

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA SEDE DE  
VIÑA DEL MAR - JOSÉ MIGUEL CARRERA**

**DISEÑO SIMULADOR DE OLEAJE**

Proyecto de título para optar al Título de  
INGENIERÍA EN FABRICACIÓN Y DISEÑO  
INDUSTRIAL con Licenciatura en Ingeniería en  
Fabricación y Diseño Industrial.

Alumno:

Benjamín Andrés Pavez Miranda

Profesor Guía:

Mario Salinas

Correferente:

Patricio Catalán

**2025**



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

Título del trabajo: **Diseño Simulador de Oleaje STEM**

Nombre del candidato(a): **Benjamín Andrés Pavez Miranda**

Carrera / Grado: **Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial**

Campus: **Universidad Técnica Federico Santa María** Departamento: **Diseño y Manufactura**

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mario Salinas P. en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

---

---

---

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 12/03/2026

Firma: 

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 12.03.2026

Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# RESUMEN

En el ámbito de la ingeniería y la educación STEM, las herramientas que fortalecen el aprendizaje a través de métodos experimentales y experiencias prácticas resultan fundamentales. La Universidad Técnica Federico Santa María promueve el desarrollo de dispositivos innovadores orientados al análisis de fenómenos físicos y ambientales en contextos educativos y de investigación. Actualmente, los estudios sobre el comportamiento del oleaje, la hidrodinámica y el transporte de sedimentos dependen en gran medida de simulaciones digitales, las cuales, al carecer de validación experimental u observación tangible, limitan la comprensión científica integral. Este proyecto tiene como objetivo diseñar y construir un simulador físico de oleaje que permita analizar el comportamiento del agua y su interacción con sedimentos y estructuras. El dispositivo emplea ensayos experimentales como apoyo a la enseñanza y a la validación de modelos teóricos en las ciencias de la ingeniería y del medioambiente. La investigación se centró en determinar si es posible replicar condiciones reales de oleaje mediante un sistema físico basado en métodos experimentales. La metodología adoptó un ciclo iterativo de diseño, prueba y mejora, enfocado en cuantificar las dimensiones del estanque y las propiedades de los fluidos. El dispositivo será modelado mediante software CAD, y su construcción se llevará a cabo utilizando materiales y componentes seleccionados cuidadosamente para garantizar su eficiencia operativa. Las pruebas experimentales permiten observar la formación de oleaje y el comportamiento de los sedimentos bajo condiciones controladas, y los resultados demostrarán que un mecanismo oscilatorio es capaz de reproducir eficientemente patrones básicos de oleaje. A pesar de desafíos estructurales y de sellado, la construcción de un prototipo resulta fundamental para reproducir patrones básicos de oleaje y demostrar su utilidad en entornos académicos, especialmente en aulas de Educación Superior. Se contempla incorporar un sistema de control automatizado del oleaje y sensores de medición en tiempo real para mejorar la precisión de los resultados. Asimismo, se proyecta que la capacidad de simular eventos extremos como tsunamis amplíe significativamente su potencial educativo y de investigación.

**Palabras clave:** Ingeniería, experimental, comportamiento, hidrodinámica, sedimentos, ensayo.

# INDICE

INTRODUCCIÓN .....	1
1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO .....	2
1.1 ANTECEDENTES GENERAL DEL PRODUCTO A DESARROLLAR .....	2
1.2 INFORMACIÓN GENERAL DEL PRODUCTO A DESARROLLAR.....	2
1.3 REQUERIMIENTO DEL DISPOSITIVO.....	2
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OPORTUNIDADES, OBJETIVOS Y ALCANCE.....	2
2.1 PROBLEMÁTICA .....	2
2.2 OPORTUNIDAD DE INNOVACIÓN.....	3
2.3 OBJETIVO DEL PROYECTO .....	4
2.4 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	5
3. EXPLORACIÓN CONCEPTUAL Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO .....	6
3.1 PRINCIPIOS FÍSICOS ASOCIADOS AL OLEAJE .....	6
3.2 PUNTO DE PARTIDA PARA EL ANÁLISIS DE DISEÑO CONCEPTUAL .....	7
3.3 EVALUACIÓN DE OPCIONES.....	9
3.4 EXPLORACIÓN ALTERNATIVAS CONCEPTUALES .....	10
3.5 ITERACIONES .....	14
4. DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y SUBSISTEMAS .....	19
4.1 IDENTIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS .....	19
4.2 REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DEL SISTEMA.....	20
4.3 SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO .....	22
5. INGENIERIA DE DETALLE Y PROTOTIPADO .....	24
5.1 DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE EMPLEADA .....	24
5.2 MARCO TEÓRICO – ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE ESFUERZOS (CAE) .....	24
5.3 PLANOS NECESARIOS .....	29
5.4 MODELACIÓN 3D .....	31
5.5 ANÁLISIS FUNCIONAL Y SISTÉMICO .....	33
5.6 CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO FÍSICO .....	35
6. COSTO DE LA PROPUESTA.....	37
7. CONCLUSIONES .....	38
AGRADECIMIENTOS.....	39

# INTRODUCCIÓN

En el mundo de la mecánica de fluidos y las ciencias aplicadas, fenómenos físicos como el oleaje o el transporte de sedimentos estuarios representan desafíos importantes para su entendimiento, especialmente en etapas formativas tempranas. Estos procesos al ser dinámicos, complejos y en muchos casos invisibles a simple vista, no son fáciles de explicar utilizando únicamente recursos teóricos, pues su comportamiento es impredecible.

Actualmente, en el contexto educativo y particularmente en la formación en ingeniería y en metodologías STEM, la experimentación práctica cumple un rol clave en la consolidación del aprendizaje. La posibilidad de observar directamente el comportamiento de un sistema físico, manipular variables y analizar sus efectos permite fortalecer la comprensión conceptual y desarrollar habilidades de análisis crítico. No obstante, el acceso a equipamiento experimental especializado para el estudio del oleaje suele ser limitado, ya sea por escalas de operación o restricciones de infraestructura.

A partir de esta problemática, surge la necesidad de explorar el diseño de un dispositivo experimental que permita representar fenómenos de oleaje en un entorno controlado, accesible y replicable, orientado tanto al análisis experimental como al apoyo en procesos de enseñanza. Este proyecto se enmarca en dicha necesidad, abordando el desafío desde una perspectiva de diseño e ingeniería aplicada, poniendo énfasis en el proceso de desarrollo más que en la solución final en sí misma.

El presente estudio plantea el diseño conceptual de un simulador de oleaje con fines didácticos, orientado a mejorar la enseñanza de la hidrodinámica desde el enfoque educativo STEM (Science, Technology, Engineering and Mathematics). Este proyecto busca vincular el conocimiento teórico con la práctica experimental, promoviendo un aprendizaje más significativo, accesible y replicable en diferentes contextos académicos.

# **1. DESCRIPCION DEL PROYECTO**

## **1.1 ANTECEDENTES GENERAL DEL PRODUCTO A DESARROLLAR**

La comprensión de fenómenos físicos como la propagación del oleaje, el comportamiento oscilatorio del oleaje en canales y el transporte de sedimentos representa un desafío en la enseñanza tradicional de la ingeniería. Muchos de estos procesos son complejos, abstractos y difíciles de representar mediante herramientas exclusivamente teóricas o visuales.

El enfoque STEM ha impulsado la necesidad de herramientas experimentales que permitan observar de forma concreta estos fenómenos, facilitando un aprendizaje activo. En esta línea, se propone desarrollar un dispositivo conceptual de laboratorio que permita representar fenómenos hidrodinámicos en condiciones controladas y seguras, promoviendo la integración de la teoría con la experimentación.

## **1.2. INFORMACIÓN GENERAL DEL PRODUCTO A DESARROLLAR**

El producto a desarrollar consiste en diseñar un dispositivo que simule el oleaje, con enfoque didáctico, que facilite la visualización de distintos tipos de ondas, frecuencias e interacciones con materiales sedimentarios. Esta herramienta se orienta a la experimentación en contextos educativos, permitiendo representar de forma accesible los fenómenos observables en entornos marinos.

## **1.3. REQUERIMIENTO DEL DISPOSITIVO**

El requerimiento principal es proporcionar una herramienta pedagógica útil para docentes y estudiantes de áreas como mecánica de fluidos, hidráulica, ingeniería costera o similares. Esta debe permitir el desarrollo de experimentos que simulen condiciones marinas, facilitando la enseñanza de principios complejos mediante experiencias tangibles y controladas.

# **2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OPORTUNIDADES, OBJETIVOS Y ALCANCE**

## **2.1. PROBLEMÁTICA**

El análisis del oleaje y su interacción con el entorno presenta una alta complejidad debido a la amplia gama de variables físicas involucradas: amplitud, frecuencia, velocidad del movimiento y características del medio de propagación. En el ámbito académico, estas variables suelen analizarse principalmente mediante simulaciones digitales, sin el respaldo de ensayos o validaciones físicas, lo que dificulta la visualización directa de los fenómenos y la comprensión de su comportamiento.

La ausencia de dispositivos experimentales didácticos que permitan reproducir estos fenómenos a escala reducida limita las oportunidades de aprendizaje práctico y de validación experimental. Por ello, se identifica la necesidad de desarrollar un sistema que posibilite la representación controlada del oleaje, permitiendo observar su comportamiento y analizar su interacción con sedimentos y estructuras.

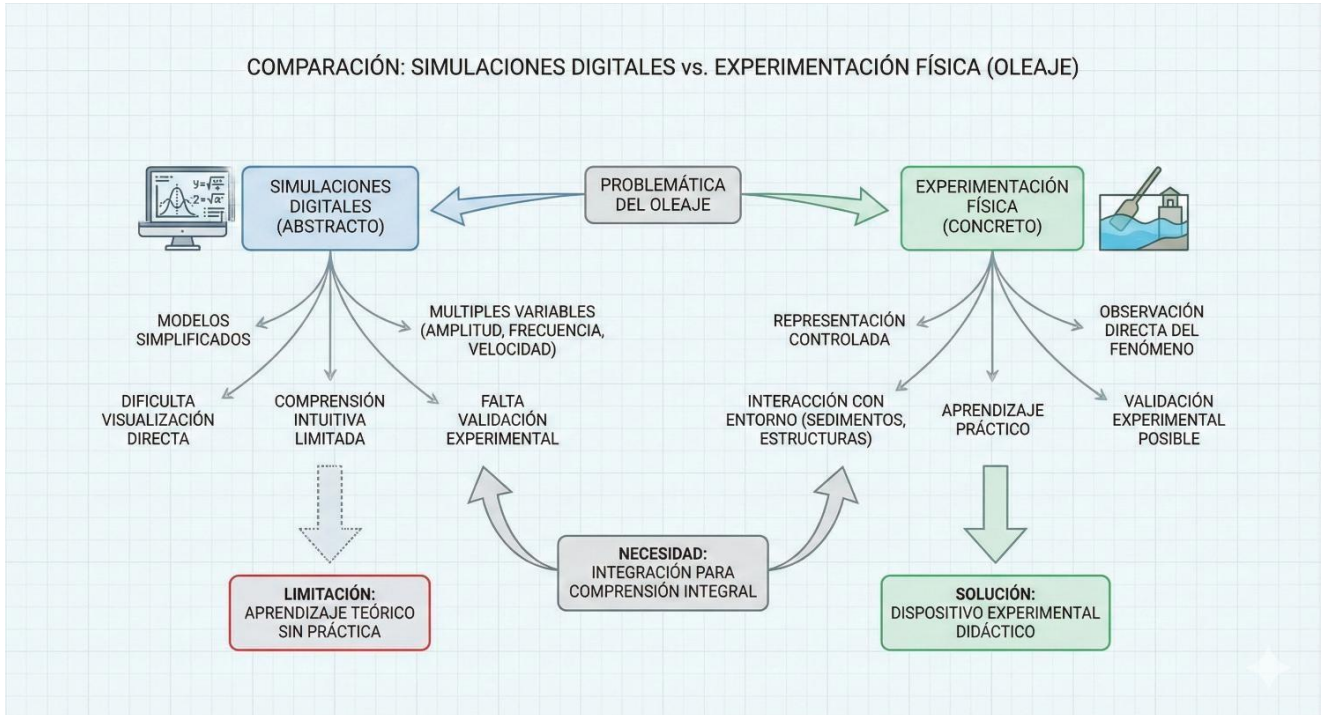
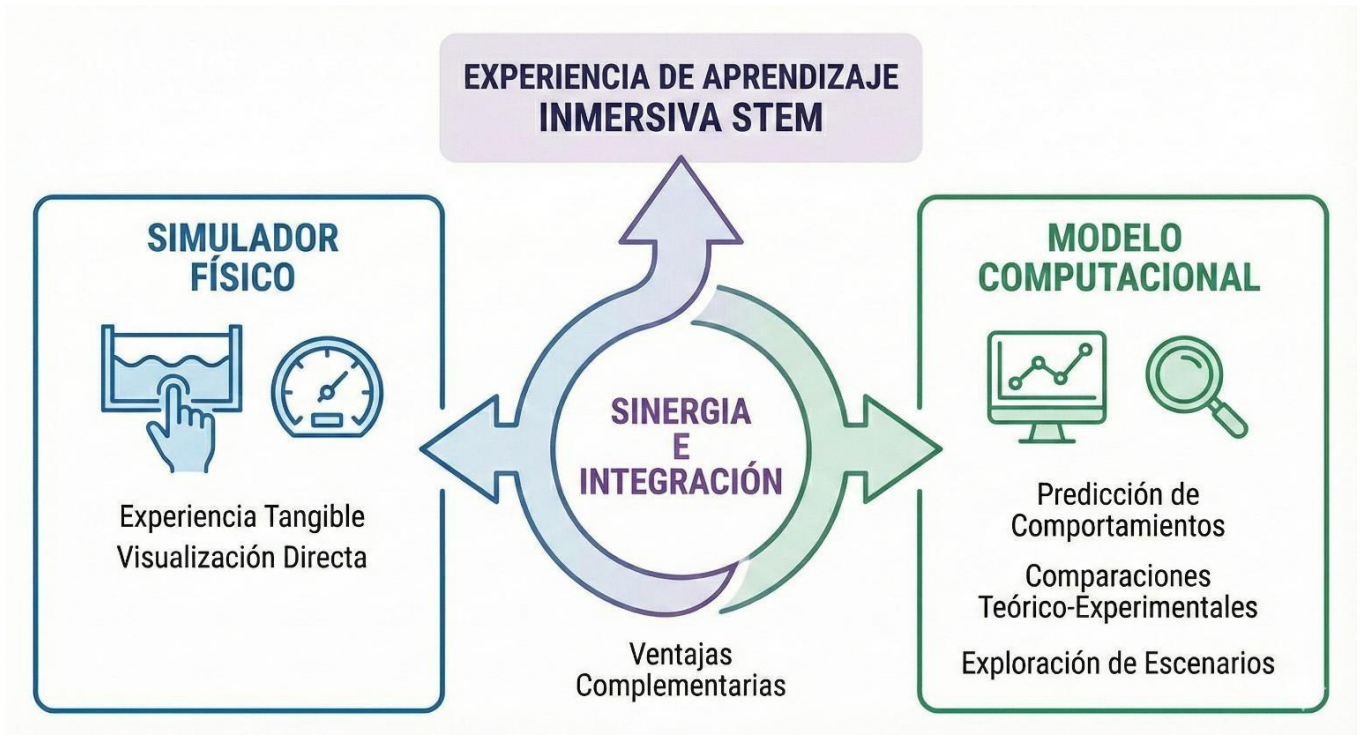


Figura 1. Diagrama comparación Simulaciones.

