fracturaría poco tiempo después.

En la figura 4.8 se muestra el comportamiento y funcionamiento del mecanismo dentro del canal.



**Figura 4.8 Segunda prueba de funcionamiento dentro del canal de olas**

Se realizó una comparativa entre la primera y la segunda prueba, se observó que el rendimiento en ambas fue similar; ya que respondieron de manera asertiva gracias al buen funcionamiento del mecanismo subyacente. No obstante, la segunda prueba fue resultó mejor ya que a diferencia de la primera, el mecanismo implementado tuvo mejor resistencia ante las diversas velocidades del motor. Además, brindó al usuario una mejor visión del comportamiento del oleaje dentro del



sistema, ajustándose a los parámetros iniciales establecidos desde el principio.

Durante la primera prueba, si bien el sistema mostró un desempeño adecuado, se identificaron ciertas limitaciones en su capacidad de adaptación a las fluctuaciones en la velocidad del motor. Estas limitaciones podrían atribuirse a la configuración inicial del dispositivo, la cual no estaba completamente optimizada para una amplia gama de condiciones operativas. En contraste, la segunda prueba implementó ajustes específicos que aseguraron una respuesta más sólida y estable ante los cambios en la velocidad del motor, lo que evidencia una mejora significativa en la adaptabilidad del sistema.

Adicionalmente, la segunda prueba destacó por su capacidad de visualización mejorada, situación que permite al usuario una comprensión más profunda del comportamiento del oleaje dentro del sistema. Este aspecto resulta fundamental para la toma de decisiones informadas durante la etapa de diseño y operación del dispositivo. Además, cabe resaltar que la segunda prueba ofreció una mayor flexibilidad en la personalización del sistema, ajustándose a las necesidades individuales del usuario. La posibilidad de adaptar los parámetros de manera precisa y detallada otorgó a los operadores una libertad sin precedentes para ajustar el dispositivo a diferentes condiciones operativas y requisitos específicos del proyecto. Esta flexibilidad adicional no solo enriquece la versatilidad del sistema, sino que también puede traducirse en una mayor satisfacción del cliente al proporcionar soluciones más personalizadas y adaptadas a sus necesidades únicas.

De acuerdo con el análisis previsto con las dos pruebas anteriores, se determinó implementar otra manivela junto con otro sistema de sujeción que se abordará en el siguiente capítulo.



