



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería Marítima, Ciencias Biológicas,  
Oceánicas y Recursos Naturales**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TANQUE DE OLAS  
PARA EL LABORATORIO DE ING. NAVAL”**

**INFORME DE PROYECTO INTEGRADOR**

Previa a la obtención del Título de:

**INGENIERA NAVAL**

**SAMANTA DEL CARMEN CASTILLO FEIJOÓ**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2018**

## AGRADECIMIENTOS

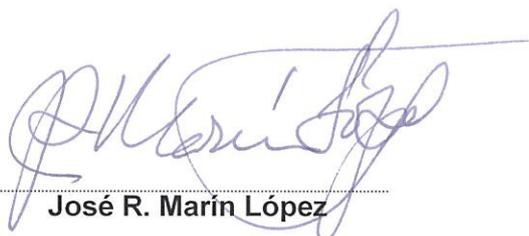
A Dios y a la Virgen de Guadalupe por bendecirme cada día.

A mis padres María y Javier por ser mi soporte emocional. A mis hermanos Javier y Adriano por ser los guías en mi camino. Al Ing. Jonathan Moran por sus consejos y ayuda durante este proyecto. A mi tutor José R. Marín López por las enseñanzas impartidas durante mi formación profesional y permitirme realizar este proyecto de titulación. A mis amigos por ser el impulso que en ocasiones necesite, por los días de estudio y no-estudio.

## DEDICATORIA

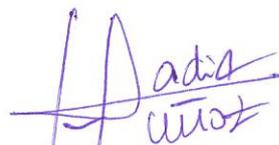
Este proyecto se lo dedico a mi madre, como muestra del esfuerzo realizado durante mis años de estudio. Por su amor incondicional, consejos y sacrificios que ayudaron a formar la persona que soy.

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



José R. Marín López

PROFESOR EVALUADOR



Nadia R. Muñoz Agila

PROFESOR EVALUADOR

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me(nos) corresponde exclusivamente; y doy(damos) mi(nuestro) consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Samanta del Carmen Castillo Feijoó

## RESUMEN

En este trabajo se diseñó y construyó un tanque de olas de cuatro metros para el Laboratorio de Ingeniería Naval, con la finalidad de analizar el comportamiento en el mar de estructuras flotantes. Se realizó en tres fases: diseño, construcción y pruebas experimentales. El diseño fue realizado de tal forma que los dispositivos se adapten al movimiento lineal oscilatorio proporcionado por el vibrador. Se dividió en tres grupos: generador de olas, sistema de conexión vibrador – generador y tanque de pruebas. El generador de olas consta de un sistema de guiado, armazón de aluminio y un panel de acrílico que desplaza la masa de agua. La conexión vibrador – generador está construido con una viga basculante y sistemas de conexión. El tanque de pruebas está formado por tres estructuras, su base, el tanque de vidrio y absorbedor de energía. Las piezas fueron modeladas y construidas de tal forma que sean de fácil manipulación y el mantenimiento requerido sea mínimo.

Se realizaron cuatro tipos de pruebas con la finalidad de validar el proyecto, utilizando tubos de Pitot y sensores de presión para registrar los cambios de altura producidos por las olas. Tres de estas pruebas fueron realizadas con movimiento senoidal, estableciendo en el vibrador, el desplazamiento se varía entre 0.4 a 0.6 cm pico-pico, y con frecuencias determinadas, no mayores a 2.5 Hz. Para medir la eficiencia del absorbedor de energía en el tanque de olas, se varía el ángulo de inclinación a  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $30^\circ$  con respecto de la vertical. Luego se comprueba la calidad de ola generada, midiendo cuan senoidal es la onda, se utiliza el método de mínimos cuadrados que establece la diferencia entre los puntos de presión registrados y los puntos pronosticados de la curva senoidal, a determinada amplitud. Se determinaron valores de los requerimientos del generador a tres desplazamientos y variando la frecuencia entre 0.8 Hz hasta 2.0 Hz. A partir de estas pruebas se establecieron relaciones reales entre los parámetros de ola y generador de olas como guía para futuros proyectos de este tipo.

Por último, se generaron olas irregulares con las excitaciones aleatorias del vibrador, estableciendo un rango de frecuencias entre 0.5 y 2.5 Hz, un nivel de densidad espectral de la aceleración de  $0.00001 \text{ g}^2/\text{Hz}$ , generando un pico en el promedio de las frecuencias a  $0.00002 \text{ g}^2/\text{Hz}$ . Con un tiempo de registro de 5 minutos, contabilizan los máximos locales de la presión en  $\text{cm H}_2\text{O}$ , preparando histogramas para compararlos con la función de densidad probabilística de Rayleigh.

## INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	6
1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL TANQUE DE OLAS.....	6
1.1 Aspectos generales.....	6
1.2 Descripción del equipo vibrador.....	14
1.3 Diseño del dispositivo generador de olas.....	16
1.4 Diseño del mecanismo de conexión Vibrador-Generador.....	21
1.5 Diseño del canal de pruebas y absorbedor de energía.....	24
CAPÍTULO 2.....	30
2. CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO.....	30
2.1 Construcción del dispositivo generador de olas.....	30
2.2 Construcción del mecanismo de conexión Vibrador-Generador.....	33
2.3 Construcción y montaje de las instalaciones.....	36
CAPÍTULO 3.....	41
3. PRUEBAS DE OLAS GENERADAS.....	41
3.1 Cuantificación de la eficiencia del sistema absorbedor de olas.....	41
3.2 Medición de calidad en olas senoidales.....	48
3.3 Relación Carrera del generador / Amplitud de ola.....	54
3.4 Generación de olas irregulares.....	55
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES.....	61
BIBLIOGRAFIA.....	62
ANEXOS.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Características de la ola .....	6
Figura 1.2 Teoría del generador de olas planas. Movimientos del generador de ola tipo pistón y flap .....	10
Figura 1.3 Relación de teoría de generación aplicada al proyecto actual, h= 20cm .....	10
Figura 1.4 Relación de teoría de generación aplicada al proyecto actual, h= 40cm .....	11
Figura 1.5 Potencia media adimensional en función de la profundidad del agua para los fabricantes de onda de pistón y flap .....	13
Figura 1.6 Fuerza aplicada sobre el pistón .....	13
Figura 1.7 Vibrador VR5800-BSR y amplificador de potencia .....	14
Figura 1.8 Vibrador rotado 90° impulsando a la mesa vibratoria .....	16
Figura 1.9 Generador de olas tipo pistón .....	18
Figura 1.10 Panel de acrílico, t: 9mm .....	19
Figura 1.11 Armazón de aluminio .....	19
Figura 1.12 Partes del Generador .....	19
Figura 1.13 Mecanismo de conexión Vibrador-Generador .....	21
Figura 1.14 Detalle del punto de rotación .....	21
Figura 1.15 Base del mecanismo de conexión Vibrador-Generador .....	21
Figura 1.16 Sistema de conexión .....	22
Figura 1.17 Diseño de brazo multiplicador .....	23
Figura 1.18 Sección Transversal de a viga .....	23
Figura 1.19 Tanque de pruebas y base .....	25
Figura 1.20 Sistema de ajuste y protección del tanque .....	27
Figura 1.21 Absorbedor de energía .....	28
Figura 1.22 Diseño completo del tanque de olas .....	29
Figura 2.1 Armazón de aluminio .....	30
Figura 2.2 Rodamientos lineales de bola NTN, modelo KH2030 .....	32
Figura 2.3 Ensamble del generador de olas .....	32
Figura 2.4 Punto de rotación de la viga basculante .....	33

Figura 2.5	Ensamble de sistema de conexión.....	35
Figura 2.6	Ensamble y acoplamiento del sistema de conexión .....	36
Figura 2.7	Base del tanque.....	37
Figura 2.8	Tanque de vidrio templado .....	38
Figura 2.9	Absorbedor de energía .....	39
Figura 2.10	Tanque de olas para el Laboratorio de Ingeniería Naval.....	40
Figura 3.1	Esquema de ubicación de tubos Pitot en el tanque de pruebas.....	42
Figura 3.2	Curva de calibración para el equipo de medición.....	42
Figura 3.3	Ejemplo de la inclinación del absorbedor.....	43
Figura 3.4	Resultados de ola única, con absorbedor a 90°.....	44
Figura 3.5	Resultados de ola única, con absorbedor a 45°.....	44
Figura 3.6	Resultados de ola única, con absorbedor a 30°.....	45
Figura 3.8	Perfil de la ola con absorbedor a 45° a diferentes instantes de tiempo .....	46
Figura 3.7	Perfil de la ola con absorbedor a 90° a diferentes instantes de tiempo .....	46
Figura 3.9	Perfil de la ola con absorbedor a 30° a diferentes instantes de tiempo .....	47
Figura 3.10	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 51 ....	49
Figura 3.11	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 35 ....	49
Figura 3.12	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 35 ....	50
Figura 3.13	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 52 ....	50
Figura 3.14	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 35 ....	51
Figura 3.15	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 26 ....	51
Figura 3.16	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 50 ....	52
Figura 3.18	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 27 ....	52
Figura 3.17	Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 36 ....	53
Figura 3.19	Error cuadrático de la media en olas senoidales.....	54
Figura 3.20	Altura de ola/ carrera vs profundidades relativas .....	55
Figura 3.22	Registro temporal de la presión a frecuencias 1.0 – 2.0 Hz .....	56
Figura 3.21	Registro temporal de la presión a frecuencias 0.5 – 1.5 Hz .....	56
Figura 3.23	Registro de la presión a frecuencias 1.5 – 2.5 Hz.....	57
Figura 3.24	Cálculo de máximos locales para frecuencias 0.5 – 1.5 Hz.....	57

Figura 3.25 Cálculo de máximos locales para frecuencias 1.0 – 2.0 Hz.....	58
Figura 3.26 Cálculo de máximos locales para frecuencias 1.5 – 2.5 Hz.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Especificaciones el vibrador VR5800 .....	15
Tabla 1.2 Comparación entre generadores de olas tipo flap y pistón .....	17
Tabla 1.3 Resultados de brazo multiplicador en el mecanismo.....	22
Tabla 1.4 Resultados de análisis de flexión de vigas .....	23
Tabla 1.5 Datos considerados para el panel de vidrio.....	26
Tabla 1.6 Resultados de análisis de flexión de planchas .....	26
Tabla 2.1 Elementos del sistema de deslizamiento .....	31
Tabla 2.2 Elementos del mecanismo de conexión vibrador – generador .....	34
Tabla 2.3 Longitudes de tramos de ángulos de 40x3 mm para un tramo .....	37
Tabla 2.4 Dimensiones los paneles de vidrio .....	38
Tabla 3.1 Ubicación de los Tubos Pitot.....	41
Tabla 3.2 Resumen de aproximación por el método de mínimos cuadrados .....	53

## INTRODUCCIÓN

En el área de Ingeniería Naval se presentan situaciones complejas relacionadas con el comportamiento de sistemas en olas. En el 2005, el abastecimiento de combustible a los buques tanqueros en el puerto de Balao, Esmeraldas fue detenido debido a la colisión del buque Santiago con la boya provocado por el fuerte oleaje durante la maniobra (Toro, 2005). En otra área, la generación de la energía undimotriz en Ecuador, energía eléctrica a partir de la energía mecánica creada por el movimiento de las olas, ha sido limitado hasta ahora; su uso puede reducir la dependencia de energías fósiles, pero ante su complejidad, se necesita una infraestructura adecuada para su estudio antes de la implementación de estos sistemas (Santos, 2017). Finalmente, el desarrollo de la maricultura en Ecuador, es decir, cultivos en jaulas marinas, será beneficiado al analizar las condiciones en la que trabajarán estos sistemas durante su vida útil que serán instaladas en diferentes sitios costeros (EP, 2016) y de esta forma evitar la sobre simplicidad en su diseño. Son algunas de las aplicaciones que pueden ser desarrolladas con el estudio de la respuesta a la acción de olas.

El equipo utilizado para simular el comportamiento del mar dentro de un entorno controlado es el tanque de olas. Este equipo generador de olas se integra por el dispositivo generador de olas, tanque de pruebas y a esto se le incluye un componente para la absorción de la ola al final del canal. El dispositivo generador de olas debe ser seleccionado tal que permita reproducir con la precisión adecuada el medio deseado. El canal de pruebas debe tener las dimensiones convenientes para realizar las pruebas experimentales con los modelos de buques disponibles en el Laboratorio. Otro elemento es el absorbedor de energía proveniente de las olas, se lo sitúa al extremo del canal con la finalidad de evitar la reflexión de olas y de esta forma no afecte la calidad de olas generadas.

El tipo de dispositivo generador de olas depende de la naturaleza de las condiciones de mar que se desea simular. Los dispositivos más conocidos para generar olas son el

pistón, la cuña y el flap (Dean & Dalrymple, 1991). La selección de estos dispositivos depende de algunos parámetros, como lo son la dirección del movimiento, facilidad de construcción y, sobre todo capacidad de generar olas a diferentes frecuencias y formas. El pistón es capaz de generar olas de mayor amplitud con menor movimiento, aunque requiere una mayor cantidad de fuerza para hacerlo; la cuña por su parte es la menos estudiada analítica y experimentalmente debido a la dificultad de presentar una teoría con todas las variedades de formas de la cuña (Rytkonen & Granholm, 1989). El flap requiere mayor movimiento, pero a la vez menor fuerza para generar olas. Adicionalmente, se deben considerar las variables de diseño como la fuerza del equipo vibrador, carrera del dispositivo, profundidad del canal, la amplitud y longitud de ola.