## 2.2. OPORTUNIDAD DE INNOVACIÓN

El desarrollo de tecnologías de simulación computacional y visualización interactiva abre nuevas posibilidades para crear experiencias de aprendizaje inmersivas que antes eran impracticables. En la actualidad, existe una convergencia de tecnologías emergentes que podría revolucionar la forma en que se abordan los desafíos educativos en las disciplinas STEM, particularmente en hidrodinámica e ingeniería costera.

Se presenta la oportunidad de combinar simuladores físicos con modelos computacionales para crear experiencias de aprendizaje que aprovechen las fortalezas de ambos enfoques. Mientras un simulador físico proporciona la experiencia tangible y la visualización directa de los fenómenos, los modelos computacionales permiten predecir comportamientos, realizar comparaciones teórico-experimentales y explorar escenarios que serían peligrosos o impracticables de realizar físicamente.



*Figura 2. Diagrama Sinergia e Integración.*

La convergencia de estas oportunidades tecnológicas, educativas y de mercado sugiere un momento favorable para el desarrollo de innovaciones en simulación educativa de fenómenos hidrodinámicos. La disponibilidad de tecnologías accesibles, combinada con la necesidad identificada de herramientas educativas efectivas, crea un escenario donde proyectos como el simulador de oleaje propuesto podrían tener un impacto significativo en la calidad y accesibilidad de la educación en mecánica de fluidos.

## 2.3. OBJETIVO DEL PROYECTO

### Objetivo general:

Diseñar y validar conceptualmente un dispositivo experimental que permita representar fenómenos de oleaje en un entorno controlado, orientado al análisis experimental y al apoyo en procesos de enseñanza en ingeniería.

### Objetivos específicos:

- Analizar los principios físicos asociados a la generación y propagación del oleaje.
- Explorar distintas alternativas conceptuales para la generación de movimiento oscilatorio controlado.
- Identificar los requerimientos funcionales y estructurales de un sistema experimental de oleaje.
- Desarrollar una propuesta de diseño mediante un proceso iterativo de análisis y validación.
- Evaluar la integridad estructural del sistema mediante análisis computacional.
- Documentar el proceso de diseño como parte fundamental del proyecto.

## 2.4. ALCANCES Y LIMITACIONES

El presente proyecto no busca reproducir fenómenos oceánicos a escala real ni sustituir modelos avanzados de simulación hidrodinámica. Su alcance se limita al diseño y validación conceptual de un dispositivo experimental a escala reducida, enfocado en la representación cualitativa y controlada del oleaje. Los análisis estructurales realizados se consideran representativos de condiciones normales de operación y no contemplan escenarios extremos.

Categoría	Dentro del Alcance	Fuera del Alcance
<b>Naturaleza del Proyecto</b>	<b>Diseño y validación conceptual</b> de un dispositivo experimental. El entregable principal es la propuesta de diseño y su documentación.	<b>Construcción masiva o comercialización</b> del producto final. No se contempla la manufactura industrial en esta etapa.
<b>Escala y Dimensión</b>	<b>Escala reducida (Laboratorio).</b> Diseñado para ser un dispositivo manejable en entornos educativos.	<b>Escala Real.</b> No se busca reproducir las dimensiones ni la magnitud de fenómenos oceánicos reales.
<b>Propósito y Uso</b>	<b>Enfoque Didáctico/Pedagógico.</b> Orientado a la visualización, enseñanza y comprensión intuitiva de fenómenos (aprendizaje activo).	<b>Investigación Científica Avanzada.</b> No pretende sustituir modelos de simulación hidrodinámica de alta precisión para ingeniería de detalle.
<b>Funcionalidad</b>	<b>Representación Cualitativa.</b> Visualización de tipos de ondas, frecuencias, propagación e interacción con sedimentos en entorno controlado.	<b>Predicción Cuantitativa Exacta.</b> No está diseñado para obtener datos de precisión milimétrica que reemplacen herramientas teóricas complejas.
<b>Análisis Técnico</b>	<b>Integridad Estructural en Operación Normal.</b> Evaluación computacional de la estructura bajo condiciones de uso estándar y controladas.	<b>Escenarios Extremos.</b> No se contemplan análisis de resistencia bajo condiciones catastróficas, cargas excesivas o mal uso fuera de lo normal.
<b>Integración</b>	<b>Física y Tangible.</b> Creación de un sistema físico para generar movimiento oscilatorio mecánico.	<b>Exclusivamente Virtual.</b> El proyecto no es solo un software; requiere el diseño de componentes físicos (aunque se apoye en validación digital).
<b>Público Objetivo</b>	<b>Ámbito Académico.</b> Docentes y estudiantes de ingeniería (mecánica de fluidos, hidráulica, costas).	<b>Uso Industrial Pesado.</b> No está orientado a operar en entornos industriales agresivos o fuera del aula/laboratorio.

*Figura 3. Tabla de Alcance del Proyecto: Dispositivo Didáctico de Simulación de Oleaje.*

### 3. EXPLORACIÓN CONCEPTUAL Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA DE DISEÑO

#### 3.1. PRINCIPIOS FÍSICOS ASOCIADOS AL OLAJE

El oleaje marino se origina principalmente por la acción del viento sobre la superficie del agua: al desplazarse, el viento transfiere energía al agua mediante fricción, generando perturbaciones que se propagan en forma de ondas superficiales. Si bien este proyecto no busca replicar ese fenómeno de manera natural, comprender su origen resulta valioso, ya que permite identificar las variables relevantes al momento de recrear condiciones experimentales y recolectar datos.

En términos físicos, el oleaje puede describirse como un fenómeno dinámico caracterizado por el movimiento oscilatorio del agua, cuya forma y energía están determinadas por variables como la amplitud del movimiento, su frecuencia y la velocidad de generación. Variaciones en estos parámetros producen diferencias notorias en el tamaño y comportamiento de las olas, aspecto especialmente relevante a la hora de representarlas en un entorno controlado.

Desde un punto de vista conceptual, movimientos de baja amplitud y alta frecuencia tienden a producir olas pequeñas con menor energía, mientras que movimientos de mayor amplitud y menor frecuencia generan olas más desarrolladas y energéticas. Comprender esta relación es fundamental para establecer los principios de operación de un sistema experimental de oleaje.

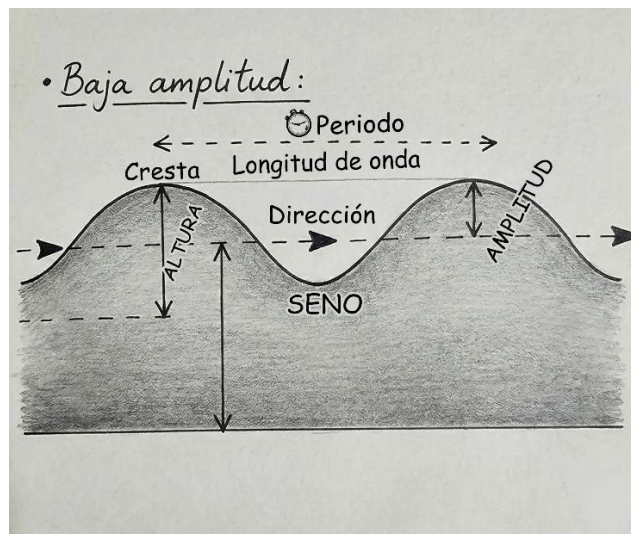


Figura 4. Sketch conceptual, Baja amplitud.

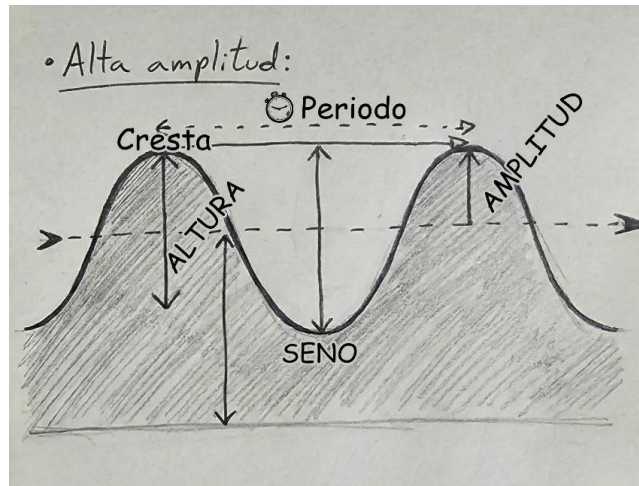


Figura 5. Sketch conceptual, Alta amplitud.

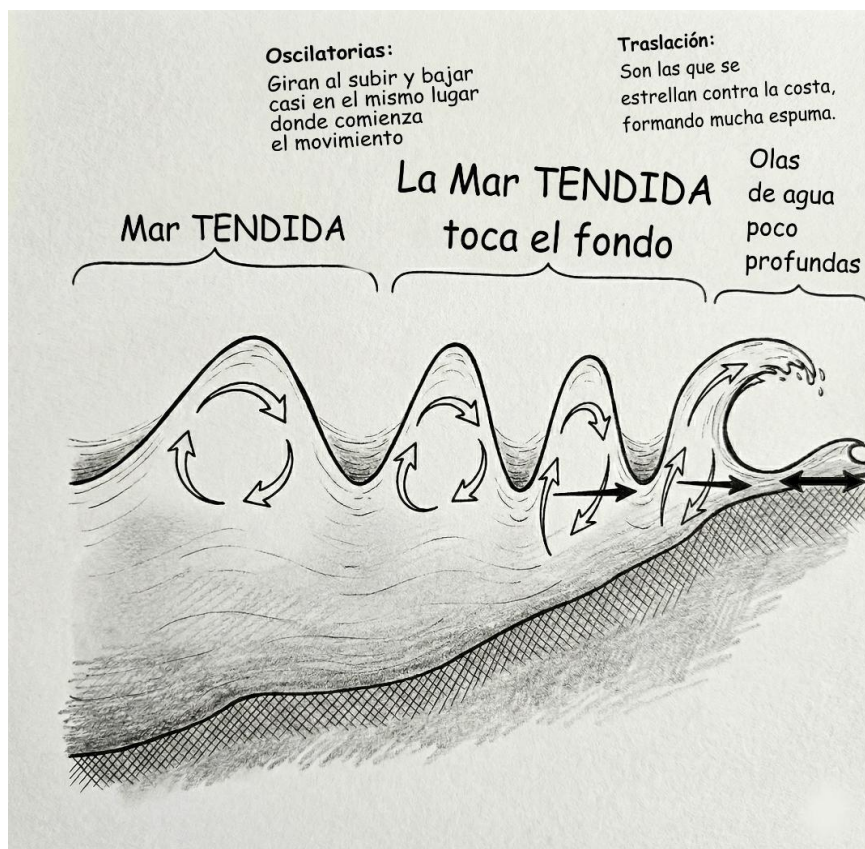


Figura 6. Tipos de oleajes.

### 3.2. PUNTO DE PARTIDA PARA EL ANÁLISIS DE DISEÑO CONCEPTUAL

Como antecedente relevante, se tomó como referencia un modelo experimental previamente desarrollado en el ámbito académico de la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María, el cual sirvió como punto de partida para el presente proyecto. Este referente permitió identificar ventajas, limitaciones y oportunidades de mejora, aportando una base sobre la cual estructurar el proceso de diseño.



*Figura 7, 8 y 9. Simulador de oleaje original.*

Dentro de las limitaciones identificadas durante el análisis del producto referente, se observó que la arquitectura del tanque presenta una estabilidad insuficiente. Esta condición generaba un nivel de inseguridad estructural, ya que cualquier interferencia externa o vibración puede afectar el comportamiento del sistema y, en consecuencia, alterar la veracidad de la simulación del oleaje. Por esta razón, se consideró necesario replantear el diseño estructural del tanque con el fin de mejorar su rigidez, estabilidad y confiabilidad durante la operación.

Asimismo, se identificó la necesidad de desarrollar una propuesta con un lenguaje formal y una construcción más robusta, que permitiera transmitir mayor confianza al usuario. Un dispositivo destinado a fines experimentales y académicos requiere no solo funcionalidad técnica, sino también una percepción de solidez y profesionalismo que respalde su uso en entornos de investigación o enseñanza.

Por otra parte, el sistema utilizado para la generación del oleaje en la propuesta inicial presentaba limitaciones operativas. El mecanismo no permitía un control práctico ni suficientemente eficiente del movimiento necesario para reproducir distintos tipos de olas, lo que restringía las posibilidades de experimentación y dificultaba la realización de pruebas bajo diferentes condiciones de simulación. A causa de esto, se hizo evidente la necesidad de explorar otras soluciones mecánicas que permitan generar el oleaje de forma más precisa, controlable y reproducible.

En este contexto, el análisis del referente previo no fue abordado como una solución definitiva, sino como una contribución importante de aprendizaje que nos permite comprender el estado inicial del desarrollo del sistema. Este estudio sirvió como base para identificar oportunidades de mejora y orientar el diseño de una nueva propuesta que respondiera de manera más efectiva a los objetivos planteados para el simulador de oleaje.

### **3.3. EVALUACIÓN DE OPCIONES**

Durante la etapa de iteraciones se inició un proceso de prueba y error de distintas alternativas de diseño con el fin de optimizar el sistema de generación de oleaje y el comportamiento estructural del tanque. En esta fase se buscó identificar las configuraciones más adecuadas que nos permitan producir oleaje de forma controlada, y al mismo tiempo que se logre garantizar la correcta contención del fluido dentro del contenedor del simulador.

Por otra parte, se debía tener en cuenta la capacidad estructural del tanque para resistir los fenómenos generados por el movimiento del agua, considerando posibles deformaciones, vibraciones o esfuerzos causados por el oleaje. También se analizaron aspectos relacionados con la resistencia de los materiales frente a la exposición continua de fluidos, principalmente el agua, con el objetivo de prevenir deterioros a través del tiempo y garantizar una estabilidad operativa del sistema.

Como parte de las iteraciones de diseño, se optó por utilizar policarbonato de 5mm de espesor en la construcción de las murallas del tanque. Este material fue seleccionado debido a sus propiedades mecánicas favorables, entre las que destacan su alta resistencia al impacto, su ductilidad y su capacidad de deformación sin fractura. A diferencia de materiales más frágiles, el policarbonato presenta una flexibilidad controlada que permite trabajar el material con mayor seguridad durante los procesos de manufactura, reduciendo el riesgo de fisuras o roturas durante el dimensionamiento mediante maquinaria CNC.