## 5 Ajustes del prototipo

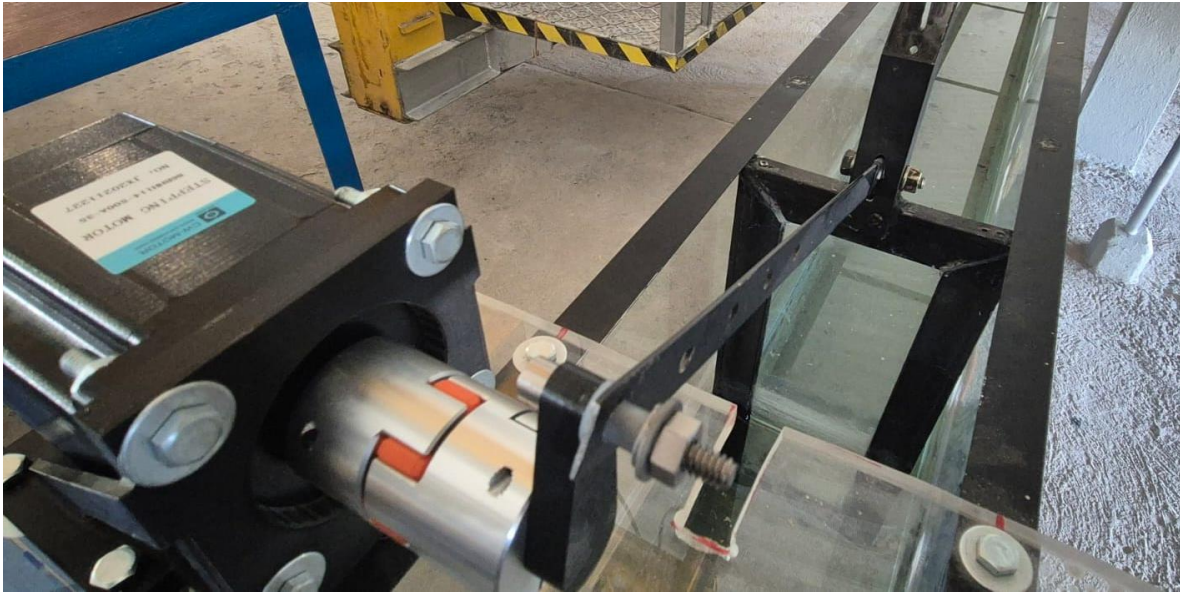
---

En este capítulo se presenta el ajuste que se implementó para la obtención de un mejor funcionamiento del prototipo a base de los componentes que se tienen instalados en el sistema. En la figura 5.1 se observa el diseño final de la manivela:



**Figura 5.1 Propuesta final de diseño de manivela**

Como se observa en la figura 5.1, la manivela tiene un cambio de diseño, en esta se decidió hacer un barreno en la parte superior en la cual se hacía la unión con el eslabón de la paleta, este diseño permitió contrarrestar el movimiento involuntario que se generaba solo con la tuerca de la prueba dos debido a la vibración que se generaba, con esto, fue más sencillo hacer la unión a través de un tornillo y, para evitar de nueva cuenta las vibraciones del sistema se implementó el uso de un anillo de plástico que permitió que el tornillo no tuviera fricciones excesivas y que con el tiempo generara un fallo mecánico.

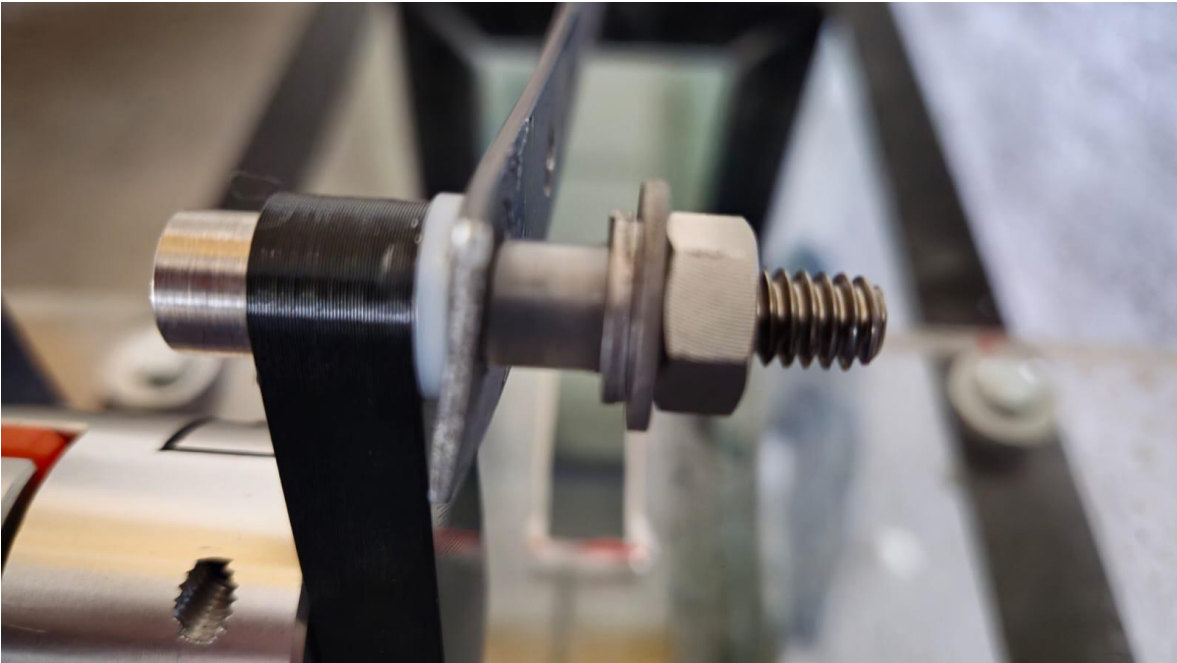


**Figura 5.2** Ensamble del nuevo diseño final de manivela con la biela



**Figura 5.3** Implementación del ajuste hecho en el prototipo

En la figura 5.2 se observa la implementación del tornillo con dos arandelas, una de presión y la otra galvanizada junto con su respectiva tuerca, este arreglo permite tener una mejor sujeción para evitar que tanto el tornillo como el anillo no se salieran de su posición y así mantener un movimiento puro sin tanto ruido mecánico como las vibraciones.