El comportamiento del mar es aleatorio, por lo que resulta imprescindible tener a disposición un canal generador de olas capaz de reproducir estas condiciones. La ESPOL cuenta con un canal generador de olas en la FICT que incluye un mecanismo de movimiento formado por un motor de engranaje, convirtiéndose en un movimiento armónico a través de una placa de desplazamiento, generando olas superficiales senoidales. Edinburg Design (Productos: Edinburg Design , 2016) pone a disposición canales de olas con flaps y pistones como dispositivos generadores de olas. Los generadores de olas con flaps son ideales para generar olas oceánicas en aguas profundas, mientras que los generadores de olas de pistón son adecuados para generar ondas de aguas poco profundas para la investigación de ingeniería costera y su dispositivo generador puede ser ubicado en cualquier lugar del tanque. Cabe recalcar que cualquiera de los dos tanques genera olas de tipo senoidal y randomicas. En nuestra universidad se necesita de un tanque para estudiar simplificadaamente la respuesta de olas senoidales y randomicas, pudiendo simular el oleaje tanto en zonas costeras como en zonas profundas, a diferencia de los productos existentes en el mercado, por lo que se propone diseñar un tanque de olas de costo reducido, adaptando a su funcionalidad equipos existentes en el laboratorio de Ing. Naval.

## OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un tanque de olas para el estudio del comportamiento en el mar de estructuras flotantes, utilizando el movimiento del vibrador del laboratorio de Ingeniería Naval.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Elegir el dispositivo generador de olas que presente mayor eficiencia y capacidad para producir las olas deseadas.
- Construir el mecanismo de conexión vibrador-generador que se adapte mejor a los requerimientos y optimice los recursos disponibles en el laboratorio.
- Incluir componentes en el tanque de pruebas con la finalidad de absorber la energía producida por las olas y eliminar la reflexión de olas.
- Realizar pruebas con olas senoidales y aleatorias para comprobar la eficiencia del sistema.

## METODOLOGÍA

Para llegar al diseño y finalmente construcción del tanque de olas se debe seguir una serie de pasos que aseguren su funcionalidad. El trabajo comienza con la selección de las dimensiones transversales del tanque tomando en cuenta la aplicabilidad del proyecto. Luego se elige el dispositivo generador de olas considerando las características del equipo que lo va a impulsar y la capacidad de generar las olas deseadas. Este mecanismo debe satisfacer una serie de condiciones tales como la inercia por vencer, reflexión de olas, mantenimiento, facilidad de regulación y movilidad. A continuación, se debe diseñar la conexión entre el equipo vibrador y el dispositivo generador de tal forma que se pueda incrementar el desplazamiento teniendo en cuenta la limitación de fuerza disponible, regular con facilidad el tipo de movimiento, y sea sencillo y manipulable. Además, se requiere de un artefacto para absorber la energía generada por la ola de tal manera que se pueda controlar la reflexión. Para la construcción del equipo se deben considerar materiales resistentes al agua, que soporte movimiento oscilatorio y las fuerzas aplicadas, pero a la vez ligeros. Finalmente, se realizan pruebas a las olas generadas en las diferentes condiciones para comprobar la efectividad del diseño.

## BENEFICIOS

Gran parte de los tanques de olas existentes en laboratorios académicos provienen de grandes diseñadores. En este trabajo se propone el diseño y construcción de un tanque de olas de bajo costo en comparación a los existentes en el mercado, aprovechando los recursos disponibles en el laboratorio de Ingeniería Naval. Se beneficiará directamente a los estudiantes de la carrera, ya que se tendrá disponibilidad completa del mismo, pudiendo adaptarse a las pruebas experimentales con las condiciones requeridas, tales como olas regulares e irregulares, a diferente amplitud y longitud.

## HIPOTESIS

El dispositivo generador produce olas requeridas para el estudio del comportamiento en el mar de buques y otras estructuras flotantes.

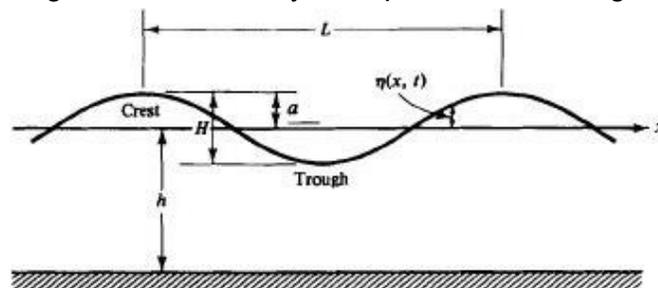
## CAPÍTULO 1

### 1. DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO DEL TANQUE DE OLAS

#### 1.1 Aspectos generales

Para estudiar experimentalmente el comportamiento en el mar de estructuras flotantes, es necesario reproducir el oleaje en condiciones específicas y en ambientes controlados. Para producir olas senoidales, se requiere seleccionar la altura y longitud de ola, mientras que para generar olas randomicas son necesarias la banda de frecuencias y la amplitud del nivel de la densidad espectral de aceleración ( $g^2/Hz$ ). En el caso del laboratorio de Ingeniería Naval, se requieren desarrollar pruebas experimentales con cuerpos de entre 20 a 30 cm de longitud por lo que se establece como requerimiento de diseño, generar olas con longitud entre 40 y 150 cm, con altura máxima de 20 cm y con una profundidad máxima del canal de pruebas de 45 cm. El tanque a construir debe cumplir dichos requerimientos.

Los parámetros de la ola a generar (ver Figura 1.1), dependen de la frecuencia, del desplazamiento del generador de olas y de la profundidad del agua en el canal.



**Figura 1.1 Características de la ola**

**FUENTE: Dean & Dalrymple, 1991, figura 1.1, pag 3**

En la figura 1.1 se identifican las siguientes variables:

- $\lambda$ : longitud de ola

- $H$ : altura de ola, igual al doble de la amplitud,  $a$ ,
- $h$ : profundidad de agua en el canal
- $\eta(x,t)$ : perfil de la ola generada,  $y$ ,
- $T$ : período

Existe una relación entre la longitud de ola y el período, cuanto más largo es el período de onda, mayor es su longitud para una profundidad de agua determinada. Esta relación se llama la relación de dispersión y describe la celeridad ( $C$ ) de propagación de un campo de olas en función de la longitud y de la profundidad del agua. (Dean & Dalrymple, 1991)

$$C = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{\lambda}}, y, \quad (1.1)$$

$$\omega = \sqrt{gk \tanh kh} \quad (1.2)$$

Para aguas profundas, la ecuación se simplifica, pudiendo relacionar la frecuencia con el número de ola,  $k = 2\pi / \lambda$

$$C = \sqrt{\frac{g}{k}}, y, \quad (1.3)$$

$$\omega = \sqrt{kg} \quad (1.4)$$

En aguas someras, la celeridad y la frecuencia se ven influenciadas por la baja profundidad, relacionándose de la siguiente forma en el caso extremo cuando  $h$  es muy pequeño.

$$C = \sqrt{gh}, y, \quad (1.5)$$

$$\omega = k\sqrt{gh} \quad (1.6)$$

De manera que, al aumentar la profundidad del agua, para una longitud de ola predeterminada, aumenta su frecuencia.

### Tipos de generadores

Existen algunos tipos generadores de olas que se describen a continuación, y se diferencian en su forma y movimiento. (Straub, 1953)

- **Pistón:** Se compone de una pieza accionada por un movimiento de traslación horizontal, generalmente paralelo a la superficie del agua. Este dispositivo produce mejores resultados en el caso de olas largas en proporción a la profundidad, es decir, aguas someras.
- **Flap:** Consiste en una superficie plana rígida rotando respecto a un eje localizado en la base del tanque o a cierta distancia de esta. El movimiento impartido al agua es nulo en la base del canal, simulando perfectamente al perfil de velocidad de la ola en aguas profundas.
- **Émbolo triangular:** Tiene sección transversal en forma de cuña y, actúa con movimiento vertical, alternando inmersión y emersión. Son diseñados para generar olas en una sola dirección. La superficie inmersa puede variar su ángulo de inclinación, dificultando la presentación de una teoría para este tipo de generadores.
- **Serpiente:** Consiste en una serie de pequeños generadores tipo flap de la misma altura, oscilando en el mismo eje. Es posible generar olas propagadas en diferentes direcciones dependiendo del movimiento del generador.

Sin embargo, los tipos de generadores comúnmente usados son pistón y flap, siendo eficientes para producir olas de cresta larga y corta.

### Teoría de generación de olas

El movimiento de la ola inducida y la fuerza requerida para mover el generador pueden ser determinados razonablemente aplicando teoría de ola lineal. La teoría de generación de ondas a través de un dispositivo supone que el volumen desplazado por el generador

es el mismo que el de la zona de la cresta de ola (Dean & Dalrymple, 1991). El volumen de agua en la cresta de la ola por unidad de dimensión transversal es:

$$\int_0^{L/2} (H/2) \sin kx dx = \frac{H}{k} \quad (1.7)$$

Considerando que la carrera del generador de olas es  $S$  y la profundidad del canal  $h$  (ver Figura 1.1), el volumen desplazado para el generador tipo pistón es  $Sh$  e igualando los dos volúmenes, se obtiene la siguiente relación:

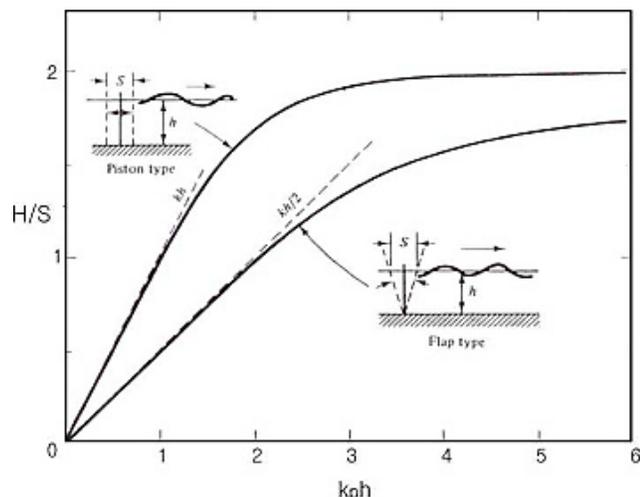
$$\left(\frac{H}{S}\right)_{piston} = kh \quad (1.8)$$

Esta ecuación también puede ser expresada como:

$$H = Sh \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.9)$$

En el generador tipo flap, el volumen desplazado es  $hS/2$  y la relación altura de ola / carrera es:

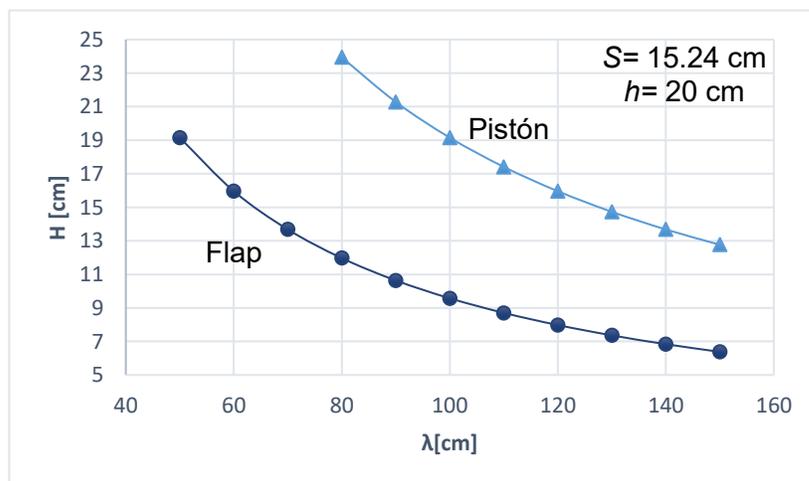
$$\left(\frac{H}{S}\right)_{flap} = \frac{kh}{2} \quad (1.10)$$



**Figura 1.2 Teoría del generador de olas planas. Movimientos del generador de ola tipo pistón y flap**

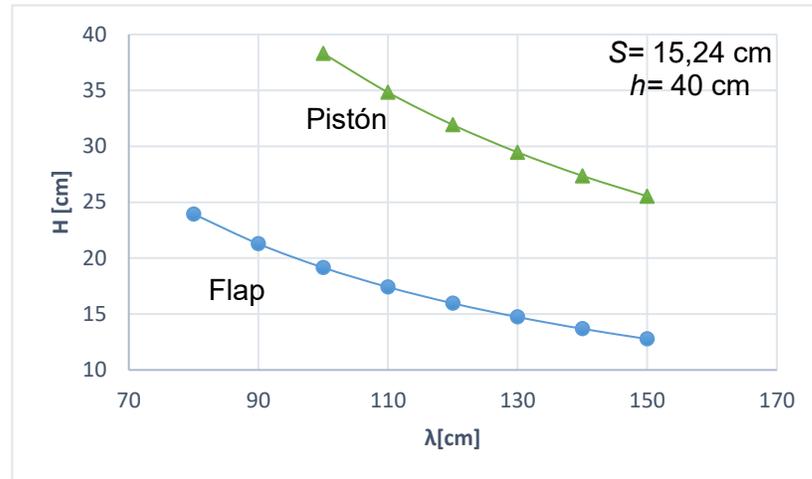
**FUENTE: Dean & Dalrymple, 1991, figura 6.2, pag 172**

Aplicando estas relaciones al canal de olas requerido, con un número máximo de ola, se puede determinar en qué orden de relación  $H/S$  se opera. Para un valor de carrera del generador de ola,  $S = 15.24$  cm y profundidad del canal mínima,  $h = 20$  cm, se obtiene la siguiente tendencia entre el parámetro  $k_p h$  y altura de ola, donde  $k_p$  es el número de ola generada.