Asimismo, el policarbonato permite realizar con precisión las perforaciones necesarias para el ensamblaje estructural del tanque. Esto facilita la integración del sistema mediante uniones mecánicas compuestas por pernos, tuercas y golillas, las cuales permiten fijar las murallas del tanque a los perfiles estructurales encargados de soportar el conjunto.

Para la base y los pilares estructurales se seleccionaron perfiles de aluminio tipo “C” de 75mm x 25mm. Esta elección se debe a que el aluminio ofrece una combinación adecuada entre bajo peso y resistencia mecánica, lo que facilita el transporte, montaje y manipulación del sistema. Además, presenta una alta resistencia a la corrosión en ambientes húmedos, principalmente a la presencia del agua como elemento fundamental del proyecto. Estas propiedades permiten que la estructura soporte de manera adecuada el peso del fluido, las murallas de policarbonato y los distintos componentes asociados al sistema.

Finalmente, para resolver el problema asociado a posibles filtraciones entre las uniones estructurales del tanque, se optó por incorporar listones de goma de aproximadamente 3 mm de espesor entre las murallas de policarbonato y los perfiles estructurales de aluminio. Este material fue seleccionado debido a sus propiedades de elasticidad y capacidad de compresión, las cuales permiten que el material se deforme ligeramente al momento de ser comprimido durante el ensamblaje del sistema.

Gracias a esta característica, la goma actúa como un elemento de sellado que se adapta a las pequeñas irregularidades presentes en las superficies de contacto entre los distintos materiales. Al comprimirse entre el policarbonato y el aluminio, el material cubre los microespacios que podrían existir, reduciendo la posibilidad de que el agua se filtre.

Además, el caucho presenta una buena resistencia a la humedad y al contacto prolongado con agua, lo que lo convierte en una solución adecuada para aplicaciones donde se requiere estanqueidad. Su flexibilidad también permite absorber pequeñas deformaciones estructurales producidas por las cargas hidrostáticas generadas durante el funcionamiento del simulador, manteniendo el sellado incluso cuando el sistema experimenta vibraciones o variaciones en la presión del fluido.

De esta manera, la incorporación de estos listones de goma no solo contribuye a mejorar la hermeticidad del tanque, sino que también aumenta la confiabilidad del sistema durante la operación experimental, evitando pérdidas de agua y protegiendo los componentes estructurales del simulador.



*Figura 10. Prototipo experimental y ensayo preliminar de materiales.*

### **3.4. EXPLORACIÓN ALTERNATIVAS CONCEPTUALES**

Para la generación del oleaje se decidió mantener el sistema motriz del diseño original, el cual consiste en un actuador lineal telescópico con una carrera ajustable entre 3 y 15 cm. Esta alternativa permite regular la frecuencia del movimiento oscilatorio, lo que a su vez posibilita generar oleaje a distintas velocidades y condiciones de operación.



Figura 11. Actuador lineal.

Ahora bien, en el mundo de la simulación de oleaje encontramos distintas formas para realizar el ejercicio. Entre ellos los más populares son:

- **Generación con cuerpo vertical (plunger-type):**  
En vez de empujar lateralmente, un cuerpo rígido sube y baja, desplazando el volumen de agua para formar olas. Se usa bastante en ciertos tanques y tiene ventajas particulares. Sin embargo, esta opción resulta ser más conveniente cuando el espacio o la mecánica lateral es un problema, o quieres explorar configuraciones específicas (aunque no siempre es la más simple de fabricar), además de no adecuarse al material del que disponíamos, es decir, del actuador lineal.

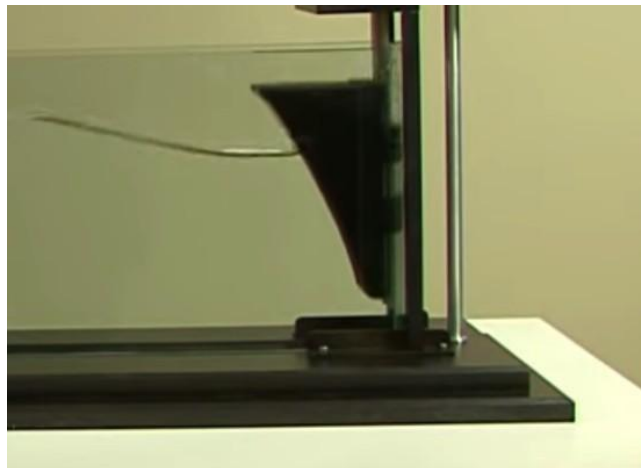


Figura 12, 13. Simulador con cuerpo vertical (fuente You Tube, Clive3854).

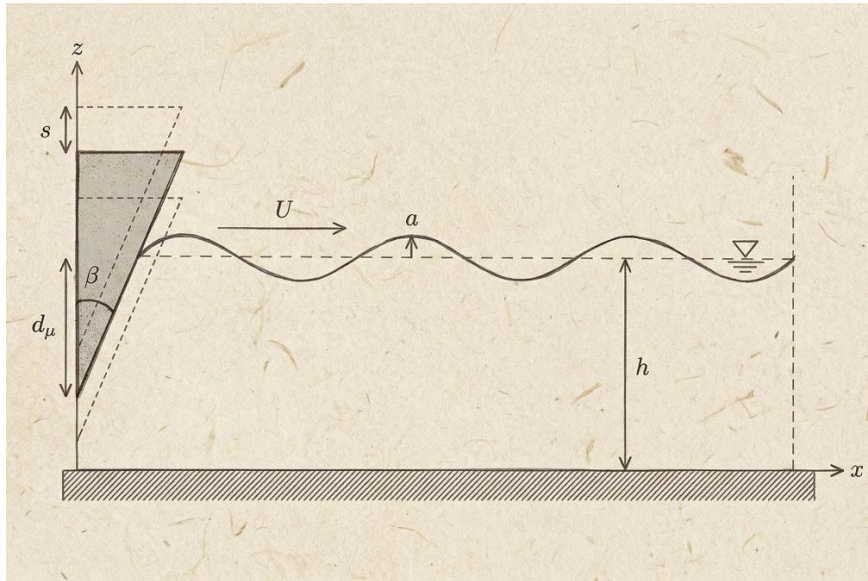


Figura 14. Diagrama comportamiento de olas con sistema "plunger-type".

Para facilitar la interpretación del diagrama, a continuación, se describe el significado de cada una de las letras que lo componen.

**Las Coordenadas (cuadrícula de referencia):**

- **x:** Indica la dirección horizontal a lo largo del canal.
- **z:** Indica la dirección vertical (altura o profundidad).

**El Generador de Olas (la pieza gris de la izquierda):**

- **s:** Es el movimiento (amplitud de carrera) hacia arriba y abajo de la cuña para empujar el agua.
- **d<sub>μ</sub>:** Es la profundidad media a la que está hundido el cuerpo en el agua.
- **β:** Es el ángulo de la punta del cuerpo.

**Las Olas y el Agua (el resultado):**

- **h:** Es la profundidad total del agua en el canal (desde el fondo hasta la superficie en calma).
- **a:** Es la amplitud de la ola (la altura desde el nivel del agua en calma hasta el punto más alto).
- **U:** Es la velocidad a la que fluye el agua en general por el canal (una corriente constante).

• **Generación con paleta angular:**

El simulador de oleaje utiliza un sistema de paleta, la cual se encuentra instalada en uno de los extremos del canal y conectada a la estructura mediante un pivote o eje de giro. Este mecanismo permite que la paleta realice un movimiento oscilatorio angular dentro del agua.

El movimiento de la paleta es generado por un actuador, el cual transmite la fuerza necesaria para que la paleta se desplace periódicamente hacia adelante y hacia atrás. Este movimiento provoca el desplazamiento del agua adyacente, generando perturbaciones en la superficie libre que se propagan a lo largo del canal en forma de olas.

De esta manera, el sistema permite reproducir oleaje de forma controlada dentro del tanque experimental, facilitando el análisis del comportamiento del agua y su interacción con el fondo del canal.

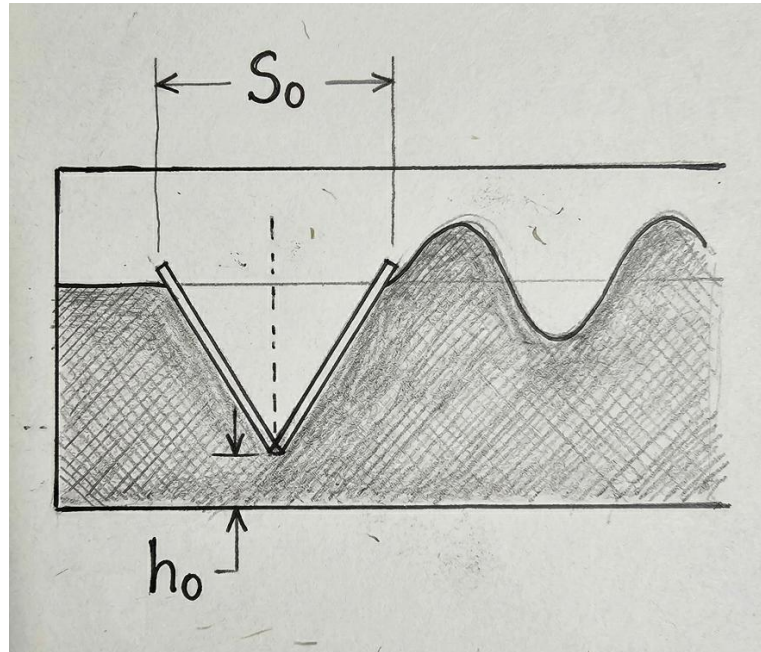


Figura 15. Diagrama comportamiento de olas con sistema "Paleta angular".

Tras analizar estas opciones, se seleccionó el sistema de paleta angular como la opción más adecuada para el simulador. Esta decisión se fundamenta en criterios técnicos, funcionales y constructivos que permiten asegurar un funcionamiento eficiente del dispositivo.

En primer lugar, este sistema permite generar oleaje de forma controlada mediante un movimiento oscilatorio simple, lo que facilita la regulación de parámetros fundamentales del fenómeno, como la amplitud y la frecuencia de las olas. Esto resulta especialmente relevante en un entorno experimental, donde es necesario reproducir condiciones de oleaje de manera repetible y controlada.

En segundo lugar, la configuración de paleta angular presenta una integración mecánica adecuada con el sistema de accionamiento del simulador, ya que el movimiento del actuador puede transmitirse fácilmente hacia la paleta mediante un mecanismo simple. Esto reduce la complejidad del sistema mecánico y disminuye la probabilidad de fallos asociados a mecanismos más complejos.

Otro criterio relevante corresponde a la eficiencia en la transferencia de energía al fluido. El movimiento angular de la paleta desplaza directamente el volumen de agua cercano al extremo del canal, generando perturbaciones en la superficie libre que se propagan a lo largo del tanque en forma de ondas superficiales.

A partir de esta alternativa se decidió adoptar este sistema para la generación de oleaje. Sin embargo, fue necesario resolver la forma de conectar la paleta con el pistón del actuador lineal. El principal desafío consistía en transformar el movimiento lineal del pistón en el movimiento oscilatorio de pivote requerido por la paleta generadora de olas.

Esta necesidad dio origen al proceso de iteración de diseño, cuyo objetivo fue desarrollar un mecanismo capaz de transmitir de manera eficiente el movimiento del actuador hacia la paleta.

### 3.5. ITERACIONES

En la siguiente sección se presentan las distintas propuestas evaluadas y el análisis realizado para determinar la solución más adecuada para el diseño.

- **Primera Iteración:**

En la primera iteración de diseño se propuso desarrollar un mecanismo transmisor articulado fabricado mediante impresión 3D. El objetivo de este componente era transferir el movimiento lineal del actuador hacia la paleta sin generar deformaciones ni pérdidas significativas en la transmisión del movimiento. Sin embargo, durante las pruebas se observó que este mecanismo generaba interferencias en el sistema, lo que terminaba dificultando el desplazamiento del actuador y afectando negativamente el funcionamiento del conjunto.

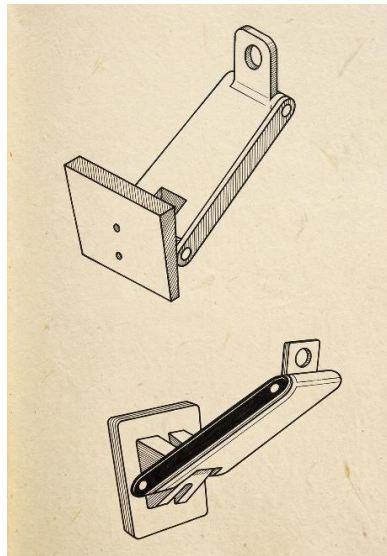
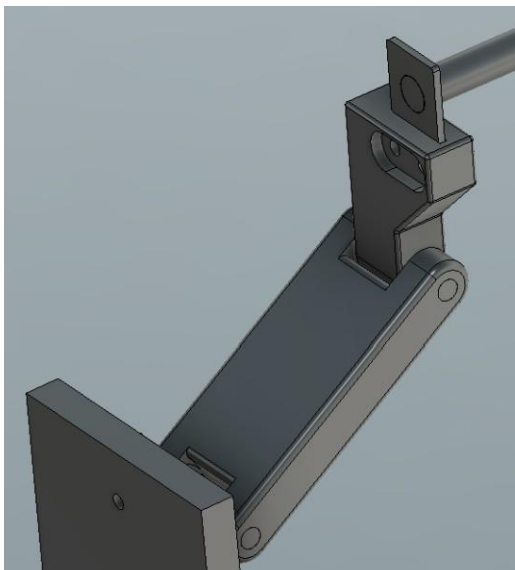


Figura 16. Sketch Sistema Transmisor (Primera iteración).



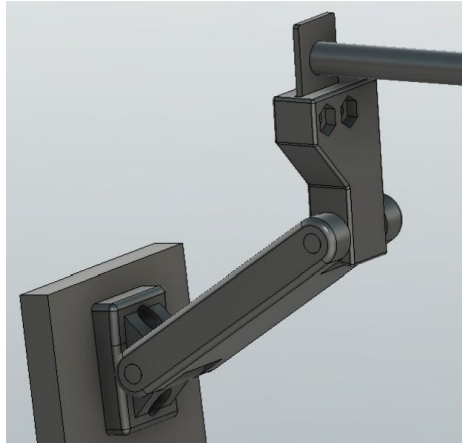


Figura 17, 18, 19. Modelado 3D Sistema Transmisor (Primera iteración).



Figura 20. Prototipado Sistema Transmisor (Primera iteración).

De esta primera propuesta se identificaron limitaciones en el mecanismo diseñado para transmitir el movimiento del pistón del motorreductor hacia la paleta generadora de oleaje. Como ya se mencionó, el sistema inicial utilizaba un brazo rígido fabricado en PLA con articulaciones, lo cual generaba dos inconvenientes principales:

- **Amortiguación del oleaje:** las articulaciones absorbían parte del movimiento, reduciendo la fuerza transmitida a la paleta y alterando la regularidad de las iteraciones.
- **Movimiento no lineal:** debido a la rigidez del brazo, la transmisión del pistón se veía interferida, generando un desplazamiento en arco en lugar de un movimiento longitudinal, lo que disminuía la eficiencia en la generación de olas.