**Figura 5.4 Vista detallada de la unión con el tronillo y el anillo de plástico**

Como se observa en la figura 5.4, el anillo de plástico jugó un papel importante al atravesar el barreno del eslabón para conectarse con la manivela. Esta disposición aseguró la ausencia de roces y fricciones entre la manivela y el eslabón, de esta forma se optimizó el rendimiento del sistema. Además, la inclusión de las dos rondanas proporcionó una mayor estabilidad y firmeza. Con este diseño las vibraciones mecánicas disminuyeron en el eslabón durante los movimientos oscilatorios, se redujo el riesgo de fatiga en el sistema de unión y con ello se prolongó la vida útil del mecanismo.

A través de la siguiente secuencia de imágenes presentadas, se podrá apreciar de manera visual el resultado tangible de la adecuación y ajuste previamente justificados, el cual se aprecia por el movimiento de la manivela y la pieza de acero sujeta a ella. Además, las imágenes sirven como una herramienta efectiva para validar la eficacia de los cambios implementados, tal secuencia proporciona una evidencia visual que respalda las decisiones tomadas durante el proceso de ajuste y

optimización del mecanismo. Mediante esta visualización, se podrá confirmar la mejora significativa en la operatividad y rendimiento del sistema, lo que le otorga la validez a las adaptaciones realizadas.



**Figura 5.5** Secuencia del movimiento generado mediante el ajuste de la manivela

De acuerdo con el movimiento descrito por la secuencia de imágenes (figura 5.5) principalmente por la manivela sujeta al eje del motor, el cual genera un movimiento oscilatorio con velocidad y aceleración definidas por el programa generador de la señal de oleaje, lo que reproduce las condiciones deseadas de las características del oleaje a reproducir. Este enfoque se alinea con el objetivo de mantener una tendencia constante en las olas, lo que es fundamental para diversos estudios realizados en el laboratorio. La capacidad de ajustar los parámetros según los requisitos específicos de cada investigación subraya la versatilidad y adaptabilidad del mecanismo, proporciona un entorno controlado y confiable para llevar a cabo una amplia gama de experimentos y análisis en el campo de estudio correspondiente.

Con la implementación de desarrollo tecnológico dentro del Laboratorio de Hidráulica Marítima del Instituto Mexicano del Transporte nos permite avanzar en la comprensión y gestión de los recursos costeros y marinos. La tecnología facilita la simulación precisa de condiciones ambientales y procesos oceanográficos, lo que permite a los investigadores estudiar fenómenos como el comportamiento de las estructuras marinas. Además, la innovación tecnológica en instrumentación y creación de este tipo de máquinas engloba la obtención de datos más precisos y en tiempo real, lo que mejora la capacidad de monitoreo y predicción de eventos extremos, como tsunamis y otros fenómenos ambientales.

A continuación, en la figura 5.6 se muestra la optimización de un movimiento más preciso:



**Figura 5.6** Movimiento óptimo y preciso de acuerdo con las características de oleaje deseadas



Con base en los resultados de la operación y generación de oleaje por el sistema desarrollado para tal propósito, en comparación con los resultados del sistema anterior de generación de olas con un motor a dos pasos y una polea unida a la paleta generadora, es notable el avance en el mejoramiento de este, ya que el desarrollado en este proyecto realiza movimientos controlados por computadora, con el empleo de software, oleaje más estilizado y con alturas y periodos de ola definidos, a diferencia del anterior sistema que lo hacía rudimentariamente en forma uniforme solo con el movimiento de la polea accionado por el motor a dos tiempos.

En este sentido, la capacidad de observar con mayor detalle el comportamiento del oleaje dentro del sistema ofrece una ventaja significativa para los investigadores y profesionales del campo de la hidráulica marítima. Esta mejora no solo facilita la configuración inicial de los experimentos, sino que también, permite una supervisión más precisa durante el transcurso de estos, lo que contribuye a una comprensión más profunda de los procesos hidráulicos estudiados. Se concluye así este capítulo con una perspectiva prometedora sobre el potencial de mejorar esta tecnología que sigue en desarrollo por los investigadores del laboratorio de Hidráulica Marítima del IMT para mejorar la investigación e innovación sobre los modelos hidráulicos, patentar prototipos o incluso mejorar la precisión y calidad de los estudios realizados en este laboratorio.