**Figura 1.3 Relación de teoría de generación aplicada al proyecto actual,  $h = 20$  cm**

Mientras que en la Figura 1.4 se presenta la misma grafica cambiando la profundidad del canal,  $h= 40$  cm.



**Figura 1.4** Relación de teoría de generación aplicada al proyecto actual,  $h= 40$ cm

Es decir, con el generador tipo pistón se podrá alcanzar la amplitud de la ola requerida con una carrera de 15.24 cm.

#### Fuerza ejercida sobre el pistón

Una forma de determinar la fuerza requerida para generar olas es a partir del flujo de energía desde el generador, partiendo de las dimensiones transversales del canal y la velocidad de la ola o celeridad. Según (Dean & Dalrymple, 1991), la potencia requerida para generar olas se puede obtener a partir del flujo de energía, que es proporcional a la altura de ola propagada, de acuerdo con la siguiente relación:

$$P = ECn, \quad (1.11)$$

donde:

- $E$ : es la energía total promedio por unidad de longitud transversal del tanque [ $\text{kg cm}^2/\text{s}^2$ ], y está dada por:

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda,$$

( 1.12)

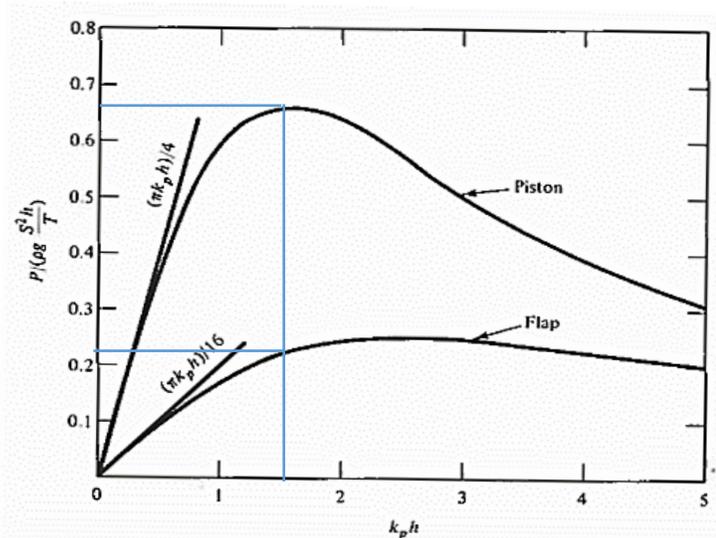
- $C$ : es la velocidad de la ola [cm/s], y,
- $n$ : es un factor de velocidad de la energía transmitida; en agua someras la energía y el perfil viajan a la misma velocidad, mientras que en aguas profundas la energía es transmitida a la mitad de la velocidad del perfil de la ola, y se calcula:

$$n = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right)$$

( 1.13)

De forma gráfica, esta potencia se puede determinar utilizando la Figura 1.5, que presenta la potencia en forma adimensional en función de las profundidades relativas,  $k_p h$ . Para el presente caso se considera una carrera (S) máxima del generador de 15.24 cm, ancho del canal 60 cm y dos valores extremos de profundidad de agua, 20 y 40 cm.

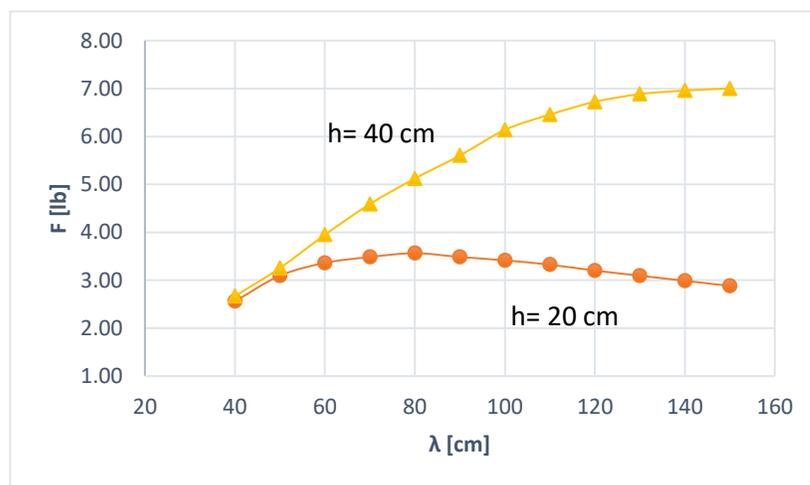
Para obtener valores máximos de la fuerza requerida en el caso del pistón, se entra en la Figura 1.5 con un valor de  $k_p h$  igual a 1.68, correspondiente a  $\lambda = 150$  cm y  $h = 40$  cm, se obtiene un valor de potencia media adimensional de 0.656. Como resultado se tiene una fuerza máxima de 7.00 lb, para una altura de  $h = 40$  cm. Mientras que para el generador tipo flap, dicha fuerza sería 2.45 lb.



**Figura 1.5** Potencia media adimensional en función de la profundidad del agua para los fabricantes de onda de pistón y flap

**FUENTE:** Dean & Dalrymple, 1991, figura 6.4, pag 177

A continuación, en la Figura 1.6 se presenta la fuerza requerida para el rango de longitud de ola, generada por el pistón, para los valores de  $h$  mencionados anteriormente.



**Figura 1.6** Fuerza aplicada sobre el pistón

En forma conservadora el generador tipo pistón va a requerir 7.00 lb de fuerza para generar olas en agua de profundidad de  $h = 40$  cm, con el pistón oscilando con una frecuencia de 1.02 Hz. Las olas serían de 150 cm de longitud y 25.53 cm de altura.

### 1.2 Descripción del equipo vibrador

En el Laboratorio de Ingeniería Naval se dispone de un equipo vibrador marca Vibration Research, modelo VR5800. Este sistema de vibración electrodinámica consiste en un agitador y un amplificador de potencia de acoplamiento directo lineal y controladores de vibración.

En este proyecto, el movimiento generado por el vibrador es utilizado para impulsar un dispositivo generador de olas. Si el movimiento del generador es senoidal, se producen olas regulares; en cambio sí es aleatorio se producirán olas irregulares. Las pruebas senoidales incluyen una frecuencia única, mientras que en las pruebas aleatorias se excitan armónicos con frecuencias en un rango determinado simultáneamente. Para realizar pruebas aleatorias, se debe definir un espectro de la aceleración del movimiento.



**Figura 1.7 Vibrador VR5800-BSR y amplificador de potencia**

**FUENTE: Vibration Research, VR5800-BSR Brochure**

### Especificaciones límites del equipo

El vibrador VR5800 disponible tiene las siguientes características límites de operación:

Característica	Valor	
Fuerza senoidal [lb]	500	Pico - pico
Fuerza aleatoria [lb]	350	RMS aleatoria
Rango de frecuencias [Hz]	DC a 4500	
Aceleración máxima	100g	Sin carga
	50g	5 lb. de carga
	11g	40 lb. de carga
Velocidad máxima [in/s]	85	Pico - pico
Desplazamiento máximo [in]	1.0	Continuo, pico-pico, sin carga
	1.1	Entre interrupciones, pico-pico, sin carga
Potencia requerida [VA]	6000	@208-230V, 1 $\phi$ , 50/60 Hz

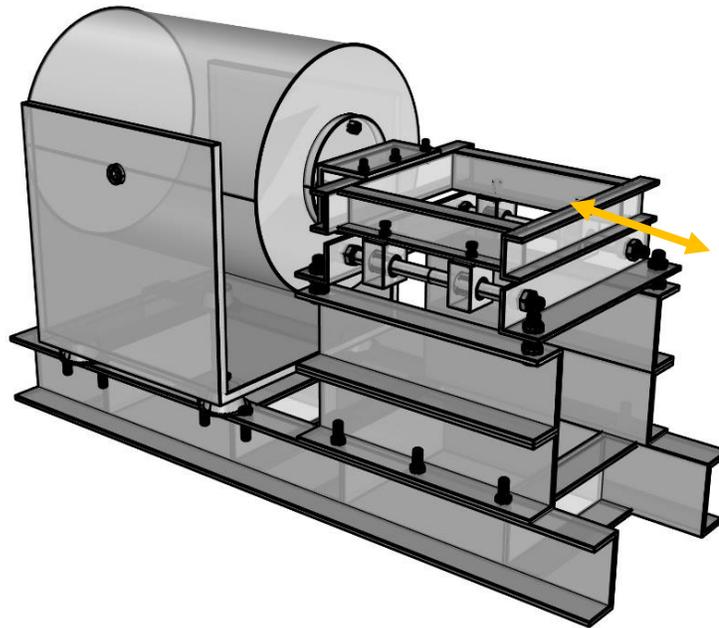
**Tabla 1.1 Especificaciones el vibrador VR5800**

**FUENTE: Products: VR5800-BSR Shakers Systems, brochure**

### Adaptaciones actuales del Vibrador

En la instalación actual, el vibrador VR5800 se lo rota a 90° para trabajar horizontalmente, moviendo una mesa vibratoria que se desliza en un sistema de rodamiento lineales. Tanto el vibrador como la mesa vibratoria descansan sobre perfiles de acero tipo C como se muestra en la Figura 1.8.

En el proyecto actual, el movimiento horizontal de la mesa se lo debe multiplicar para que el generador de olas se desplace los niveles requeridos.



**Figura 1.8 Vibrador rotado 90° impulsando a la mesa vibratoria**

**FUENTE: Moran, 2017, figura 1.3, pag 10**

### **1.3 Diseño del dispositivo generador de olas**

#### **Selección del generador de olas**

A lo largo del tiempo se han diseñado y experimentado diferentes tipos de generadores de olas, aunque muchos de ellos se han descartado y a otros se les han hecho variantes para mejorar sus resultados. A continuación, se presenta una comparación entre los dos dispositivos considerados como potenciales al momento de producir el oleaje deseado en este proyecto.

	<b>FLAP</b>	<b>PISTON</b>
<b>AMPLITUD DE OLAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiente en tanques con mayor profundidad.</li> <li>• Produce olas de amplitud más pequeñas que el pistón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera olas eficientes en canales de poca profundidad.</li> <li>• Olas de mayor amplitud con menor movimiento.</li> <li>• Alta calidad de oleaje generado</li> </ul>
<b>INERCIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es aproximadamente 3 veces menor que la inercia en el pistón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor inercia que vencer por lo tanto se requiere mayor fuerza del vibrador.</li> </ul>
<b>COSTOS / MANTENIMIENTO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su mantenimiento es más fácil debido a que solo se tiene un mecanismo de rotación sumergido.</li> <li>• Menor costo, menor número de piezas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su mecanismo es complejo, guiado y suspendido</li> <li>• Piezas resultan más caros que los necesarios para tipo flap.</li> </ul>
<b>PERTURBACIONES</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En olas largas, son del orden de magnitud del 15 % de la amplitud de onda</li> <li>• En olas cortas, las deformaciones superficiales transitorias son dos veces más pequeñas en las inmediaciones del flap y aproximadamente tres veces más pequeñas a cierta distancia de esta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En olas largas, verticalmente la amplitud de las perturbaciones es aproximadamente 7 veces menor que las de las olas generadas.</li> <li>• En olas cortas, la amplitud de onda resultante aumenta a distancias del generador de ondas igual a <math>1/4L</math>, <math>5/4L</math>, <math>9/4L</math>, etc., y se reduce a distancias iguales a <math>3/4L</math>, <math>7/4L</math>, <math>11/4L</math>.</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En cualquiera de estos casos, las perturbaciones son insignificantes a una distancia de <math>3h</math> porque a partir de este punto las perturbaciones retienen, como máximo, una centésima parte de su amplitud inicial. (Straub, 1953)</li> </ul>	

**Tabla 1.2 Comparación entre generadores de olas tipo flap y pistón**

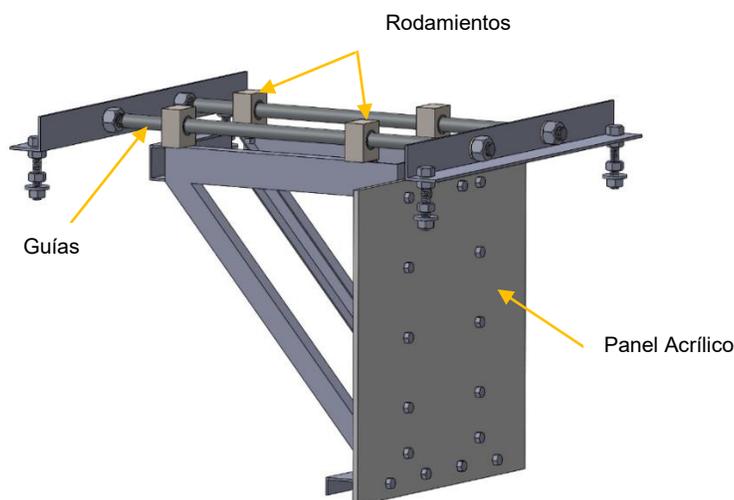
**FUENTE: Gonzalez, 1988, Straub, 1953**

A partir de esta comparación, finalmente se selecciona el dispositivo tipo pistón, pues se busca generar un oleaje de mayor amplitud posible, de mejor calidad, siendo eficientes

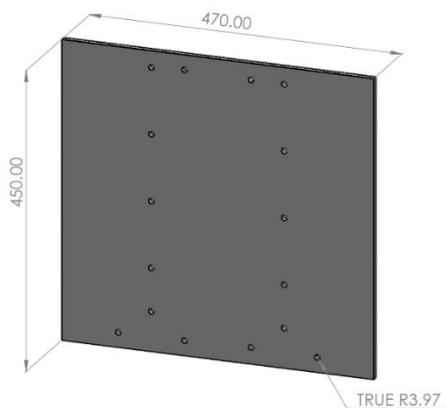
con el espacio y recursos disponibles en el laboratorio de Ingeniería Naval. Adicionalmente, con esta selección se busca de diferenciar del tanque de pruebas de Ingeniería Civil, cuyo generador es tipo flap.