- **Segunda iteración:**

Rediseño del sistema fabricado en TPU mediante impresión 3D. Este polímero flexible permite una transmisión más directa y eficiente del movimiento, eliminando la amortiguación indeseada y optimizando el desempeño del mecanismo.



Figura 21. Prototipado Sistema Transmisor (Segunda iteración).

Aunque en esta iteración ya no se presentaban interferencias mecánicas como en la primera propuesta, el mecanismo no lograba transmitir el movimiento de manera eficiente hacia la paleta, lo que resultaba en la generación de olas de baja amplitud y poco adecuadas para su análisis experimental.

- **Tercera iteración:**

La tercera propuesta implicó un cambio significativo en el diseño respecto a las iteraciones anteriores. No obstante, se mantuvo la decisión de utilizar el mismo material, TPU, debido a sus propiedades de flexibilidad y resistencia. La propuesta se centró en incorporar un mecanismo que permitiera variar la altura del oleaje en tres niveles distintos: alto, medio y bajo, con el objetivo de ampliar las posibilidades de experimentación dentro del simulador.

Asimismo, se planteó que el sistema estuviera compuesto por dos elementos principales: una pieza central fabricada en TPU, encargada de transmitir el movimiento hacia la paleta, y un segundo componente fabricado en PLA, cuya función sería fijar y ajustar el conjunto, evitando desplazamientos indeseados de la pieza y de la paleta durante su operación.

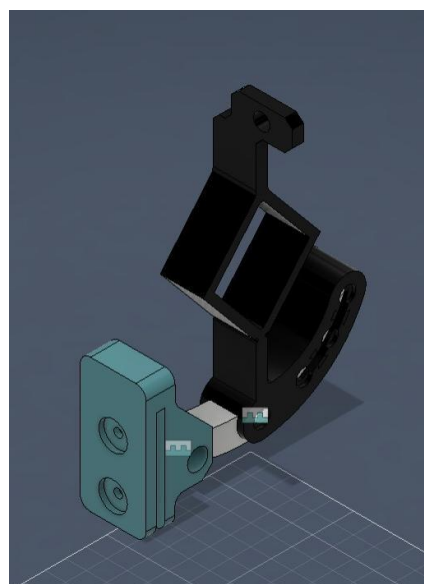
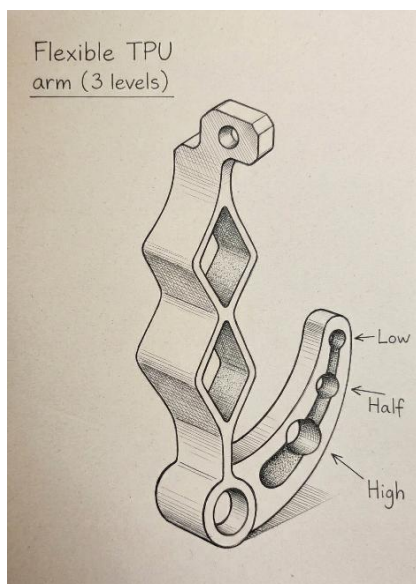


Figura 22 y 23. Sketch y modelado 3D Sistema Transmisor (Tercera iteración).

Durante las pruebas se observó que, aunque el sistema permitía ajustar la posición del mecanismo en distintos niveles, la transmisión del movimiento desde el actuador hacia la paleta no se realizaba de manera eficiente. La flexibilidad del material TPU, que inicialmente se consideró una ventaja para absorber esfuerzos, generaba deformaciones en la pieza durante el movimiento oscilatorio. Esto provocaba pérdidas en la transmisión del movimiento y una respuesta irregular en la paleta.

Como consecuencia, el sistema no lograba producir un oleaje suficientemente estable ni repetible para fines experimentales. Debido a estas limitaciones en la rigidez y eficiencia del mecanismo, se determinó que esta alternativa no cumplía adecuadamente con los requerimientos funcionales del simulador, por lo que fue descartada y se procedió a explorar nuevas soluciones de diseño.

Finalmente, se identificó otro tipo de sistema para la generación de oleaje que podría resultar adecuado para el desarrollo del simulador. Esta alternativa fue considerada relevante, ya que presentaba características que podrían contribuir significativamente a mejorar el desempeño y la eficacia del proceso de simulación.

- **Generación con paleta axial:**

Esta propuesta corresponde a la solución estándar utilizada en tanques de ensayo para la generación de oleaje. Además, se adapta perfectamente al actuador lineal empleado en el sistema, el cual opera mediante un mecanismo tipo pistón.

El concepto consiste en una placa vertical rígida ubicada en uno de los extremos del canal, la cual se desplaza horizontalmente hacia adelante y hacia atrás. Este movimiento permite empujar el volumen de agua situado frente a la paleta, generando perturbaciones que se propagan a lo largo del canal en forma de ondas superficiales.

Este sistema, conocido como paleta axial o generador de oleaje tipo pistón, produce el oleaje mediante un movimiento oscilatorio controlado de la placa. Gracias a este principio de funcionamiento, es posible generar olas regulares y controlables, lo que lo convierte en una alternativa directa y eficiente para la simulación de oleaje en entornos experimentales.

Ahora bien, esta propuesta puede entenderse principalmente como un complemento al sistema previamente desarrollado. Si bien esta alternativa no llegó a materializarse en un prototipo físico durante la etapa de desarrollo, la teoría sugiere que la incorporación de un componente con perfil aerodinámico, similar al de un ala de avión, entre el mecanismo de accionamiento y la paleta podría favorecer una transmisión más eficaz del movimiento hacia el fluido:

- **Reducir la resistencia del agua:**  
El agua se desplaza suavemente alrededor del perfil.
- **Transferir mejor la energía:**  
El movimiento del mecanismo se transforma en empuje más eficiente sobre el agua.
- **Evitar turbulencias innecesarias**  
Las superficies planas generan turbulencia y pérdida de energía.
- **Generar empuje más progresivo**  
Esto ayuda a formar olas más estables y repetibles.

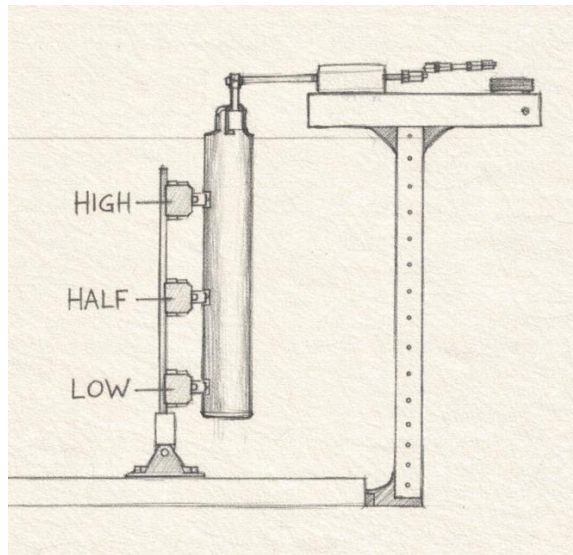
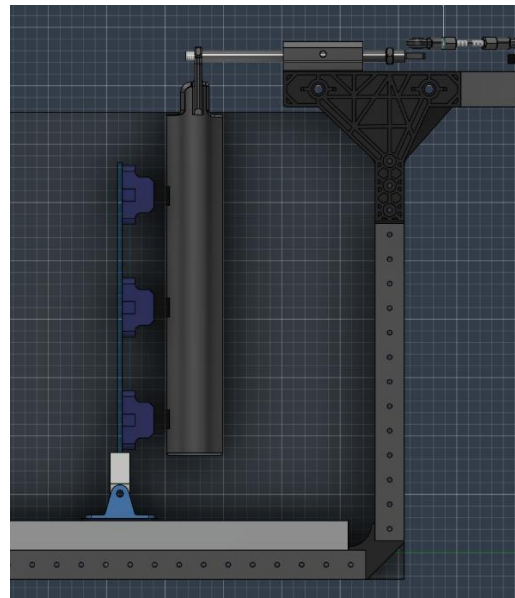
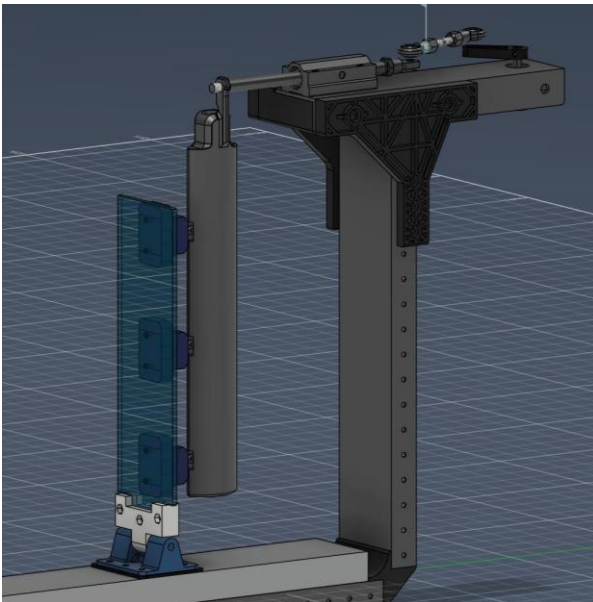


Figura 24. Sketch, cuarta propuesta Sistema transmisor.



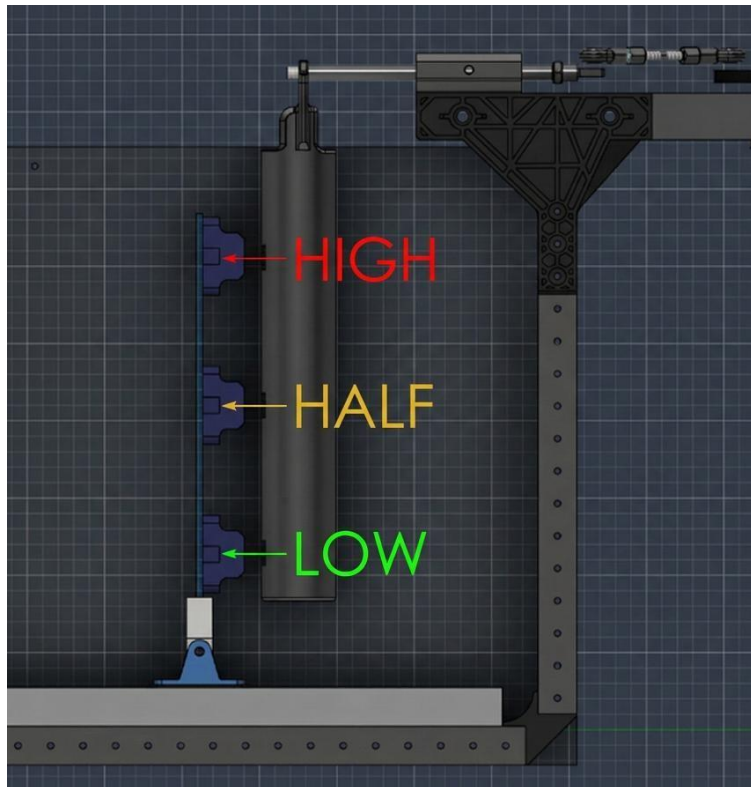


Figura 25, 26, 27. Modelado 3D, cuarta propuesta Sistema transmisor.

Este nuevo componente incorpora tres puntos de conexión que permiten su acoplamiento mediante un solo brazo de transmisión, sin requerir un diseño mecánico complejo. Cada punto puede vincularse a cualquiera de los tres puertos dispuestos en la paleta. De esta manera, se pueden generar tres niveles distintos de altura de oleaje: alto, medio y bajo.

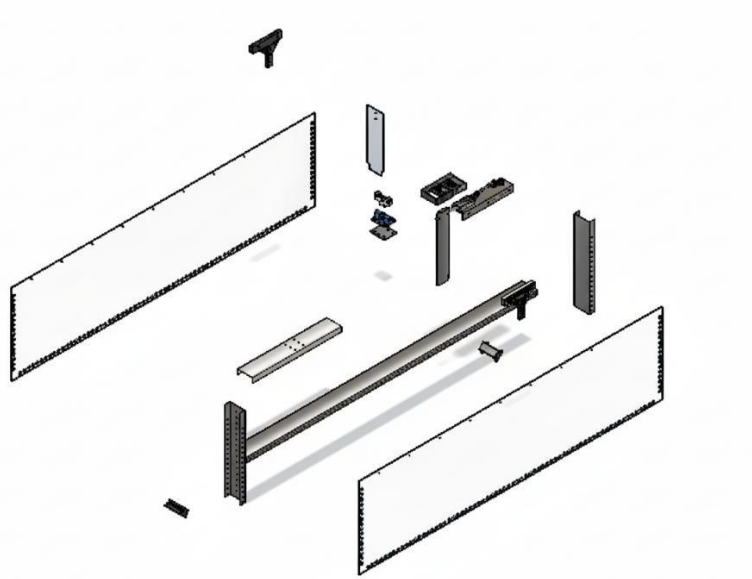
## 4. DEFINICIÓN DEL SISTEMA Y SUBSISTEMAS

### 4.1. IDENTIFICACIÓN DE SUBSISTEMAS

A partir de la exploración conceptual realizada, se identificó que el dispositivo experimental podía abordarse mediante la separación en distintos subsistemas, cada uno con funciones y requerimientos específicos. Esta división permitió ordenar el proceso de diseño y facilitar posteriormente los análisis estructurales y funcionales.

Los subsistemas identificados son:

- **Subsistema experimental (estanque):** contiene el fluido y permite la observación del fenómeno
- **Subsistema mecánico generador de movimiento:** produce el movimiento oscilatorio controlado
- **Subsistema estructural de soporte:** proporciona estabilidad y soporta las cargas operacionales



*Figura 28. Explotado modelo 3D Simulador.*

## **4.2. REQUERIMIENTOS FUNCIONALES DEL SISTEMA**

Cada subsistema debe responder a una serie de requerimientos funcionales que orientaron las decisiones de diseño en las etapas posteriores del proyecto:

- **Resistencia estructural:** capacidad de soportar las cargas operacionales sin deformación excesiva
- **Transparencia:** permitir la observación clara del fenómeno de oleaje
- **Estabilidad:** mantener la integridad durante la operación y minimizar vibraciones indeseadas
- **Versatilidad:** posibilitar el control y variación de las condiciones de funcionamiento
- **Seguridad:** garantizar operación segura para usuarios y equipamiento

Subsistema	Requerimiento Funcional	Descripción del Requerimiento	Método de Verificación
Mecánico	Generación de movimiento oscilatorio	El mecanismo debe generar un movimiento periódico y repetitivo que permita accionar la pala generadora de oleaje.	Observación visual del movimiento y conteo manual de ciclos durante un intervalo de tiempo utilizando cronómetro común.
Mecánico	Ajuste de amplitud de onda	El sistema debe permitir modificar el desplazamiento máximo de la pala generadora para variar la altura del oleaje.	Medición directa del desplazamiento máximo mediante Medidor de nivel de agua de 0-190 ohm fijado al canal.
Mecánico	Transmisión de potencia	Los elementos de transmisión deben operar sin fallas visibles ni deformaciones durante el funcionamiento continuo del sistema.	Inspección visual durante la operación para detectar anomalías, vibraciones excesivas o deformaciones visibles en el simulador.
Estructural / Contención	Estanqueidad del canal	El canal debe contener el fluido de trabajo sin presentar filtraciones durante la operación normal del simulador.	Prueba de llenado con agua y observación visual prolongada para detectar filtraciones o goteos.
Estructural / Contención	Rigidez estructural	La estructura de soporte debe mantener su estabilidad y minimizar vibraciones durante el funcionamiento del sistema.	Observación directa del comportamiento estructural durante la operación del simulador.
Estructural / Contención	Tolerancia de ensamble	La pala generadora debe operar sin interferencias con las paredes del canal durante toda su carrera.	Verificación manual de holguras y alineación mediante inspección visual y uso de separadores simples.