De esta forma con la mejora e implementación de un sistema generador de oleaje propio y controlado vía computadora a través del software desarrollado por investigadores del Instituto Mexicano del Transporte, se refleja directamente en el empleo de esta innovación tecnológica para uso no solo en canales o tanques de oleaje actuales, sino también en medios de mayor magnitud en dimensiones, lo que permitirá desarrollar estudios de hidráulica marítima portuaria con más detalle y en campos donde no se habían realizados estudios anteriormente, como lo es el de la extracción de petróleo. Esta tecnología marcará un avance en estudios de ingeniería de puertos y costas, mejorará el empleo de nuevas tecnologías y garantizará una mayor confiabilidad y durabilidad de la infraestructura nacional en los próximos años.



## Conclusiones

---

La innovación tecnológica aplicada al diseño y desarrollo de generadores de olas para estudios en modelos hidráulicos dentro de laboratorios representa un avance significativo en el campo de la ingeniería costera y la hidráulica marítima en nuestro país. A lo largo de este análisis, hemos explorado cómo la integración de tecnologías avanzadas no solo mejora la precisión y eficiencia de los experimentos, sino que también amplía las capacidades de investigación y abre nuevas oportunidades para comprender y abordar los desafíos relacionados con la dinámica costera y marina.

Este sistema marca la línea de partida para que en futuras etapas se modernicen los generadores de olas actuales del laboratorio de hidráulica marítima del IMT, ya que solo generan oleaje unidireccional, y con el sistema recién desarrollado se podrá generar oleaje multidireccional principalmente en medios como tanques y canales de olas de grandes dimensiones.

El sistema propuesto brinda la capacidad de ajustar con precisión parámetros como la altura y periodo de diversos tipos de ondas (oleaje local y distante o tsunamis), a través de sistemas de control automatizados y software especializado, para que los investigadores mejoren su capacidad de replicar de manera precisa las condiciones reales del mar. Esto no solo mejora la calidad de los datos recopilados durante los estudios, sino que también permite la realización de experimentos bajo una amplia gama de escenarios, lo que facilita la exploración de diferentes variables y la evaluación de múltiples soluciones en un entorno controlado.

En etapas futuras se integrarán al sistema, tecnologías de monitoreo y análisis de datos en los generadores de olas modernos que proporcionarán una retroalimentación en tiempo real sobre el comportamiento del oleaje y su interacción con las estructuras costeras. Los sistemas de sensores avanzados, como los dispositivos de medición de presión y las cámaras de alta velocidad, permiten una observación detallada de los procesos hidrodinámicos, lo que aporta información invaluable para la validación de modelos numéricos y la optimización del diseño de infraestructuras costeras. Esta capacidad de monitoreo continuo y análisis en tiempo real facilita una toma de decisiones más informada y ágil durante el desarrollo de proyectos de ingeniería costera,

lo que a su vez contribuye a la reducción de riesgos y costos asociados con la construcción y mantenimiento de infraestructuras en zonas costeras.

Al aprovechar estas herramientas innovadoras, los investigadores y profesionales del campo de la ingeniería portuaria y costera pueden ofrecer soluciones más efectivas y sostenibles para proteger y preservar nuestras costas y mares para las generaciones futuras.

***Nota: Como se enfatizó en capítulos anteriores, el propósito de este informe es solamente dar a conocer las propuestas tecnológicas que se realizan en beneficio del Instituto Mexicano del Transporte, en específico dentro de la Coordinación de ingeniería Portuaria y Costera, y no sobre el procedimiento para la realización de dicho proyecto ya que por un acuerdo de confidencialidad con la Unidad de Alta Tecnología de la UNAM Campus Juriquilla, toda la información que se maneje dentro del presente documento será solamente para usos informativos y no se revelará información como diseños, programas, parámetros, instrumentos y/o medidas a ninguna persona o institución ajena a las partes de dicho acuerdo.***