### Generador de olas tipo pistón

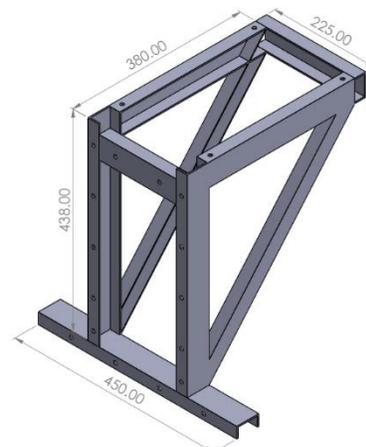
Se lo diseñó para tener la capacidad de ser accionado con el movimiento horizontal del vibrador. Consta de un armazón triangular formado por perfiles C de aluminio, teniendo en el lado frontal una superficie de acrílico, la pantalla, que será el que impulse la masa de agua; en el lado posterior está la conexión con el vibrador que es una pieza que incluye rulimanes para tener libertad de movimiento en dirección vertical. La armazón tiene en su parte superior 4 carcazas de aluminio, que contienen en su interior rodamientos lineales de bola. Estos dispositivos se desplazan sobre ejes de acero de 20 mm de diámetro en dirección horizontal. Las barras están sujetas en sus extremos con ángulos, los cuales forman parte de la fijación del generador a la estructura del tanque y proveen la posibilidad de alineamiento del dispositivo a través de pernos. El generador está diseñado con la finalidad de evitar rotaciones, lo cual produciría olas en dirección inclinada, afectando su calidad.



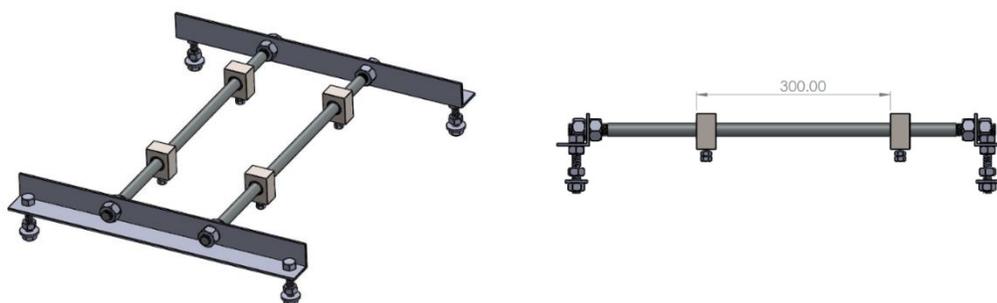
**Figura 1.9 Generador de olas tipo pistón**



**Figura 1.10 Panel de acrílico, t: 9mm**



**Figura 1.11 Armazón de aluminio**



**Figura 1.12 Partes del Generador**

### **Armazón de aluminio del generador**

Es una estructura diseñada de tal manera que sea capaz de vencer la presión ejercida por el agua desplazada, manteniendo su movimiento horizontal alternativo. Está formada con perfiles C de aluminio de 60x25x3 mm, formando una estructura triangular tal que, al ser accionada en la parte posterior con el movimiento oscilatorio del vibrador, evite la deformación del panel de acrílico en la parte inferior, distribuyendo su fuerza. Esta suspendida y guiada con rodamientos lineales, tal como se muestra en la Figura 1.11.

El panel frontal del generador o pantalla construida en acrílico, ajustada mediante pernos de 5/16" al armazón de aluminio, empuja la masa de agua, formando las olas deseadas. Tiene espesor de 9 mm, para evitar deformaciones producto de la presión, ancho de 49 cm para dejar una pequeña holgura en los costados del tanque, la altura de la pantalla puede variar de acuerdo con la profundidad de agua en el tanque y del tipo de pruebas que se deseen realizar. (Ver Figura 1.10)

### **Sistema de guiado y alineación**

Para evitar pérdidas por fricción y desalineamiento, se diseña un sistema guía doble a partir de rodamientos lineales de bola marca NTN, modelo KH2030, de 20 mm de diámetro interior, alojados en cuatro carcasas de aluminio, separadas 30 cm entre sí. Estos rodamientos se desplazan sobre ejes de acero plata, los cuales están soportados en sus extremos por ángulos de acero de 50x4 mm. Las carcasas de aluminio además de alojar a los rodamientos sirven para suspender el armazón de aluminio descrita anteriormente. (Ver Figura 1.12)

Los ángulos de acero ubicados en los extremos de la armazón del generador fijan el dispositivo a la base del tanque de pruebas, formando un anillo estructural y de esta forma soportar todas las cargas desarrolladas. Además, son utilizados para alineación de los rodamientos mediante pernos de 1/2" x 3" de acero inoxidable.

Tanto las carcasas como los ángulos de soporte están ubicados para evitar que la deformación de las barras guía producto de la fuerza a soportar sobrepase el límite de desalineación angular permisible para los rodamientos lineales, que es 15 min de arco. Se realiza un análisis de flexión de vigas con las barras consideradas como empotradas en los extremos, con una separación entre soportes de 60 cm y considerando aplicación puntual de la fuerza en la ubicación de las carcasas, a 15 cm de los extremos. Se obtiene como resultado una rotación máxima de 1.65 minutos de arco, que se desarrolla en el centro de la barra.

#### 1.4 Diseño del mecanismo de conexión Vibrador-Generador

Estructura diseñada para transmitir el movimiento desde el vibrador al generador de olas y su conexión en ambos extremos está compuesta por bocines con rulimanes, y, cojinetes extremos de barra (Rod end bearing). El mecanismo central es una viga C de acero, con punto de rotación formado por una chumacera. Para tener libertad en la separación entre el vibrador y el tanque de pruebas, las conexiones horizontales están formadas por templadores. Todo este aparato de movimiento está soportado sobre una estructura robusta que a su vez está empernada a la base del vibrador.



Figura 1.13 Mecanismo de conexión Vibrador-Generador

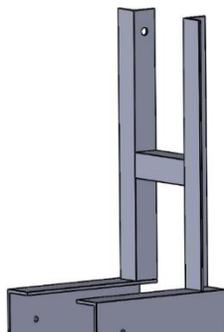


Figura 1.15 Base del mecanismo de conexión Vibrador-Generador

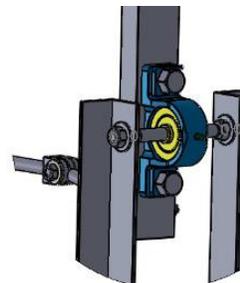
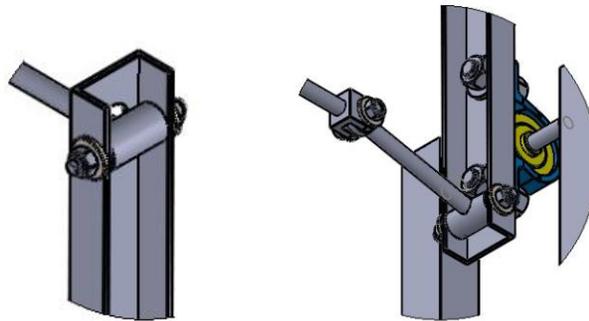


Figura 1.14 Detalle del punto de rotación



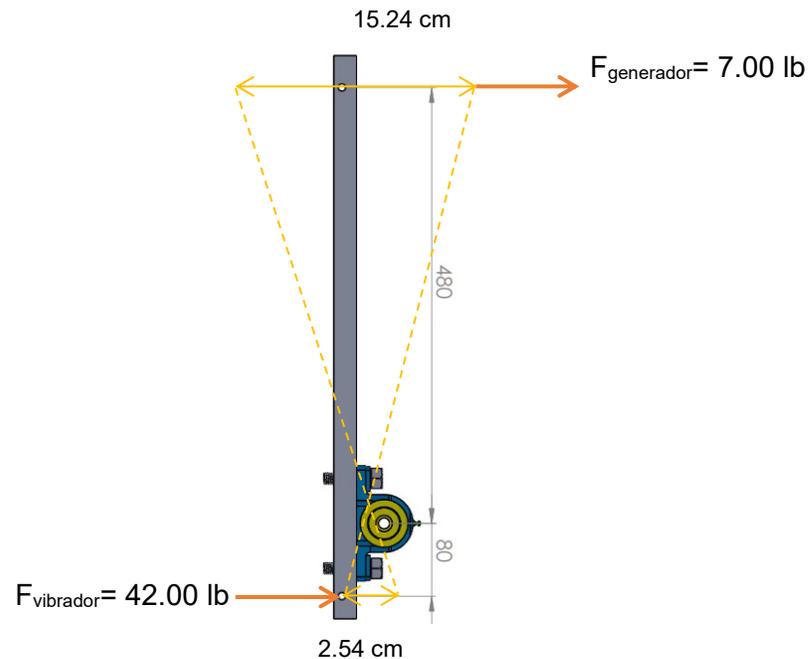
**Figura 1.16 Sistema de conexión**

Debido a que el vibrador tiene un desplazamiento máximo de 1" pico a pico, es necesario multiplicar este desplazamiento para llegar a los requerimientos del generador. Buscando un desplazamiento del generador (S) de 15.24 cm, se selecciona un brazo multiplicador de 6:1, obteniendo los siguientes resultados límites, con el equilibrio entre la carrera para el generador de olas y la fuerza requerida de 7.00 lb para producirla.

	<b>Vibrador</b>	<b>Generador</b>
<b>Desplazamiento [cm]</b>	2.54	15.24
<b>Fuerza [lb]</b>	42.00	7.00

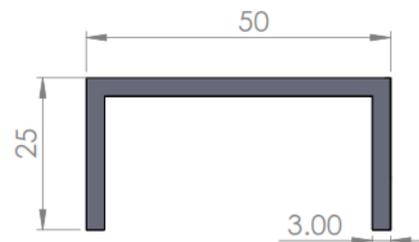
**Tabla 1.3 Resultados de brazo multiplicador en el mecanismo**

La distancia desde el punto de aplicación de la fuerza de vibrador al punto de rotación es de 8 cm, entonces aplicando el brazo multiplicador, desde el punto de rotación hasta la aplicación de la fuerza al generador resultan 48 cm. Una chumacera marca CBM, modelo UCP 201-8 de ½" de diámetro interior forma el punto de rotación del mecanismo, para disminuir la fricción del sistema, rotando a través de un eje de acero inoxidable de ½", sujeta a la base. (Ver Figura 1.17)



**Figura 1.17 Diseño de brazo multiplicador**

Se realiza un análisis de flexión de vigas para conocer los esfuerzos que soporta la estructura, considerándola como viga simplemente soportada en el punto de rotación con momentos flectores aplicados en sus extremos, para la sección transversal establecida (ver Figura 1.18). A continuación, se detallan los resultados considerando las fuerzas presentadas en la Figura 1.17:



**Figura 1.18 Sección Transversal de a viga**

Inercia [cm <sup>4</sup> ]	1.29
M [kgf cm]	152.73
$\sigma$ [kgf/cm <sup>2</sup> ]	112.54
$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	11.03
d [mm]	0.037

**Tabla 1.4 Resultados de análisis de flexión de vigas**

Se obtiene que el esfuerzo desarrollado en la viga está muy por debajo del esfuerzo de fluencia y que la deflexión máxima de la viga es de 0.037 mm.