Subsistema	Requerimiento Funcional	Descripción del Requerimiento	Método de Verificación
Control y Potencia	Regulación de velocidad	El sistema debe permitir variar la velocidad del mecanismo para modificar el período del oleaje generado.	Ajuste manual del controlador y observación del cambio en la velocidad del movimiento de la pala.
Control y Potencia	Estabilidad de consumo	El sistema eléctrico debe operar de manera estable sin sobrecalentamiento ni pérdida de rendimiento.	Observación del comportamiento del motor durante operación continua y control táctil de temperatura.
Control y Potencia	Respuesta de parada de emergencia	El sistema debe detenerse de forma inmediata ante la activación de un dispositivo de seguridad.	Activación directa del botón de parada y verificación visual de la detención inmediata del sistema.

*Figura 29. Tabla de requerimientos funcional.*

### 4.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO

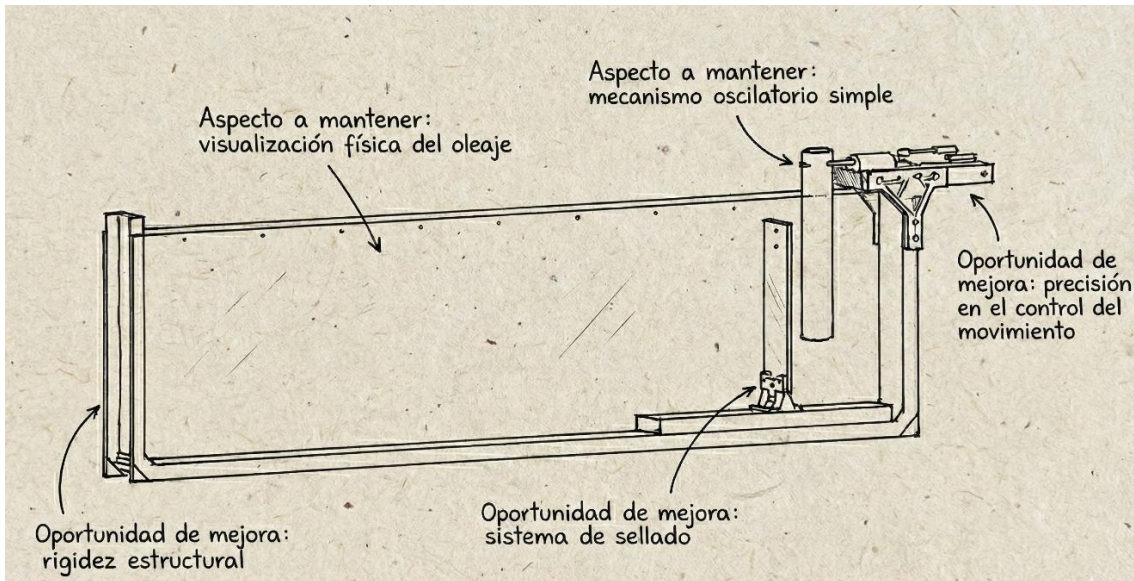
Luego de la etapa de exploración conceptual y definición de requerimientos, se procedió a seleccionar una alternativa de diseño que permitiera cumplir con los objetivos planteados. Esta selección se realizó considerando criterios de simplicidad, control del movimiento, factibilidad de fabricación y seguridad estructural.

- **Diseño del sistema experimental:**

- El diseño del sistema experimental corresponde a la definición conceptual y funcional del simulador como herramienta de análisis y como apoyo teórico. Este sistema establece las condiciones bajo las cuales se reproducen fenómenos de oleaje a escala, permitiendo la observación y el análisis de la interacción entre el movimiento del agua y los sedimentos estuarinos, representativa del comportamiento mareomotriz en entornos costeros.
- En esta etapa se determinan las variables claves tales como el tipo de oleaje a simular, la frecuencia y amplitud del movimiento, las dimensiones del canal experimental y las condiciones de observación del fenómeno. El enfoque experimental prioriza la reproducibilidad, el control de variables y la posibilidad de ajustar parámetros de operación, de modo que el simulador pueda ser utilizado tanto en instancias educativas como exploratorias.
- Asimismo, el diseño del sistema experimental busca equilibrar realismo físico y viabilidad constructiva, considerando restricciones de espacio, costos y materiales disponibles. Esto permite que el dispositivo no solo funcione como un modelo demostrativo, sino también como una plataforma adaptable para futuras investigaciones o mejoras.

- **Diseño del sistema mecánico:**

- El diseño del sistema mecánico corresponde a la materialización física del sistema experimental, definiendo los mecanismos, componentes y estructuras necesarias para generar el movimiento del oleaje de forma controlada y repetible. Este sistema es responsable de transformar la energía mecánica del actuador en un movimiento oscilatorio capaz de reproducir distintas condiciones de oleaje.
- En esta etapa se seleccionan y configuran los elementos mecánicos principales, tales como el sistema de transmisión, el mecanismo de generación de movimiento y la estructura de soporte del canal experimental. El diseño considera criterios de resistencia estructural, estabilidad, seguridad operativa y facilidad de manufactura, priorizando soluciones compatibles con procesos de fabricación accesibles, como perfiles de aluminio y componentes impresos en 3D.
- Además, el sistema mecánico se diseña con un enfoque modular, permitiendo ajustes, mantenimiento y eventuales mejoras sin comprometer el funcionamiento global del simulador. Esto asegura una operación confiable y una vida útil adecuada para su uso en contextos académicos.



*Figura 30. Bosquejo diseño Simulador STEM.*

El bosquejo adjunto no describe el detalle mecánico fino, sino que:

- Representa el principio de funcionamiento del experimento
- Explica qué se observa, qué se mantiene y qué se busca mejorar
- Comunica la lógica experimental del simulador, no su ingeniería de detalle

En este sentido, el énfasis del diseño del sistema experimental se centra en la comprensión y validación del comportamiento físico a estudiar, más que en la ingeniería de detalle del dispositivo.

### **¿Cómo aportan estos puntos al proyecto?**

Por una parte, el diseño del sistema experimental establece con claridad el fenómeno a estudiar y la forma en que este será observado y analizado, otorgando un marco teórico viable y fundamento académico al proyecto. Este componente es el que transforma al simulador en una herramienta de análisis con enfoque STEM, justificando su valor educativo y su contribución a la comprensión del comportamiento del oleaje bajo condiciones controladas.

Por otra parte, el diseño del sistema mecánico hace viable la materialización del experimento, asegurando que el fenómeno definido en el sistema experimental pueda ser reproducido de manera segura y precisa. Este diseño aporta solidez técnica al proyecto, evidenciando la aplicación de principios de diseño mecánico, procesos de manufactura y criterios de validación funcional.

# 5. INGENIERIA DE DETALLE Y PROTOTIPADO

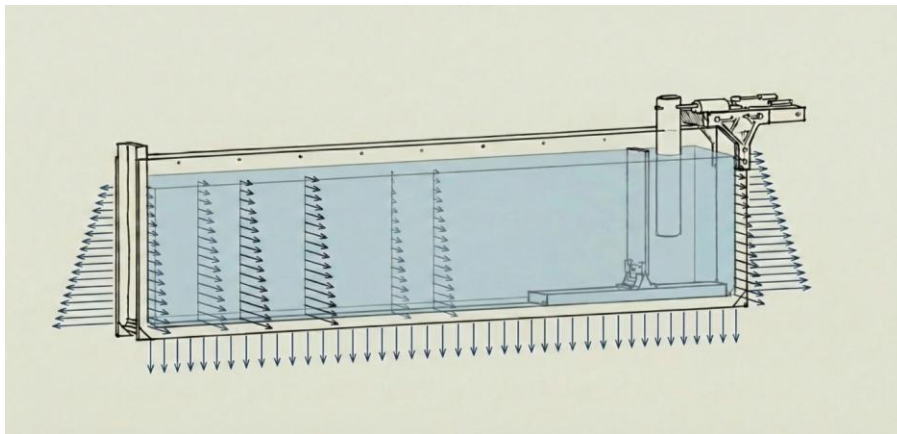
## 5.1. DESARROLLO DE INGENIERÍA DE DETALLE EMPLEADA

El “desarrollo de la ingeniería de detalle” constituye una etapa clave en el proceso de diseño y manufactura de lo que es el simulador de oleaje, ya que permite traducir los requerimientos conceptuales en representaciones técnicas precisas y factibles a la hora de fabricar. Por lo que se deben elaborar planos, modelos tridimensionales, análisis funcionales y sistémicos, así como la verificación mediante prototipos e iteraciones, garantizando la estandarización y la calidad de la documentación generada.

## 5.2. MARCO TEÓRICO – ANÁLISIS COMPUTACIONAL DE ESFUERZOS (CAE)

El análisis de esfuerzos se incorpora en el presente proyecto con el objetivo de evaluar el comportamiento estructural del tanque frente a las cargas generadas por el fluido contenido, en este caso el agua. Dado que el dispositivo trabaja con volúmenes significativos del fluido a trabajar, y ciclos repetitivos de funcionamiento, resulta fundamental comprender cómo las presiones ejercidas por el fluido se transmiten hacia las paredes y la base del tanque.

La inclusión del análisis de esfuerzos aporta directamente a la validación técnica del diseño, entregando un respaldo cuantitativo a las decisiones constructivas adoptadas. Asimismo, permite optimizar el diseño estructural, evitando sobredimensionamientos innecesarios y favoreciendo un equilibrio entre resistencia, eficiencia material y factibilidad de fabricación.



*Figura 31. Diagrama cuerpo libre (generado con IA).*

Para representar conceptualmente las cargas actuantes, se emplea un diagrama de cuerpo libre simplificado, donde se consideran exclusivamente las presiones ejercidas por el agua sobre las superficies internas del tanque.

El diagrama de cuerpo libre adjunto representa de manera sencilla las cargas que el agua ejerce sobre el tanque en toda su extensión, considerando el fluido contenido en estado de reposo. En la representación se distinguen las cargas que ejerce el agua sobre las paredes laterales, los extremos del tanque y la base.

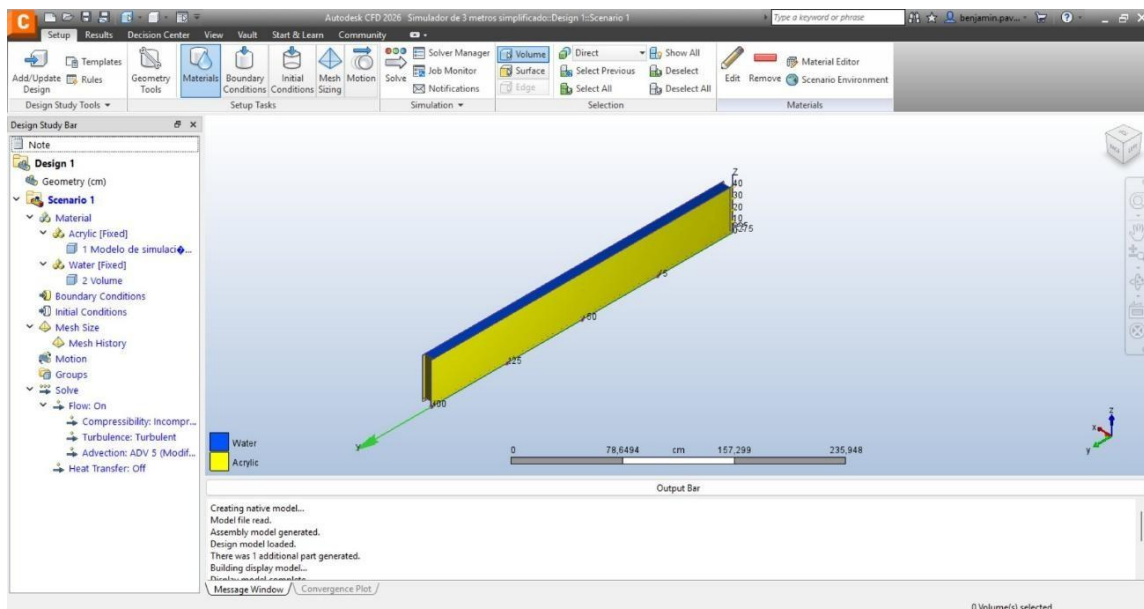
Las flechas horizontales distribuidas a lo largo de las paredes laterales y de los extremos del tanque representan la presión hidrostática ejercida por el agua, la cual aumenta progresivamente a medida descendemos hasta el fondo del tanque. Esto se evidencia en el incremento de la

magnitud de las flechas hacia el fondo, reflejando la mayor sollicitación estructural en las zonas inferiores del tanque.

Por otra parte, están las flechas verticales orientadas hacia abajo en la base del tanque, las cuales representan la carga asociada al peso del volumen de agua contenido, transmitida directamente al fondo del sistema. Esta carga es relevante para evaluar los esfuerzos y posibles deformaciones en la base y en los elementos de apoyo del conjunto.

El diagrama considera únicamente las acciones del fluido, sin incorporar efectos dinámicos ni cargas externas adicionales, con el propósito de establecer un modelo de cargas claro y controlado. Este esquema sirve como base conceptual para la definición de las condiciones de carga utilizadas posteriormente en el análisis de esfuerzos mediante simulación computacional.

Para evaluar el comportamiento del agua con el estanque, se realizó una simulación de presión hidrostática mediante el software Autodesk CFD, herramienta especializada en el análisis de fluidos en estructuras estáticas.



**Figura 32.** Interfaz de trabajo Autodesk CFD.

El modelo fue preparado en Fusion 360, donde se simplificó el entorno de trabajo y se incorporó un componente que representa el volumen de agua. Desde allí, el modelo fue exportado al software de simulación, Autodesk CFD.

El tipo de análisis utilizado fue "Steady State", ideal para calcular la presión hidrostática sobre estructuras estáticas. Cabe señalar que el enfoque de este estudio no está enfocado en el movimiento dinámico de las olas ni las presiones asociadas a dicho fenómeno.

## CONFIGURACIÓN DEL MATERIAL: AGUA

Se definió una configuración específica con el objetivo de representar de manera correcta el comportamiento físico del agua dentro del modelo. Para ello, se emplearon los parámetros indicados en la imagen adjunta, asegurando que las condiciones de simulación fueran coherentes con las propiedades necesarias para el análisis.