## Bibliografía

---

- Arduino (2024). *Arduino Nano*. [Consulta en línea]. <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-nano?selectedStore=us>.
- Arduino (2024). *Software*. [Consulta en línea]. <https://www.arduino.cc/en/software>.
- ASIPONA Salina Cruz (2022). *Programa maestro de desarrollo portuario del puerto de Salina Cruz 2022 – 2027*. [Consulta en línea]. <https://www.puertosalinacruz.com.mx/upl/sec/PMDP%20SALINA%20CRUZ%202022-2027.pdf>.
- CW-Motor (2024). *86BHH series stepper motors*. [Consulta en línea]. <https://en.cwmotor.cn/product/62.html>.
- Dexter, P. y United States Patent Office (1969). *Apparatus and method for producing waves*. [Consulta en línea]. <https://patentimages.storage.googleapis.com/95/e3/89/b953a32c4d36a8/US3473334.pdf>.
- eSMARTCITY (2022). *Las soluciones de SISTEM apoyan la digitalización de los procesos portuarios*. [Consulta en línea]. <https://www.esmartcity.es/2022/03/29/soluciones-sistem-apoyan-digitalizacion-procesos-portuarios>.
- Falnes, J. (2002). *Ocean waves and oscillating systems*. [Consulta en línea]. <https://pdfcoffee.com/ocean-waves-and-oscillating-systems-pdf-2-pdf-free.html>.
- Frías, A. y Moreno, G. (1994). *Ingeniería de Costas*. México: Editorial Limusa.
- HR Wallingford (2021). *Wave gauge system*. [Consulta em línea]. <https://equipit.hrwallingford.com/hydraulic-lab-equipment/wave-gauge-system>
- Mulview Technology Limited (2024). *Mulview Switch Power Suply S-500 Series*. [Consulta en línea]. <https://c1555f5ec9.clvaw-cdnwnd.com/34662fcflfle607c561442431023ac8e/200006707-79dfe7ad65/S-500%20Series%20Datasheet.pdf>

- National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA]. (2023). Waves. [Consulta en línea]. <https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/waves>.
- Pilch, M. (1953). *Laboratory wave-generating apparatus*. [Consulta en línea]. <https://conservancy.umn.edu/handle/11299/108277>.
- Puerto de Veracruz (2018). *Rompeolas poniente*. [Consulta en línea]. <https://twitter.com/ASIPONAVER/status/976817052831817728>.
- Segura D., Serrano, E., Servín, D. y Rendón, C. (2018). *Ventajas de la aplicación de equipos GPS para levantamientos topográficos en entornos costeros*. [NOTAS núm. 174]. México. Instituto Mexicano del Transporte. [Consulta en línea]. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=472&IdBoletin=174>.
- Stepper Motor Canada (2024). *2DM860H Digital Stepper Drive*. [Consulta en línea]. <https://www.steppermotorcanada.ca/dm860h.pdf>.
- TADEMEX (2003). *Uniones y conexiones*. [Consulta en línea]. [http://www.tademex.com.mx/tademexinicio/pdf/parte\\_6.pdf](http://www.tademex.com.mx/tademexinicio/pdf/parte_6.pdf).
- Taller de robótica educativa (2017). *Mecanismos – Biela – Manivela*. [Consulta en línea]. <https://cmirg-robotics.blogspot.com/2017/11/mecanismos-biela-manivela.html>.
- The Open University (1989). *Waves, Tides and Shallow-Water Processes*. [Consulta en línea]. <https://books.google.com.gt/books?id=Y9j-BAAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
- University of Plymouth (2017). *COAST Laboratory – Facilities*. [Consulta en línea]. <https://www.plymouth.ac.uk/schools/school-of-engineering-computing-and-mathematics/coast-laboratory/coast-laboratory-facilities>.
- Ultimaker (2024). *Ultimaker 2+ Connect*. [Consulta en línea]. <https://ultimaker.com/es/3d-printers/s-series/ultimaker-2-connect/>.
- Ultimaker (2024). *Ultimaker 2+ Connect Manual de instalación y uso*. [Consulta en línea]. <https://um-support-files.ultimaker.com/manuals/user-manual/UM2%2BConnect/ES%20-%20Ultimaker%20%20%20Connect%20-%20User%20manual.pdf>.
- Wondershar (2024). *Usos de la realidad virtual en la ingeniería y negocios*. [Consulta en línea]. <https://filmora.wondershare.es/virtual-reality/virtual-reality-use-in-engineering.html>.



# COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"  
San Fandila, Pedro Escobedo  
C.P. 76703  
Querétaro, México  
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>