### **Detalle de la base**

Es importante contar con una estructura de soporte estable, por lo que esta base está diseñada con ángulos de acero de 40x3 mm, ajustando el mecanismo de rotación. A su vez estos ángulos están soldadas a vigas C 100x50x4 mm, con una separación entre de ellas de 125 mm, con la finalidad de que se ajuste a la separación de las vigas C de la base actual del vibrador. (Ver Figura 1.15)

### **Sistema de conexión**

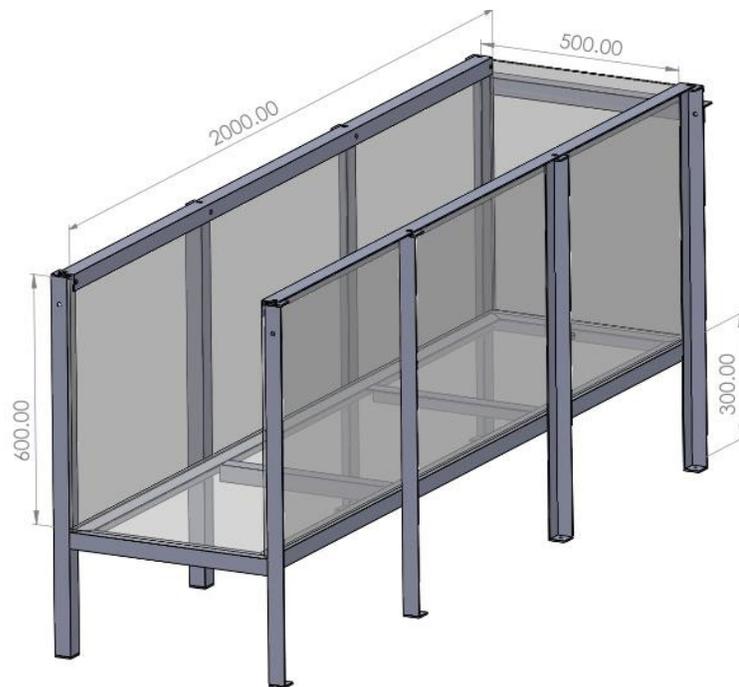
Se diseñan dos dispositivos diferentes para la conexión con la misma función, permitir cierta rotación en dirección lateral del mecanismo descrito con anterioridad. De esta forma se evita esfuerzos al rotar el multiplicador, ya que sus extremos se desplazan verticalmente una pequeña cantidad. Un dispositivo está compuesto con bocines de acero de 17 mm de diámetro interior, los cuales alojan un ruliman en cada extremo, de 17 mm y 8 mm de diámetro exterior e interior respectivamente. El segundo dispositivo de conexión está formado por cojinetes extremos de barra (Rod end bearing), marca SKF, modelo SIKAC y SILKAC 8mm, con rosca izquierda y derecha respectivamente, (Ver Figura 1.16). El sentido de las roscas es importante en este punto, tanto para los bocines como para los cojinetes pues estarán conectados por templadores, los cuales presentan roscas de diferente dirección en sus extremos.

## **1.5 Diseño del canal de pruebas y absorbedor de energía**

El tanque de pruebas en el laboratorio de Ingeniería Naval debe ser capaz de reproducir un estado de mar determinado y el estudiante pueda observar y medir las características

de las olas generadas. Por ello las paredes del tanque se diseñan con vidrio templado con espesor de 8 mm, dimensiones transversales de 60x50 cm y una longitud de 4 m. Para tener facilidad en su construcción, se diseñan tramos de 2 m de longitud.

Para protección del tanque, se completa este diseño con una base formada por ángulos de acero de 40x3 mm, la cual deberá soportar la carga del tanque a su máxima capacidad de agua, distribuida uniformemente en los 8 refuerzos verticales de cada tramo. Los refuerzos de las bases deberán estar colocados de forma que permitan unir los tramos de tanque.



**Figura 1.19 Tanque de pruebas y base**

Los soportes de la base detallada en el punto anterior deben situarse a una distancia tal que puedan soportar la presión generada por el agua, pero también estar ubicadas a una distancia prudente para que se pueda observar y estudiar el oleaje generado. Cada soporte está ubicado con una separación máxima de 72.8 cm y 50 cm, longitudinal y

transversal, respectivamente. Considerando en forma simplificada los longitudinales como vigas con soportes, se obtiene que las reacciones están entre 44.48 y 67.11 kg.

Además, se consideran los elementos verticales como vigas empotradas en el punto de conexión con la cama, aplicando una carga uniformemente distribuida debido a la presión del agua, se obtiene que el esfuerzo calculado es 68.94 N/mm<sup>2</sup> y la deflexión es 0.22 mm.

Se realiza un análisis de flexión de planchas para conocer el esfuerzo que soporta el vidrio templado, considerando un panel como simplemente soportado entre los refuerzos de la base, bajo carga uniforme ejercida por una profundidad de agua de 40 cm. A continuación, se detallan los datos considerados y resultados de deflexión y esfuerzo máximo en el centro de un panel de vidrio.

<b>P [kg/m<sup>2</sup>]</b>	3174.60
<b>a [m]</b>	0.60
<b>b [m]</b>	0.42
<b>E [kg/m<sup>2</sup>]</b>	7.32E+09
<b>v</b>	0.22

**Tabla 1.5 Datos considerados para el panel de vidrio**

**FUENTE: Euroglas, Ficha Técnica Cristal Templado**

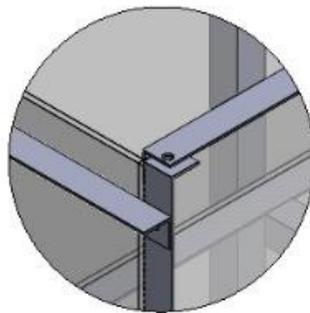
<b>w [mm]</b>	2.18
<b><math>\sigma_{\text{Timoshenko}}</math> [N/m<sup>2</sup>]</b>	18.64
<b><math>\sigma_{\text{Vidrio}}</math> [N/m<sup>2</sup>]</b>	99.93
<b>FS</b>	5.36

**Tabla 1.6 Resultados de análisis de flexión de planchas**

El esfuerzo obtenido en el análisis está por debajo del esfuerzo de fluencia del vidrio templado, con un factor de seguridad de 5.36, además se obtiene un desplazamiento máximo en el centro de la plancha de 2.18 mm.

### Ajustes de seguridad de los vidrios

Para evitar que los vidrios laterales se muevan debido a las presiones ejercidas cuando se trabaja a su máxima capacidad y cuando el tanque está vacío, es necesario contar con un sistema de ajuste. Por ello, se adaptaron ángulos de acero de 40x3 mm por dentro y fuera del tanque, longitudinal y transversalmente, y con pernos de plástico se aseguran los vidrios contra las vigas verticales.



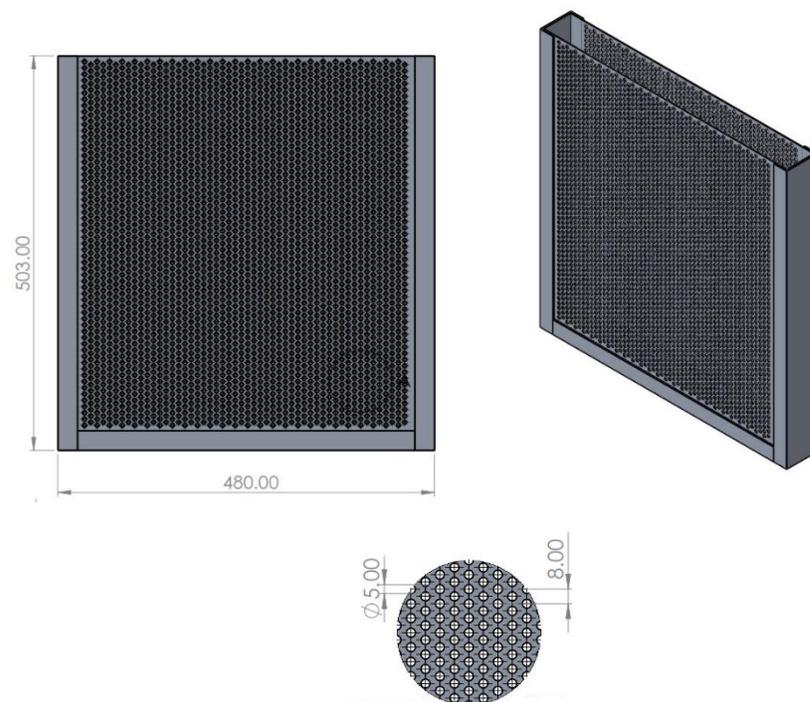
**Figura 1.20 Sistema de ajuste y protección del tanque**

### Diseño del absorbedor de energía

En los tanques de olas se presenta el fenómeno de refracción, que se produce por el choque de la ola con la pared transversal al final del canal. La refracción perturba el oleaje generado, afectando su calidad y por ello se debe disponer de un dispositivo capaz de absorber la energía producida por la ola inducida. De esta forma se maximiza la repetibilidad de los experimentos y reduce la acumulación de energía de onda no deseada en el tanque.

Existen dos tipos de absorbedores en tanques de pruebas, activos y pasivos. La absorción activa implica la generación de olas al final del canal donde el actuador debe estar en fase con la fuerza excitadora. Mientras que los pasivos amortiguan las ondas que llegan al final del canal, variando la profundidad del agua o filtrando la ola (Guillouzouic, 2014).

Por facilidad en la manipulación del dispositivo y espacio disponible en el canal, se selecciona un absorbedor pasivo y su diseño consiste en dos planchas perforadas, con 0.9 mm de espesor y 5 mm de diámetro, formando una estructura sándwich (Ver Figura 1.21). La distancia entre centros de las perforaciones circulares es 8 mm, con patrón es escalonado. El porcentaje de orificios con respecto a la sección sólida de la plancha es de 68%. En la sección de pruebas se va a analizar la efectividad del dispositivo generador.



**Figura 1.21 Absorbedor de energía**

A continuación, se presenta el diseño completo del tanque de olas.

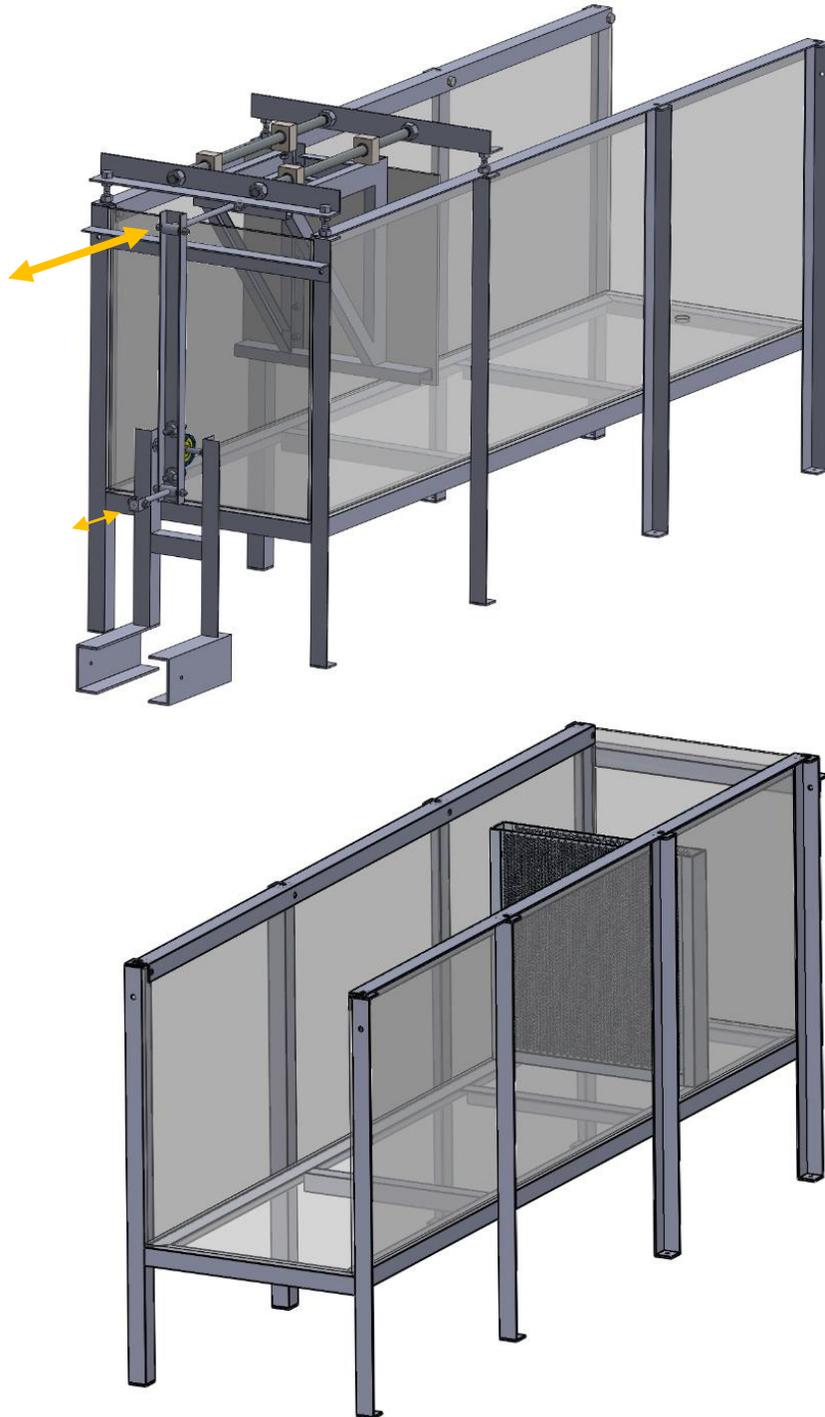


Figura 1.22 Diseño completo del tanque de olas

## CAPÍTULO 2

### 2. CONSTRUCCIÓN DEL PROYECTO

#### 2.1 Construcción del dispositivo generador de olas

##### Soldadura del armazón de aluminio

La estructura que forma el dispositivo generador que soporta movimiento lineal alternativo opera sumergida en el agua, y por ello se lo construye con aluminio. Todo el armazón está construido con vigas C 600 x 250 x 3 mm, formando un triángulo para que la fuerza actuante horizontal se distribuya en diferentes puntos y aporte firmeza al sistema que tiene en el frente al panel de acrílico. La soldadura debe ser adecuado para el material de las vigas.