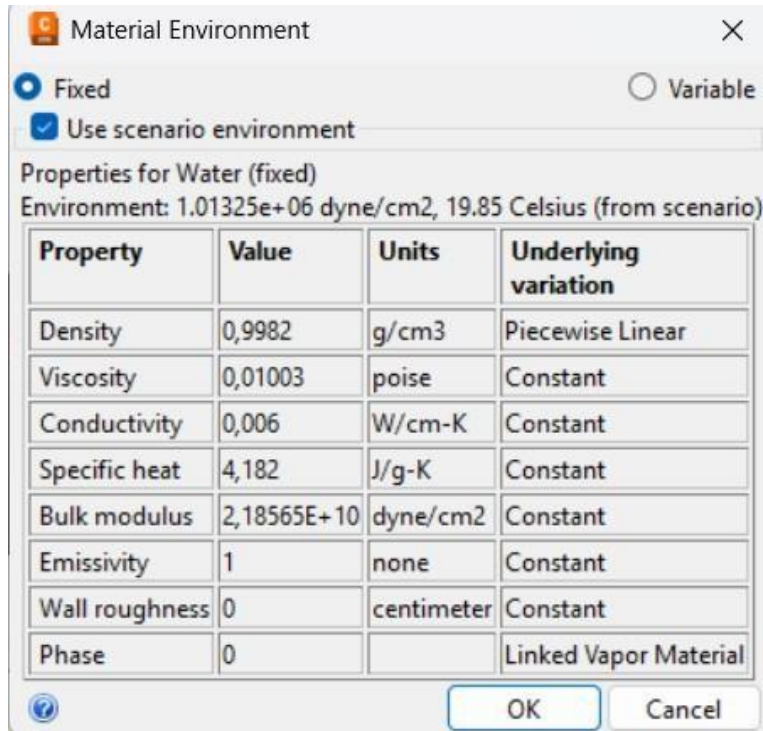


Figura 33. Tabla Condiciones del material.

La tabla adjunta corresponde a las propiedades físico-termodinámicas del agua definidas en el software Autodesk CFD, bajo condiciones ambientales de  $1,01325 \times 10^6$  dyne/cm<sup>2</sup> (presión atmosférica) y 19,85 °C. Los parámetros configurados son los siguientes:

- **Densidad (0,9982 g/cm<sup>3</sup>):**  
Valor representativo del agua a temperatura ambiente, fundamental para el cálculo de fuerzas hidrostáticas.
- **Viscosidad (0,01003 poise):**  
Determina la resistencia interna al flujo e influye en el régimen de movimiento (laminar o turbulento).
- **Conductividad térmica (0,006 W/cm·K) y calor específico (4,182 J/g·K):**  
Parámetros térmicos de influencia secundaria en un análisis puramente hidrodinámico.
- **Módulo volumétrico ( $2,18565 \times 10^{10}$  dyne/cm<sup>2</sup>):**  
Confirma el comportamiento prácticamente incompresible del agua bajo las condiciones del modelo.
- **Emisividad (1):**  
Valor idealizado para eventuales intercambios radiativos.

La correcta definición de estos parámetros asegura coherencia física en la simulación y permite obtener resultados confiables y reproducibles.

## CONDICIONES PARA LA SIMULACIÓN

En este análisis, la carga aplicada corresponde a **presión**, expresada en unidades del Sistema Internacional (Pascuales, Pa), ya que el fluido a estudiar, es decir, el agua, ejerce su efecto sobre las superficies en contacto de manera distribuida. A diferencia de una fuerza puntual, el agua no actúa en un solo punto, sino que transmite su acción sobre toda el área que contiene.

Por esta razón, resulta adecuado modelar su efecto como una **presión hidrostática**. Desde el punto de vista físico, la presión de un fluido en reposo aumenta a medida que aumenta la profundidad. Esto significa que las paredes y el fondo del canal están sometidos a una presión que crece progresivamente en función de la altura de la columna de agua, generando una distribución de carga variable a lo largo de la estructura.

La presión fue definida como 0 Pa en términos de presión manométrica (*gauge pressure*), lo que significa que se mide de forma relativa a la presión atmosférica ambiente. Este criterio es el adecuado para este tipo de análisis, ya que permite cuantificar la presión que ejerce el agua sobre la estructura.

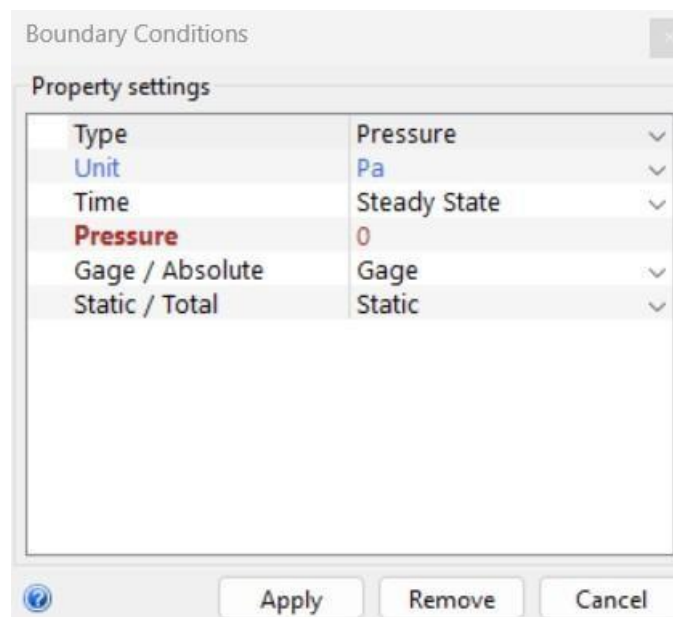


Figura 34. Tabla Condiciones de Límite.

Con esos parámetros en mente, y utilizando un valor de iteraciones de "50" para hacer la simulación, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

- **CONVERGENCIA DEL SOLVER (GRÁFICO GENERAL "ALL")**

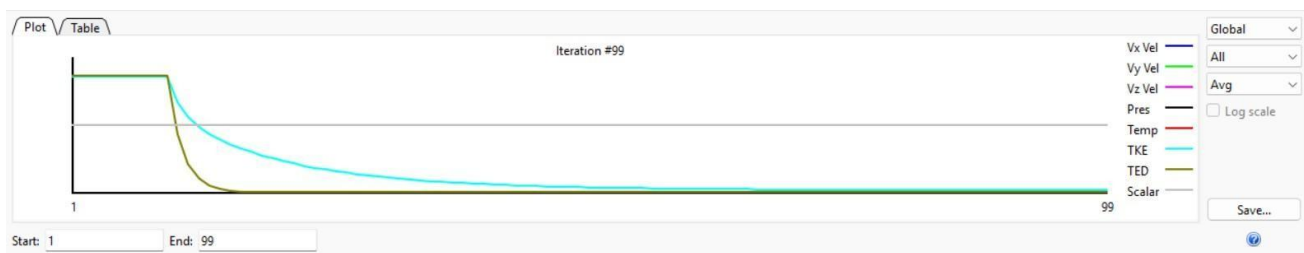


Figura 35. Gráfico General.

La primera gráfica (etiquetada como "All", que generalmente monitoriza residuales de ecuaciones) muestra que la simulación ha convergido exitosamente.

Las líneas de residuales (errores de cálculo para variables como velocidad y presión) descienden desde el inicio (Start 1) hasta el final (End 30), estabilizándose en valores muy bajos. Esto indica que el software ha encontrado una solución numérica estable y que el análisis ha corrido suficientes iteraciones para que los resultados de cada paso ya no cambien significativamente.

Los resultados son confiables desde el punto de vista matemático y computacional para la configuración de estado estacionario (Steady State).

- **DISIPACIÓN DE ENERGÍA TOTAL (GRÁFICO "TOTAL ENERGY DISSIPATION")**

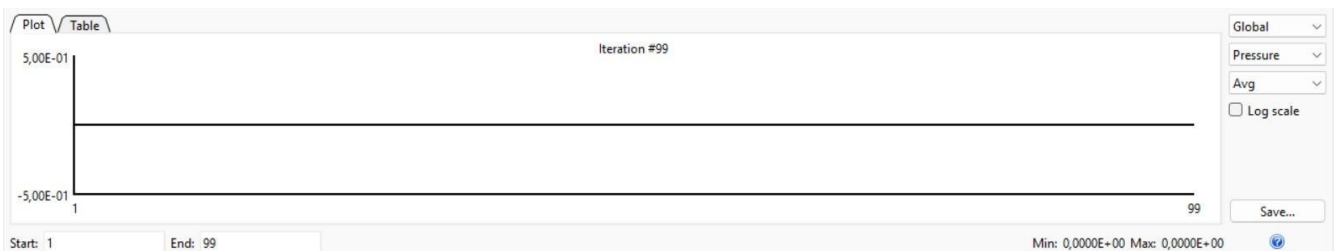


*Figura 36. Gráfico Disipación de energía total.*

Este gráfico muestra un pico inicial de disipación de energía que disminuye y se estabiliza. El pico al principio representa el ajuste inicial del modelo a las condiciones de contorno y materiales. La estabilización posterior en un valor constante y bajo indica que el sistema ha alcanzado un estado de equilibrio (Steady State) donde la energía se disipa de manera constante y predecible.

El sistema se ha estabilizado en un estado de flujo constante.

- **RESULTADOS DE PRESIÓN EJERCIDA (GRÁFICO "PRESIÓN EJERCIDA")**



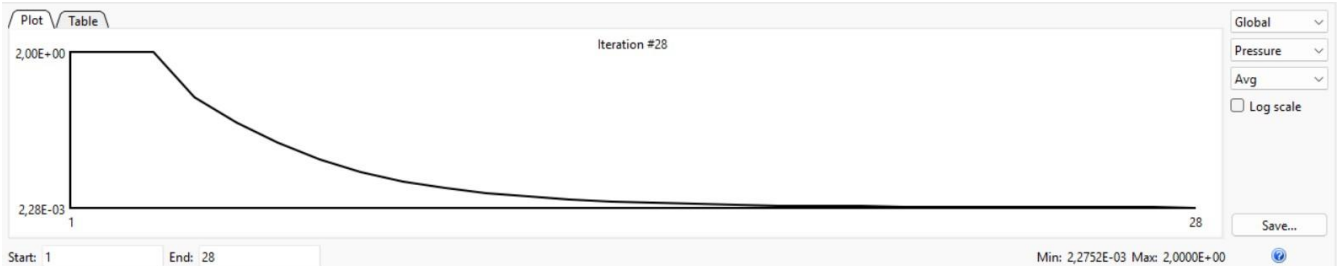
*Figura 37. Gráfico Resultado 1, Presión ejercida.*

La gráfica de presión muestra valores mínimo y máximo de  $0,0000E+00$  Pa.

Esto se debe a que se definió una presión manométrica (Gage Pressure) de 0 Pa como condición de contorno. El software interpreta esto como la presión atmosférica de referencia.

El resultado es correcto para la configuración, pero significa que la simulación solo calculó la presión relativa con respecto a la atmósfera. Si se quiere medir la presión absoluta o la presión hidrostática del agua sobre la estructura, la configuración fue insuficiente. El resultado 0 Pa significa que no hay sobrepresión ni depresión adicional aplicada externamente en esa frontera.

Por eso mismo, se hizo una segunda simulación, esta vez con un valor definido de 0,2 Pa y un valor de "28" iteraciones. Y el gráfico fue el siguiente:



**Figura 38. Gráfico Resultado 2, Presión ejercida.**

El nuevo gráfico de "Presión" presenta la evolución del cálculo de presión durante 28 iteraciones del proceso de simulación. Se observa que el valor inicial parte en un nivel elevado y disminuye progresivamente hasta estabilizarse en magnitudes muy bajas, alcanzando aproximadamente  $2,27 \times 10^{-3}$  al finalizar las iteraciones.

Este comportamiento indica que la simulación alcanzó una convergencia adecuada. Es decir, el software fue ajustando la solución de manera iterativa hasta que las variaciones entre ciclos consecutivos se volvieron prácticamente insignificantes. En la práctica, esto significa que el sistema llegó a ser estable, y no se observan inestabilidades ni divergencias en el cálculo.

### 5.3. PLANOS NECESARIOS

Se elaboraron los planos técnicos que definen con exactitud las dimensiones, tolerancias, materiales y uniones de los distintos componentes del simulador. Estos documentos son esenciales para la construcción física, permitiendo asegurar la coherencia entre el diseño digital y la manufactura. De igual manera, la planimetría fue organizada según normas gráficas de ingeniería, incorporando vistas, cortes y detalles constructivos que facilitan la interpretación en taller.

#### PLANO MONTAJE

El plano de montaje consiste en presentar:

- Proyecciones en perspectiva (3D y sin cotas).
- Todos los elementos que componen el conjunto.
- Marca identificativa (número que identifica al elemento).
- Listado de piezas.

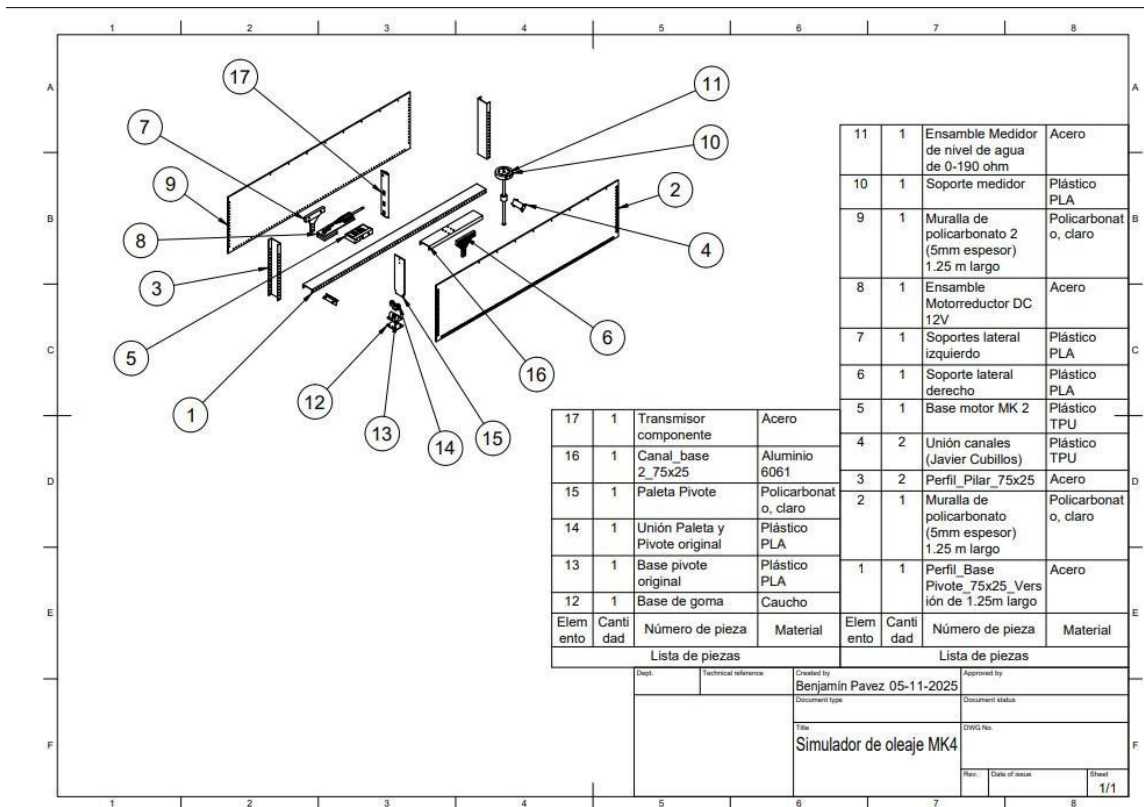


FIGURA 39. PLANO MONTAJE SIMULADOR OLEAJE (PRIMER PROTOTIPADO 1).

## PLANO CONJUNTO

El plano de conjunto consiste en presentar:

- Proyecciones diédricas (Vistas y cortes).
- Cotas generales.
- Van todos los componentes. El conjunto va montado.
- Marca identificativa (número que identifica al elemento).
- Listado de piezas.

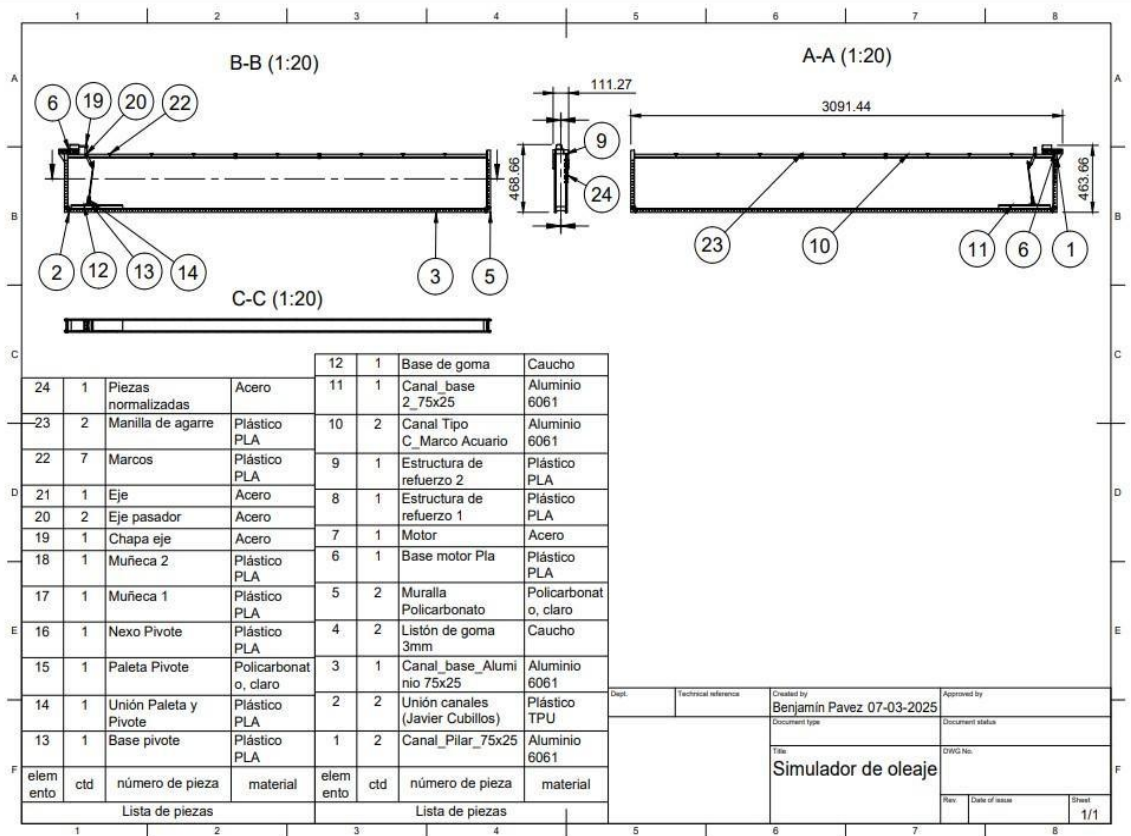
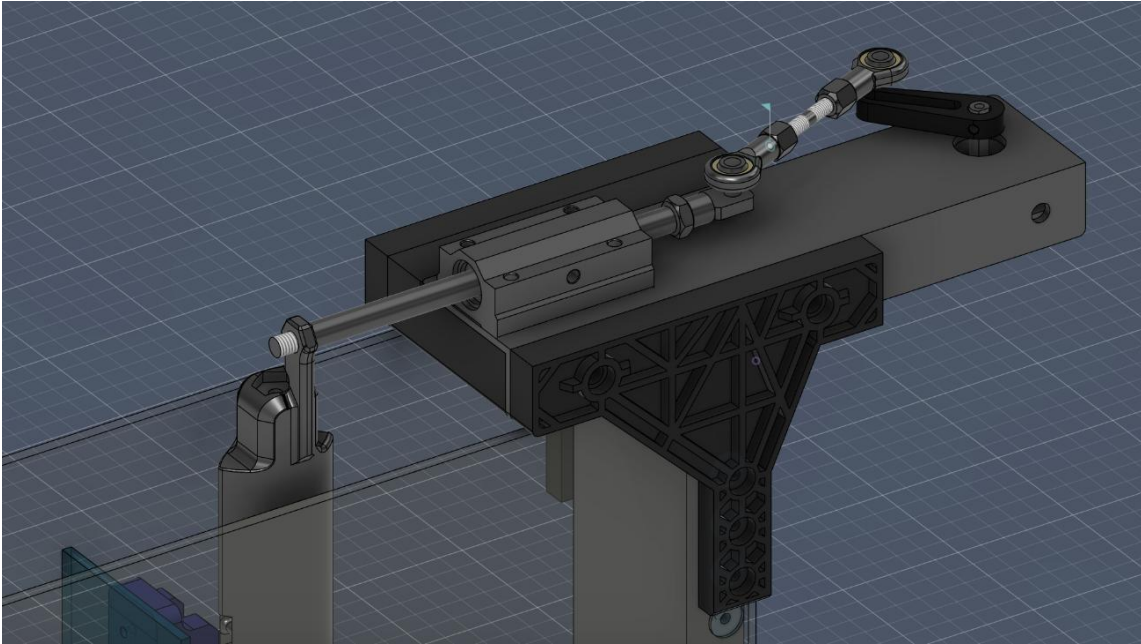


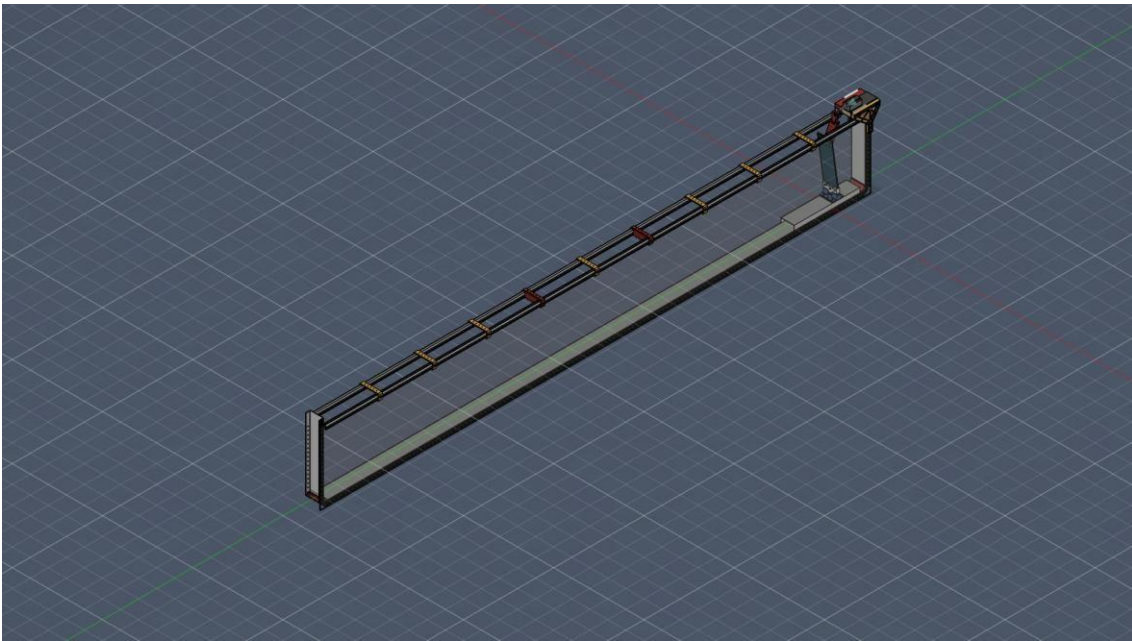
FIGURA 40. PLANO CONJUNTO SIMULADOR OLEAJE (PRIMER PROTOTIPADO 1).

## 5.4. MODELACIÓN 3D

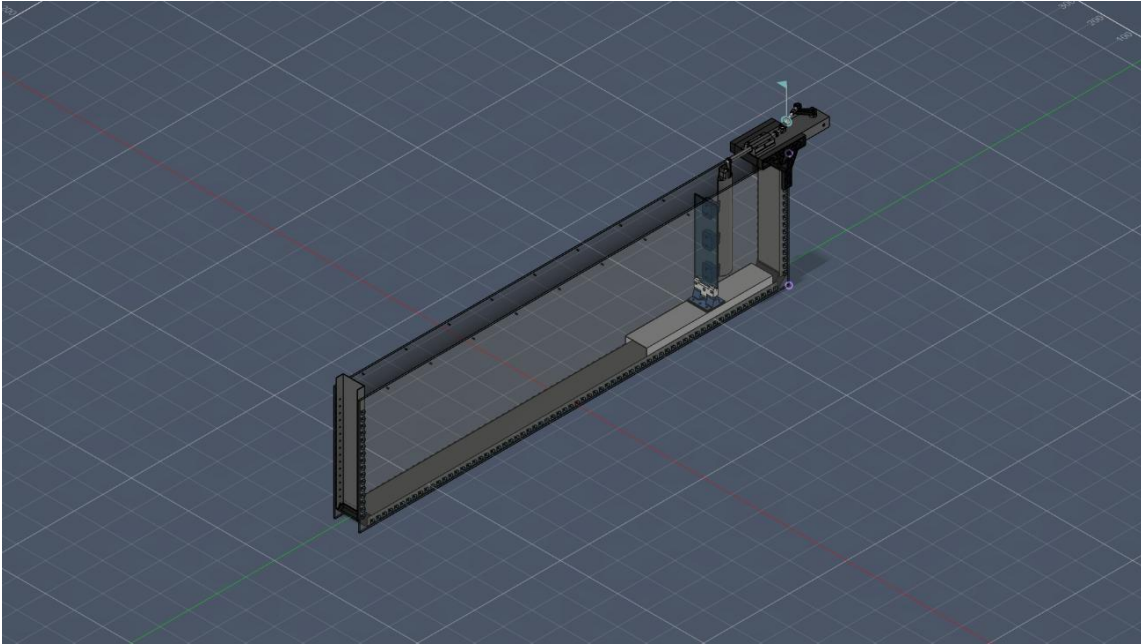
La modelación tridimensional fue desarrollada en software CAD (Fusion 360), lo cual permitió visualizar la geometría del dispositivo, simular su ensamble y evaluar la interacción entre subsistemas. Esta representación facilitó la validación temprana del diseño, detectando posibles interferencias, mejorando la disposición de componentes y optimizando la estructura en términos de resistencia y peso. Además, el modelo 3D fue utilizado como base para renderizados explicativos y para la generación automatizada de planos técnicos.



*FIGURA 41. VISTA GENERAL MOTOR ACTUADOR LINEAL (MODELADO 3D).*



*FIGURA 42. VISTA GENERAL DEL CANAL Y SISTEMA GENERADOR DE OLAS (MODELADO 3D PROPUESTA PROTOTIPADO 1).*



*FIGURA 43. VISTA GENERAL DEL CANAL Y SISTEMA GENERADOR DE OLAS (MODELADO 3D PROPUESTA PROTOTIPADO 2).*

El modelo tridimensional representa el ensamble completo del simulador de oleaje, desarrollado mediante el software Autodesk Fusion 360. La estructura principal consta de un canal rectangular de 3000 mm de longitud (3 m de longitud), constituido por planchas de policarbonato compacto transparente de 5 mm de espesor, integrados a un “marco” de perfiles de aluminio 75×25 mm que proporciona la rigidez estructural necesaria.

El subsistema de generación de oleaje, ubicado en el extremo del canal, comprende una paleta accionada por un motorreductor de corriente continua. La transmisión del movimiento oscilatorio se realiza mediante un mecanismo de biela-manivela conectado a un eje de pivote soportado lateralmente. Adicionalmente, el ensamble incorpora uniones específicas, listones de goma para el sellado de las murallas, y la inclusión de componentes auxiliares fabricados mediante manufactura aditiva (impresión 3D-FDM).

La modelación tridimensional permitió validar la disposición espacial de componentes, verificar interferencias geométricas, evaluar los requerimientos de espacio operacional y confirmar la correcta integración funcional de los subsistemas en la configuración global del simulador.

## **5.5. ANÁLISIS FUNCIONAL Y SISTÉMICO**

El análisis funcional y sistémico es una herramienta metodológica esencial para la comprensión del comportamiento integral del simulador de oleaje. Esta aproximación nos permite identificar y caracterizar las funciones principales, secundarias y de soporte del sistema, así como establecer las interacciones entre subsistemas y su relación con el entorno operativo. Mediante este análisis se obtiene una representación general del dispositivo y fundamenta las decisiones adoptadas durante la etapa de ingeniería de detalle.

### **FUNCIÓN GLOBAL DEL SISTEMA**

La función primaria del simulador consiste en la generación y control de oleaje en un canal experimental de dimensiones acotadas, con el propósito de analizar la interacción hidrodinámica entre el fluido y diferentes tipos de sedimentos (arena natural, rompe olas, etc.). El sistema está pensado para replicar condiciones controladas que permitan el estudio de fenómenos

hidrodinámicos y morfológicos característicos de zonas costeras, con especial énfasis en las condiciones ambientales propias de la Región de Valparaíso.

### **FUNCIONES PRINCIPALES**

El cumplimiento de la función global requiere la integración de las siguientes funciones principales:

- **Generación de oleaje controlado:** El subsistema mecánico de generación, constituido por una paleta batiente accionada mediante servomecanismo, produce ondas de gravedad superficiales con parámetros de amplitud y frecuencia regulables. Este mecanismo permite la reproducción de diferentes regímenes de oleaje dentro del rango operativo establecido.
- **Contención y confinamiento del fluido:** La estructura principal, fabricada en policarbonato de alta transmitancia y reforzada mediante perfilera estructural de aluminio, garantiza la estanqueidad del canal experimental y proporciona la resistencia mecánica necesaria para soportar las cargas hidrodinámicas generadas durante la operación del sistema.
- **Adquisición y registro de variables:** El sistema integra un conjunto de sensores electrónicos (ultrasonicos, flotadores o transductores de presión) que posibilitan la medición y registro de variables relevantes, tales como altura de ola, período de oscilación y características del campo de velocidades superficial.
- **Transporte y manipulación segura:** La configuración estructural incorpora un sistema de soporte diseñado para facilitar el desplazamiento del equipo, garantizando estabilidad dimensional y resistencia adecuada frente a las sollicitaciones asociadas a la masa total del conjunto (estructura, fluido y componentes auxiliares).