En la parte posterior, la armazón de aluminio se atornilla con la conexión al mecanismo multiplicador de movimiento, y en la parte frontal se ajusta la pantalla de acrílico. En la parte superior, se ensamblan las cajas de aluminio con los rodamientos lineales, y se conectan con pernos de acero.

Cuando la fase de soldadura está completa y debido a que su material no es corrosivo, no es necesario un plan de pintura, sino que es suficiente en darle un acabado con la pulidora.



Figura 2.1 Armazón de aluminio

### Construcción del sistema de guiado

Este sistema es el más complejo del generador de olas y, a continuación, se detallan los elementos que lo conforman:

Elementos	Dimensiones	Cantidad
Ejes de acero plata	20 mm de diámetro 70 cm de longitud	2
Carcasas de aluminio	44 mm de ancho 55 mm de altura 30 mm de profundidad Agujero interior 28 mm	4
Rodamientos lineales de bola (Marca NTN, modelo KH2030)	28 mm de diámetro exterior 20 mm de diámetro interior 30 mm de largo 1050 N Carga Dinámica 880 N Carga Estática	4
Ángulos de acero	50 x 4 mm 58 cm de longitud	2

**Tabla 2.1 Elementos del sistema de deslizamiento**

Las carcasas que contienen los rodamientos lineales son maquinadas a partir de bloques de aluminio, y en la base se realizan agujeros para ajustar con pernos de 5/16" al armazón de aluminio. En el centro se taladra un agujero de 28 mm de diámetro para alojar a los rodamientos lineales, permitiendo ajustarse simplemente a presión. La estructura se desliza sobre ejes de acero de 20 mm de diámetro, separadas entre sí 20 cm, las que tienen en cada extremo una rosca de 6 cm de longitud, disminuyendo el diámetro a  $\frac{3}{4}$ ", con la finalidad de que pueda ser ajustada con tuercas comerciales a los ángulos de acero.



**Figura 2.2 Rodamientos lineales de bola NTN, modelo KH2030**

### **Ensamble**

Al ensamblar el sistema es importante verificar la alineación de las cajas de aluminio, para evitar el deterioro de los rodamientos lineales, el desgaste de las barras de acero, la perturbación del movimiento oscilatorio, y el incremento de resistencia al movimiento. La ubicación de la pantalla de acrílico puede ser modificada, de acuerdo a la profundidad del agua en el canal con la que se vaya a trabajar.

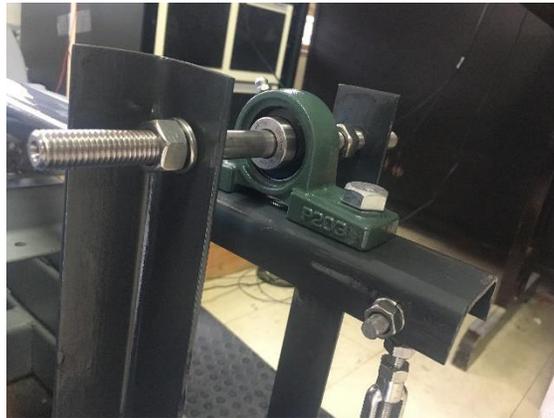


**Figura 2.3 Ensamble del generador de olas**

## 2.2 Construcción del mecanismo de conexión Vibrador-Generador

### Viga basculante

Construida con una viga C de acero de 50x25x3 mm y 560 mm de longitud, en cuyos extremos se adaptan los sistemas de conexión mencionados anteriormente. Sobre esta viga se fija una chumacera de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, de tipo no autoalineable para mantener el alineamiento de los elementos. La chumacera rota a través de un eje de acero inoxidable de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro y longitud de 22 cm, y en cada uno de sus extremos se maquinan roscas de 3 cm de longitud para que se ajuste a la base de este sistema.



**Figura 2.4 Punto de rotación de la viga basculante**

### Adecuación de templadores y uniones

Como se explicó en la sección de diseño, debido a la naturaleza del movimiento de esta estructura, se adecuaron dos sistemas que dan libertad de movimiento vertical al pivote, en cada extremo. Los elementos incluidos se detallan a continuación:

Elementos	Dimensiones	Cantidad
Rulimanes NTN, modelo 698Z	19 mm de diámetro exterior 8 mm de diámetro interior 6 mm de ancho	4
Bocines de acero	22 mm de diámetro exterior 19 mm de diámetro interior 40 cm de largo	2
Cojinetes de barra SKF, modelo SIKAC y SILKAC	8 mm de diámetro interior	2
Ejes de acero plata	8 mm de diámetro	4
Templadores de acero inoxidable	8 mm de diámetro	2

**Tabla 2.2 Elementos del mecanismo de conexión vibrador – generador**

Los bocines son fabricados a partir de ejes de acero, maquinando en cada extremo una zona para ajustar a presión un ruliman, los que rotan alrededor de un eje de 8 mm de diámetro. En la cara externa de cada bocín se sueldan 2 tuercas que sirven para adaptar a los templadores.

La otra conexión está formada por cojinetes de barra, este tipo de cojinetes son autolineables. Comercialmente se los consigue con rosca izquierda y derecha, debido a que los templadores también constan de tornillos con roscas en doble sentido. Una conexión se adapta en un extremo al vibrador y en el otro al a la viga basculante, mientras que la otra conexión se adapta al generador.



**Rulimanes y Cojinetes de barra SKF**



**Figura 2.5 Ensamble de sistema de conexión**

### **Ensamble y acoplamiento a la mesa vibratoria y generador**

Debido a la fuerza en el movimiento del sistema, la base de conexión se la fabrica de forma robusta, a partir de ángulos de acero de 40 x 3 mm en los que se fija el eje de rotación de pivote. Con la ayuda de escuadras se rigidiza los ángulos lateralmente, conectándolos a las vigas C de 100x50x4 mm sobre las que se asienta la estructura. Finalmente, el conjunto se acopla a la base del vibrador con pernos de acero inoxidable de ½".

El ensamble del dispositivo se lo realiza en el siguiente orden:

1. Se ajustan ambas bases dejando una holgura en los pernos de conexión.
2. A la viga C que forma parte del pivote se coloca un mecanismo de conexión en cada extremo, cuidando las roscas izquierda y derecha.
3. Se coloca la chumacera ajustada a la viga, entre los dos ángulos de la base y se atraviesa el eje, asegurándolo con tuercas y anillos de presión.
4. Los templadores se colocan en cada extremo, conectando el pivote a la mesa vibratoria y al generador de olas, ajustándolo hasta que el pivote quede vertical, ya que será el punto de inicio de la oscilación.
5. Una vez que todos los elementos estén en su lugar, se aprietan todas las tuercas.



**Figura 2.6 Ensamble y acoplamiento del sistema de conexión**

## **2.3 Construcción y montaje de las instalaciones**

### **Construcción de la base del tanque**

Las bases que soportan el tanque de pruebas están fabricadas con ángulos de acero de 40x3 mm, con ocho tramos verticales, a los que se suelda un marco que soporta el panel de vidrio del fondo. Como se menciona en el capítulo anterior, los tanques están

diseñados con tramos de dos metros de longitud. A continuación, se detallan las longitudes de los tramos de los ángulos y la cantidad que se requiere para cada base:

DETALLE	CANT.	LONG. [mm]
Longitudinales bases	2	2000
Transversales bases	2	500
Transversales bases soporte	2	420
Longitudinales Seguridad	2	1980
Transversales Seguridad	2	580
Escuadras	8	220
Verticales de soporte	8	910

**Tabla 2.3 Longitudes de tramos de ángulos de 40x3 mm para un tramo**

Las bases están construidas de tal manera que es fácil unir o separar los tramos de tanque, de acuerdo a la naturaleza de los experimentos a realizar. En cada extremo de los verticales de soporte se sueldan platinas de 4 mm de espesor, cubriendo el ángulo. Estas platinas sirven de soporte en la parte inferior para los niveladores y en la parte superior para ajuste del longitudinal de seguridad de los vidrios en ambas direcciones.



**Figura 2.7 Base del tanque**

### Tanque de pruebas

El tanque de pruebas se construye con paneles de vidrio templado. Como se menciona en el ítem anterior, los tanques de pruebas se construirán en tramos, por lo que se debe dejar una adecuada tolerancia entre los paneles longitudinales de cada tanque para que la cantidad de silicón aplicado sea suficiente para evitar fugas de agua. En el presente caso se deja una separación de 7 mm entre extremos. Las dimensiones constructivas son:

PANEL	DIMENSIONES [mm]	CANTIDAD
Costado	1995 x 600 x 8	2
Transversal	484 x 600 x 8	1
Base	1995 x 500 x 8	1

**Tabla 2.4 Dimensiones los paneles de vidrio**

Adicionalmente, a los paneles que forman la base se les debe de dotar de un orificio de 35 mm de diámetro hacia el extremo de cada tramo para el desfogue de agua.



**Figura 2.8 Tanque de vidrio templado**

### **Construcción de absorbedores**

El dispositivo para absorber la energía generada por las olas se construye con dos planchas perforadas de 45 x 50 cm, con orificios de 5 mm de diámetro. Se busca que el tamaño y patrón de perforaciones sea tal que permita el paso suficiente de agua para que no se produzca refracción en las láminas, pero también para absorber la energía. Para facilitar la manipulación de las láminas, se ajustan en un marco formado por vigas de aluminio de sección C. Como se mencionó en la sección de diseño, con la finalidad de mejorar la absorción de energía, se podría adicionar otra superficie perforada entre las dos planchas.



**Figura 2.9 Absorbedor de energía**

### **Montaje del tanque de pruebas y generador de olas**

Finalmente, el montaje de todas las estructuras se debe realizar en el siguiente orden:

- Pegar tiras de caucho con lona, de 4 cm de ancho y 1.6 mm de espesor, para evitar el contacto directo entre el acero y los paneles de vidrio.

- Armar el tanque de pruebas directamente sobre las bases, respetando las tolerancias previamente establecidas entre los tramos.
- Una vez que se construya el tanque de olas, se debe colocar los longitudinales superiores, cuya función es asegurar los paneles de vidrio a los soportes de la base, apretados con pernos de plástico. Estos soportes longitudinales tienen orificios para que se pueda adaptar cualquier estructura o aparato de medición, de acuerdo con la práctica experimental a realizar.
- Ensamblar el generador de olas a la estructura de soporte del tanque de pruebas, cuidando la alineación.
- Realizar la conexión entre el generador y la viga basculante.

De tal forma que el tanque de olas formado por los tramos adecuados queda listo para comenzar con la fase de pruebas de olas generadas, como se muestra en la Figura 2.10.



**Figura 2.10** Tanque de olas para el Laboratorio de Ingeniería Naval

## CAPÍTULO 3

### 3. PRUEBAS DE OLAS GENERADAS

#### 3.1 Cuantificación de la eficiencia del sistema absorbedor de olas

La presencia del absorbedor de energía evita que olas reflejadas en el extremo del tanque, perturben el oleaje generado en la zona de ensayos. Se requiere entonces identificar la mejor capacidad de absorción de esta energía, variando parámetros tales como la posición longitudinal del absorbedor y su ángulo de inclinación.

Una forma de cuantificar la eficiencia del dispositivo absorbedor al final del canal es mediante la comparación de variación la altura en puntos a lo largo del tanque de pruebas. Con el uso de tubos Pitot se puede registrar el cambio de las perturbaciones generadas, variando los parámetros antes mencionados del absorbedor.

#### Ubicación de los tubos Pitot en el tanque

La ubicación de los Tubos Pitot en el tanque de pruebas es esencial, debido a que la sensibilidad del equipo es tal que cualquier perturbación pequeña puede interferir en las mediciones, se debe cuidar que en sus proximidades no existan superficies que las generen. A continuación, se detalla la posición de los tubos en el canal.