### **FUNCIONES SECUNDARIAS**

Adicionalmente a las funciones principales, el sistema cumple las siguientes funciones de soporte:

- **Integridad estructural y seguridad operacional:** Minimización del riesgo de fugas o fallos estructurales derivados de la presión hidrostática y las cargas dinámicas inducidas por el movimiento del fluido.
- **Mantenibilidad y accesibilidad:** Configuración modular que permite el desmontaje parcial del subsistema de generación de oleaje, facilitando las operaciones de ajuste, calibración y mantenimiento preventivo o correctivo.
- **Funcionalidad didáctica:** Optimización de las condiciones de observación del fenómeno físico mediante la selección de materiales transparentes, proporciones geométricas adecuadas y consideraciones ergonómicas que favorecen la visualización directa de los PROCESOS HIDRODINÁMICOS.

### **REPRESENTACIÓN DE CAJA NEGRA**

Desde una perspectiva sistémica de caja negra, el simulador puede caracterizarse como un sistema de transformación que procesa entradas definidas para generar salidas medibles y observables:

- **Entradas del sistema:**
  - Energía mecánica suministrada por el motor reductor.
  - Volumen de agua contenido en el canal experimental.
  - Señales eléctricas de control y alimentación para la instrumentación electrónica (Como el medidor de nivel de agua con Arduino).
- **Proceso de transformación:** El sistema genera oleaje mediante el desplazamiento cíclico de la paleta, propagando perturbaciones ondulatorias a lo largo del canal. Estas ondas interactúan con los sedimentos dispuestos en el fondo del canal, permitiendo la

observación y cuantificación de fenómenos de transporte sedimentario, reflexión de oleaje y disipación energética.

- **Salidas del sistema:**
  - Oleaje con características de frecuencia y amplitud controladas
  - Datos cuantitativos registrados por el sistema de instrumentación
  - Visualización experimental que facilita el análisis fenomenológico y la validación de modelos teóricos

## 5.6. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPO FÍSICO

El desarrollo del prototipo se ejecutó mediante una metodología incremental estructurada en dos etapas secuenciales. En la fase inicial, se construyó un modelo a escala reducida destinado solo a la realización de ensayos preliminares para ver la hermeticidad, resistencia estructural y compatibilidad de los materiales especificados. Esta etapa de validación experimental permitió corroborar la viabilidad técnica del policarbonato compacto como material de confinamiento, así como la efectividad de las uniones mecánicas atornilladas y los listones de goma en la función de la hermeticidad.

Con base en los resultados obtenidos durante la fase de prototipado, se procedió a la fabricación del simulador con sus dimensiones establecidas. Este proceso contempló la manufactura del tanque principal según las especificaciones definidas en la documentación técnica, la aplicación de los criterios de ajuste y ensamble establecidos, y la integración sistemática de los subsistemas previamente modelados en el entorno CAD.



FIGURA 44. MONTAJE DEL TANQUE.



FIGURA 45. ENSAMBLE SIMULADOR DE OLEAJE (PROTOTIPADO 1).

Además, el diseño contempla la futura incorporación de un sistema que registre los datos con el fin de monitorear y registrar la información obtenida durante los ensayos, particularmente en lo relacionado con la altura del oleaje generado. Para ello, se realizaron algunos diseños conceptuales en Tinkercad y pruebas preliminares en Arduino orientadas a evaluar su posible implementación. Este sistema se denomina:

- **Sistema de medición de nivel de agua:** Actualmente, en fase de prototipado, se encuentra en desarrollo un sistema de medición destinado a registrar el nivel de agua en el canal. Está conformado por un medidor de nivel de 0–190 ohm conectado a un Arduino UNO y una pantalla LCD/OLED. Este sistema permitirá visualizar en tiempo real la altura del agua en el canal, mejorando la precisión en la recopilación de datos experimentales.

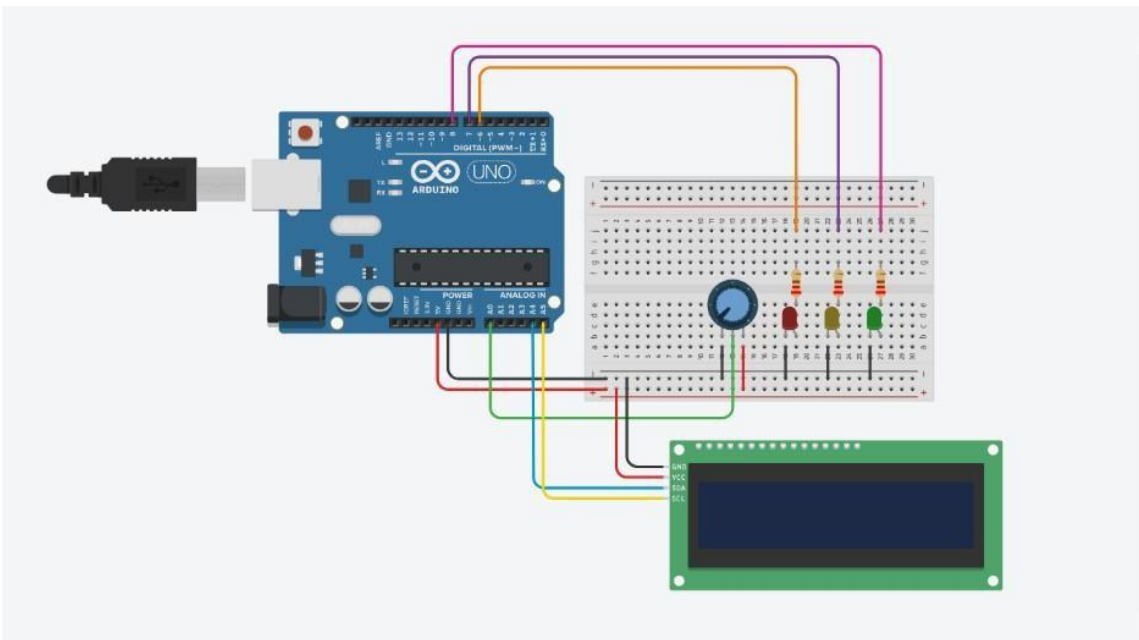
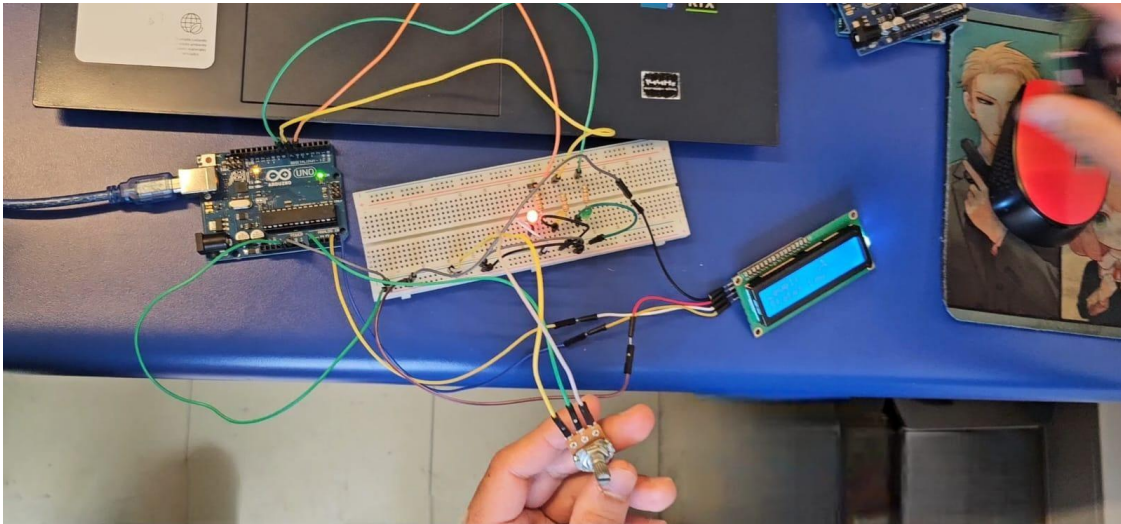


FIGURA 46. ESQUEMA SISTEMA MEDIDOR DE NIVEL DE AGUA EN TINKERCAD



*FIGURA 47. SESIÓN DE PRUEBA EXPERIMENTAL DEL SISTEMA MEDIDOR DE NIVEL DE AGUA CON ARDUINO*

El prototipo construido se asemeja bastante al diseño propuesto. No obstante, durante su desarrollo se identificaron diversos aspectos que pueden ser mejorados para optimizar su desempeño, destacando la necesidad de una estructura más robusta y rígida que refuerce la contención del agua y minimice las filtraciones.

## **6. COSTO DE LA PROPUESTA**

El costo estimado de fabricación del Simulador de Oleaje se compone de tres grandes categorías: la estructura del estanque (policarbonato y perfilaría de aluminio), el sistema de control y medición con Arduino (sensores, placa y componentes electrónicos) y los elementos impresos en 3D que conforman el sistema mecánico de generación de oleaje.

Según las estimaciones realizadas, el valor total es aproximadamente \$480.000 CLP, considerando tanto materiales comerciales como costos de impresión 3D (filamento, energía, horas, máquina). Este monto entrega una referencia clara del presupuesto necesario para reproducir el proyecto en un contexto académico, con la posibilidad de optimizarlo en futuras iteraciones mediante ajustes en el diseño o en la selección de materiales.

<b>COSTO PROPUESTA</b>	
<b>Ítem</b>	<b>Costo (CLP)</b>
Plancha policarbonato compacto 3m x 40cm x 5mm (transparente)	<b>261508</b>
Canal/perfil de aluminio 3m x 75mm x 25mm (estimación basada en 6m \$56.590 → 3m ≈ \$28.295)	<b>28295</b>
Marco de aluminio tipo C 3m x 25mm x 12mm (estimación, proxy barra 3m ≈ \$12.990)	<b>15000</b>
Arduino Uno o Nano	<b>3602</b>
Sensor de nivel de agua	<b>20214</b>
Protoboard y resistencias	<b>1971</b>
Pantalla LCD/LED	<b>2171</b>
Cables jumper macho-macho / hembra	<b>1112</b>
Base motor (TPU, 50% infill, Ender 3 S1, 34h13m)	<b>85542</b>
Soporte lateral derecho (PLA, 100% infill, 6h16m)	<b>12533</b>
Soporte lateral izquierdo (PLA, 100% infill, 5h01m)	<b>10033</b>
Base pivote (PLA, 100% infill, 2h16m)	<b>4533</b>
Unión paleta-base (PLA, 100% infill, 1h45m)	<b>3500</b>
Marcos soporte (PLA, 100% infill) — 7 unidades × 1h38m c/u (≈ \$3267 c/u)	<b>22869</b>
Manilla de agarre Marco soporte 2 (PLA, 100% infill) — 2 unidades × 3h37m c/u (≈ \$7233 c/u)	<b>14466</b>
<b>TOTAL</b>	<b>487349</b>

FIGURA 48. TABLA COSTOS PROYECTO.

## 7. CONCLUSIONES

El presente proyecto permitió desarrollar y materializar el diseño conceptual y técnico de un simulador de oleaje con enfoque educativo STEM, orientado a fortalecer la enseñanza práctica de fenómenos hidrodinámicos y transporte de sedimentos. A través de un proceso iterativo de diseño, modelación 3D, análisis estructural mediante herramientas CAE y la confección de un prototipo físico, se logró validar la viabilidad técnica de un sistema experimental capaz de representar patrones básicos de oleaje en un entorno controlado.

Desde el punto de vista estructural y funcional, el dispositivo cumple con los requerimientos fundamentales definidos en la etapa inicial del proyecto, tales como estabilidad, resistencia mecánica, transparencia para observación experimental y posibilidad de integración futura de sistemas de sensorización. Asimismo, se logró establecer un diseño modular para su estructura que facilite futuras mejoras y escalabilidad tecnológica.

No obstante, durante la etapa de pruebas experimentales se evidenció que la generación de oleaje no alcanzó el nivel de eficiencia esperado en términos de pureza y estabilidad de la onda generada.

El mecanismo articulado implementado produjo disturbios y perturbaciones secundarias que interrumpían la propagación uniforme del oleaje, afectando la calidad de la simulación en determinados rangos de frecuencia y amplitud.

Esta limitación no invalida el desarrollo alcanzado, sino que representa un hallazgo técnico relevante dentro del proceso de investigación y prototipado. En este sentido, el proyecto deja establecidas las bases conceptuales, estructurales y funcionales para una nueva propuesta de mecanismo generador, orientada a reducir las distorsiones observadas y mejorar la eficiencia en la transmisión del movimiento al fluido.

En términos globales, el simulador desarrollado cumple con su propósito como herramienta pedagógica experimental, permitiendo observar de manera tangible fenómenos que habitualmente se estudian solo mediante modelos teóricos o simulaciones computacionales. El proceso desarrollado demuestra que es técnicamente viable implementar dispositivos experimentales accesibles que contribuyan significativamente al aprendizaje en mecánica de fluidos e ingeniería costera.

Más allá del resultado final, el valor principal del proyecto radica en el proceso de diseño, validación y análisis crítico, el cual permitió integrar conocimientos de ingeniería mecánica, hidrodinámica, análisis estructural y diseño industrial en una propuesta concreta con potencial de mejora continua.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar un enorme agradecimiento al profesor guía, Mario Salinas, de la carrera de Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial, por su constante apoyo, orientación técnica y disposición durante todo el desarrollo del proyecto. Sus observaciones, consideraciones y retroalimentación fueron siempre constantes, pues se aseguró de mantener el rigor académico y técnico del trabajo para lograr el objetivo.

Agradezco también al profesor Patricio Catalán, del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Federico Santa María, sede Casa Central, por su guía en los fundamentos de la mecánica de fluidos y por sus valiosas explicaciones respecto al comportamiento del agua y la propagación del oleaje, las cuales enriquecieron significativamente el enfoque teórico del proyecto.

Asimismo, deseo expresar un especial agradecimiento a mi compañero de carrera, Javier Cubillos, con quien desarrollamos en conjunto el primer prototipado del simulador durante el período de práctica profesional. Este proyecto, surgido como encargo académico desde la Casa Central de la Universidad Federico Santa María, representó una instancia de trabajo colaborativo en la que ambos asumimos la responsabilidad de construir una propuesta funcional dentro del contexto de la carrera de Ingeniería en Fabricación y Diseño Industrial.

Finalmente, extendiendo mi agradecimiento a don Alexy Oquendo, ingeniero mecánico de la empresa Proingesa, por su apoyo técnico en el análisis de presión de agua, su orientación en la interpretación de los resultados obtenidos en simulaciones y por sus explicaciones claras que permitieron comprender con mayor profundidad el comportamiento estructural del sistema bajo carga hidrostática.