Posición		Tubo Pitot 1	Tubo Pitot 2
<b>Transversal</b> (Desde línea de crujía)	[cm]	-12.95	14.95
<b>Longitudinal</b> (Desde sección media)	[cm]	3.35	-126.30
<b>Vertical</b> (Desde el base del tanque)	[cm]	5.50	5.20

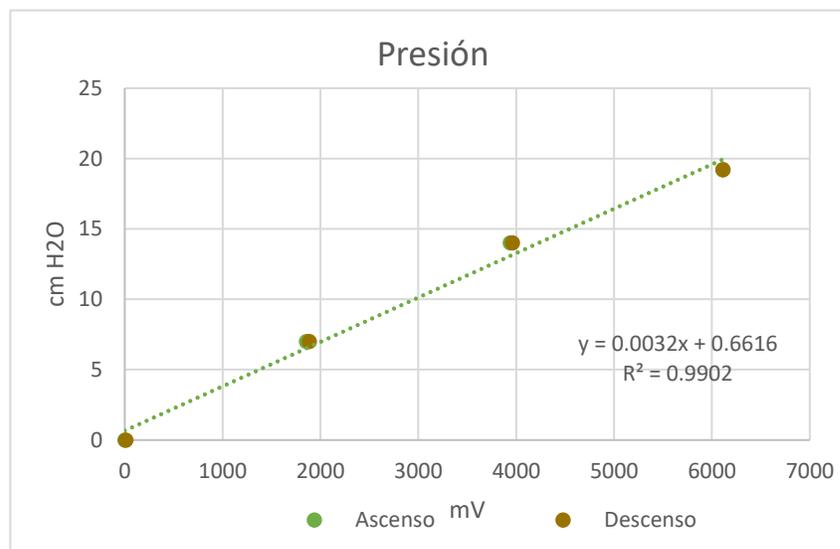
**Tabla 3.1 Ubicación de los Tubos Pitot**



**Figura 3.1** Esquema de ubicación de tubos Pitot en el tanque de pruebas

### Calibración del equipo para el registro de datos

Los equipos utilizados para el registro de datos son sensores de presión, marca Omega, modelo 164PC01D37, con máxima altura de 10" de agua. Aunque estos dispositivos tienen una medida de sensibilidad de 0.5 V por cada pulgada de H<sub>2</sub>O, es necesario realizar una curva de calibración para obtener la relación real para el cambio de unidades de los valores medidos. Para ello se varía la posición vertical de los sensores de presión, que permitan estimar los parámetros para determinar la linealidad de la curva.



**Figura 3.2** Curva de calibración para el equipo de medición

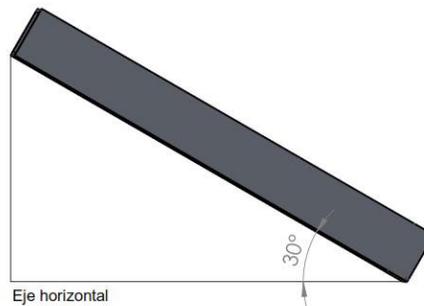
La relación de ajuste es la siguiente:

$$y = 0.0032x + 0.6616$$

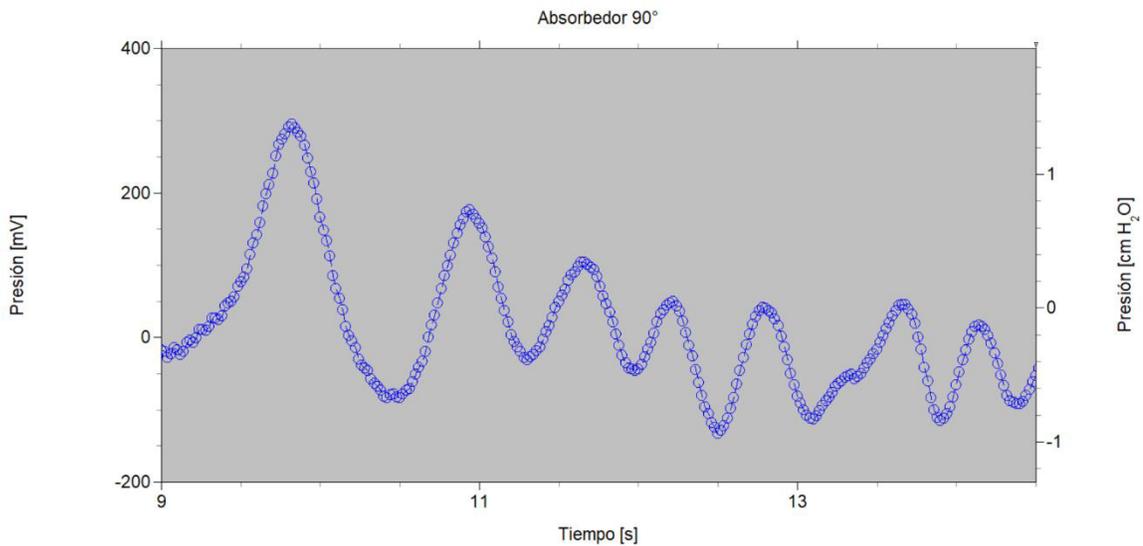
Con un valor de coeficiente de determinación  $R^2$  de 0.99 que es lo suficientemente alto para demostrar confiabilidad.

### Análisis en Ola Única

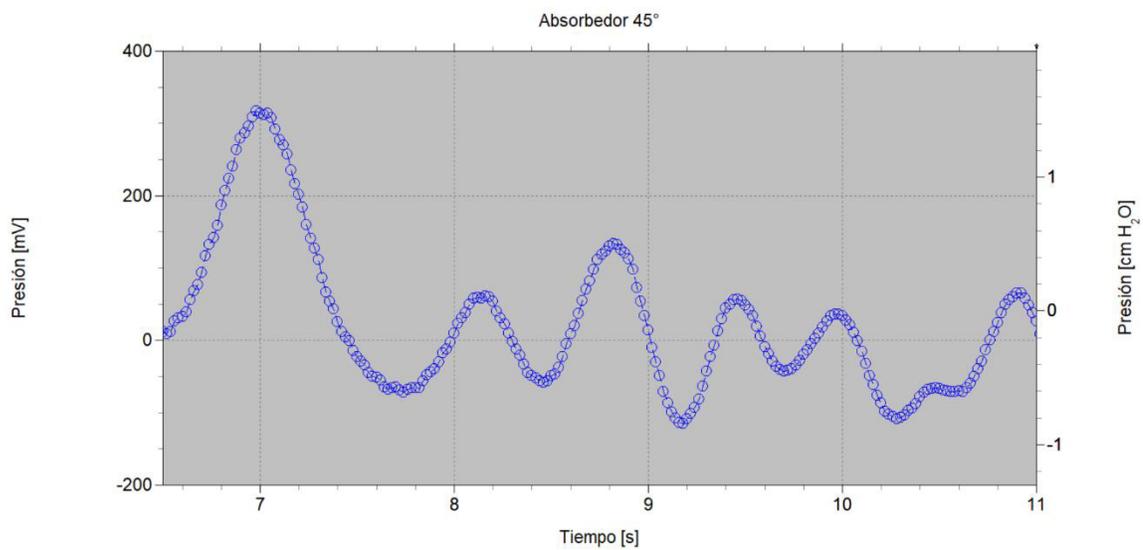
Estas pruebas se las realiza dando manualmente un impulso al generador de olas, produciendo una ola única y registrando la de la superficie luego de que la ola ha pasado. Se realizan diferentes pruebas variando el ángulo de inclinación del absorbedor, con un desplazamiento en el generador de 5 cm. Se seleccionaron 3 ángulos de inclinación en los que podría ubicarse el absorbedor de energía,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $30^\circ$  respecto de la horizontal como se observa en la Figura 3.3, y se realizan varias pruebas con la finalidad de asegurar la confiabilidad del proceso.



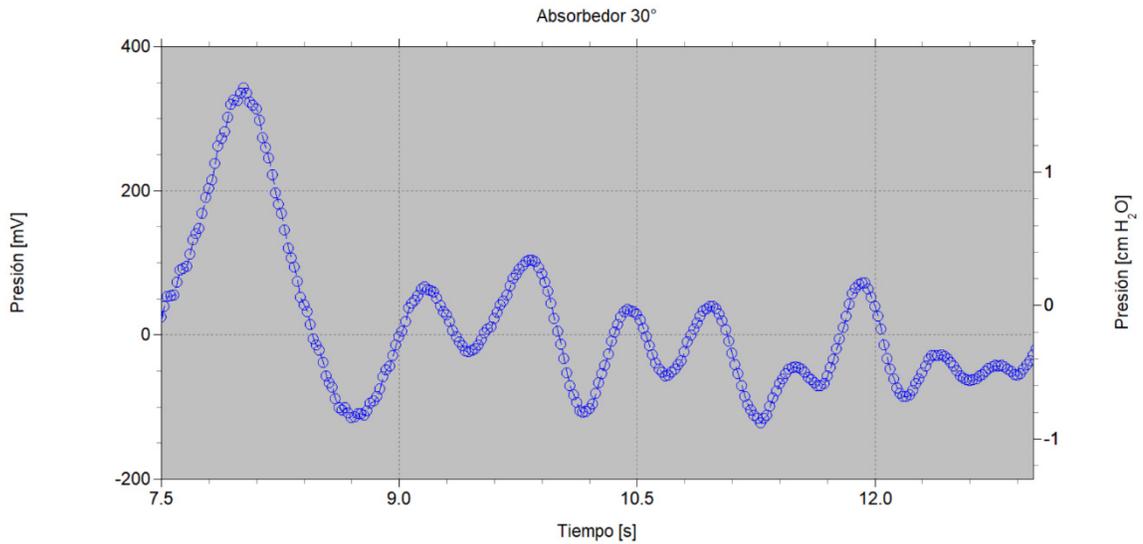
**Figura 3.3** Ejemplo de la inclinación del absorbedor



**Figura 3.4 Resultados de ola única, con absorbedor a 90°**



**Figura 3.5 Resultados de ola única, con absorbedor a 45°**



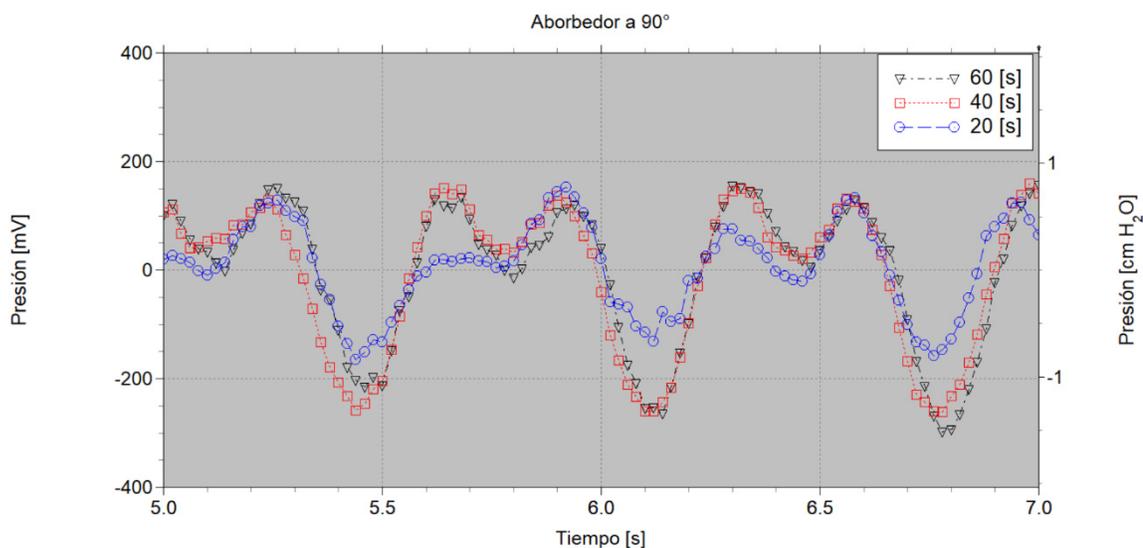
**Figura 3.6 Resultados de ola única, con absorbedor a 30°**

La perturbación de la superficie generada luego del paso de la ola incidente se presenta más atenuada cuando el absorbedor trabaja a 30°, todo lo contrario, a los datos registrados en la Figura 3.4 **Figura 3.7**, donde se observa las olas reflejadas sin ninguna disminución inmediata de su amplitud.

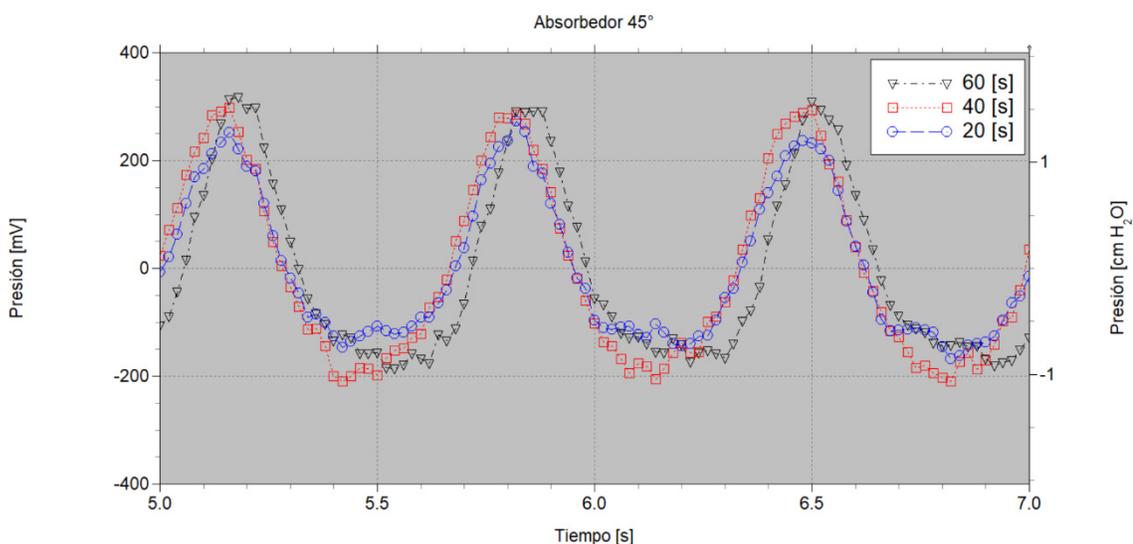
### **Análisis de un Tren de Olas**

La segunda prueba para realizar el análisis de la eficiencia del absorbedor para un tren de olas se trabaja con excitaciones senoidales, cuyo movimiento varía entre dos valores extremos de frecuencia y amplitud. El usuario especifica el valor inicial de frecuencia [Hz] y el nivel de excitación, que para este proyecto será el desplazamiento [cm], se escoge los parámetros para generar una ola central, frecuencia media de 1.5 Hz y carrera del pistón de 3.2 cm pico a pico, por lo tanto, se obtiene una longitud de ola de 62.5 cm aproximadamente. La duración de cada prueba será de 60 segundos.

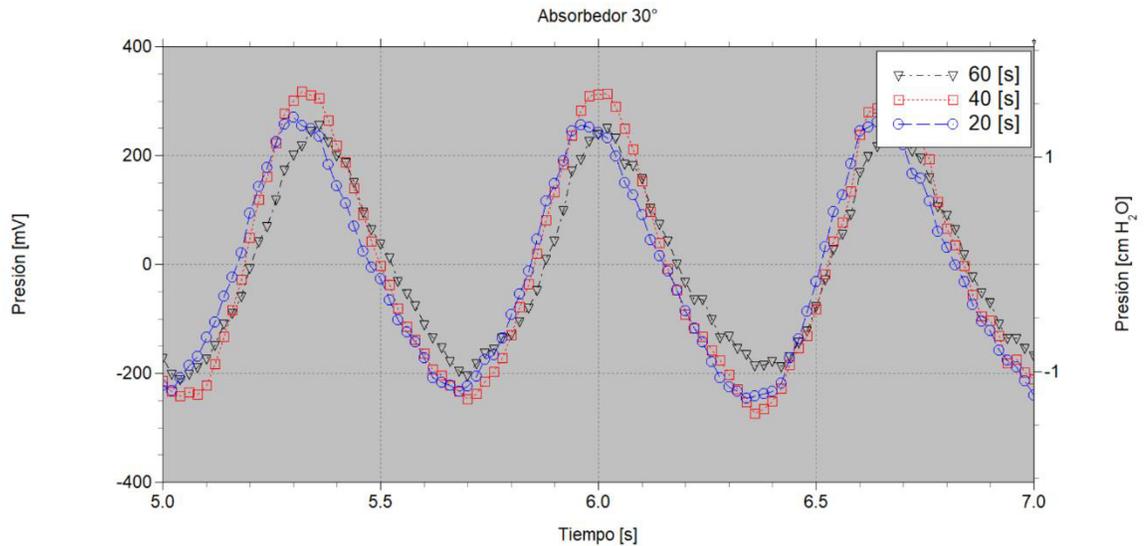
Para medir la capacidad de absorción de energía del dispositivo se superponen tres ondas registradas en diferentes lapsos de tiempo en el registro de datos, para los tres ángulos del absorbedor. En las gráficas a continuación, se muestran tres ciclos tomados a 20, 40 y 60 segundos, el cual es suficiente para el análisis.



**Figura 3.8** Perfil de la ola con absorbedor a 90° a diferentes instantes de tiempo



**Figura 3.7** Perfil de la ola con absorbedor a 45° a diferentes instantes de tiempo



**Figura 3.9 Perfil de la ola con absorbedor a 30° a diferentes instantes de tiempo**

La variación en tiempo en las mediciones se relaciona a la reflexión de las olas, es decir, que conforme avanza el tiempo en las pruebas, la ola reflejada al final del canal perturba a las olas generadas. Aunque la forma más clara de identificar la mejor posición del absorbedor y por tanto a su eficiencia, es en el perfil de la curva senoidal generada. Como se menciona anteriormente, este análisis se realiza con excitaciones senoidales. Mientras más cercanos sean los puntos de las curvas correspondientes a los tres lapsos de tiempo y más senoidal se presente, más eficiente es la posición del absorbedor.

Comparando las Figura 3.7 y Figura 3.9, la correspondiente a la posición del absorbedor a 30° respecto de la horizontal, muestra una difracción pequeña entre sus curvas en el tiempo. Es decir, que las pruebas realizadas a continuación el absorbedor trabajará con este ángulo de inclinación.

### 3.2 Medición de calidad en olas senoidales

El objetivo de estas pruebas es identificar cuan senoidal es la ola generada. Para ello se trabaja con un rango de carrera de pistón  $S$  comprendido entre 3 y 4.2 cm, y frecuencias  $f$  entre 1 y 1.5 Hz, con un total de 9 pruebas.

Para determinar la calidad de la ola se utiliza el método de mínimos cuadrados. Es un procedimiento en el que, dados un conjunto de datos se intenta determinar la función continua que mejor se aproxime a los datos registrados. En este caso, la función utilizada para la aproximación es la senoide:

$$\bar{y}_i = A \sin \omega t_i \quad (3.1)$$

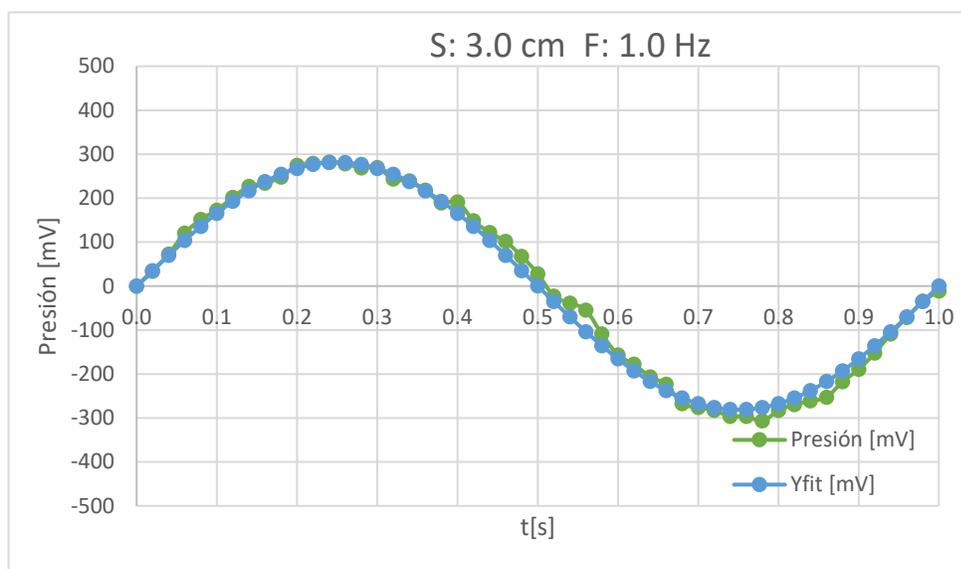
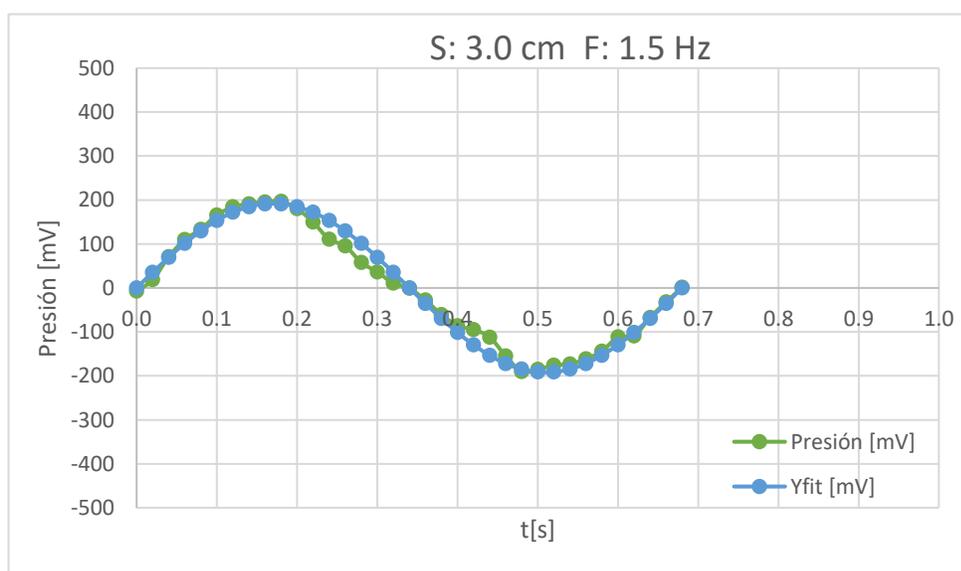
La aproximación por mínimos cuadrados se basa en la minimización del error cuadrático medio, definido a continuación, siendo  $N$  el número de datos medidos en cada prueba:

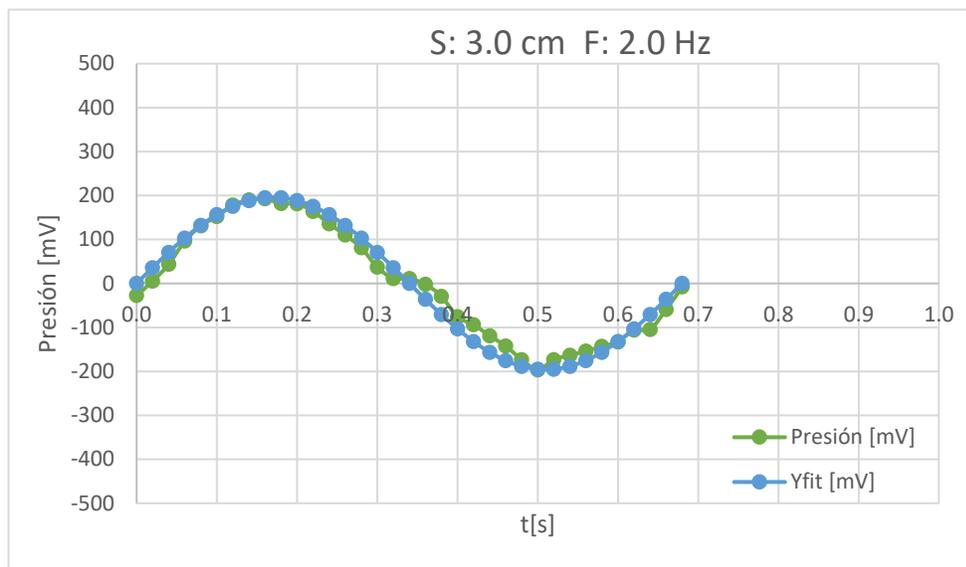
$$s = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}} \quad (3.2)$$

También se determina el error cuadrático de la media, que indica cuan parecido es el valor pronosticado al valor real. Se determina con la siguiente expresión, (Manual de Prácticas, Complementos de Física ):

$$s_m = \frac{s}{\sqrt{N}} \quad (3.3)$$

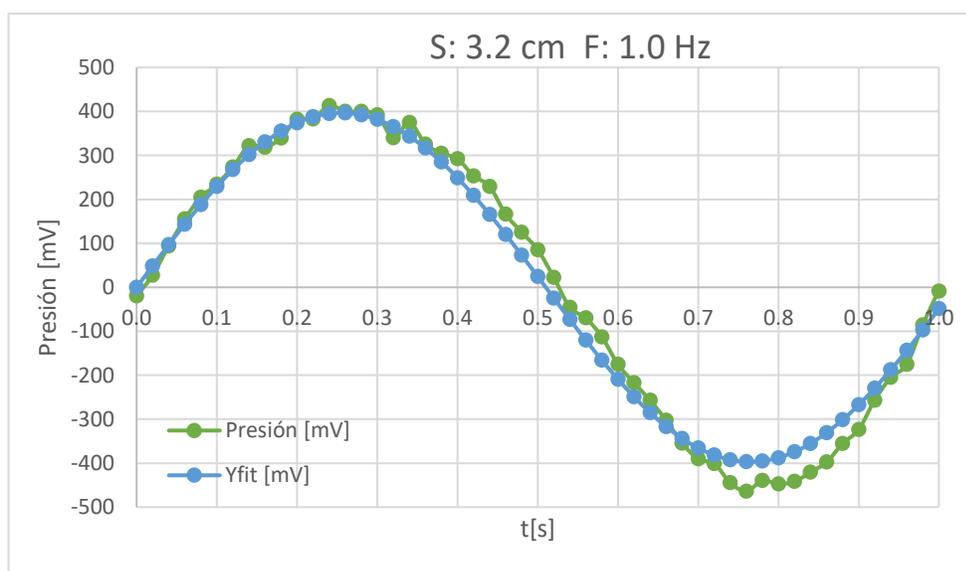
A continuación, se presentan las gráficas con los datos registrados y las aproximaciones realizadas:

**Amplitud del pistón pico-pico 3.0cm****Figura 3.10** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 51**Figura 3.11** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 35

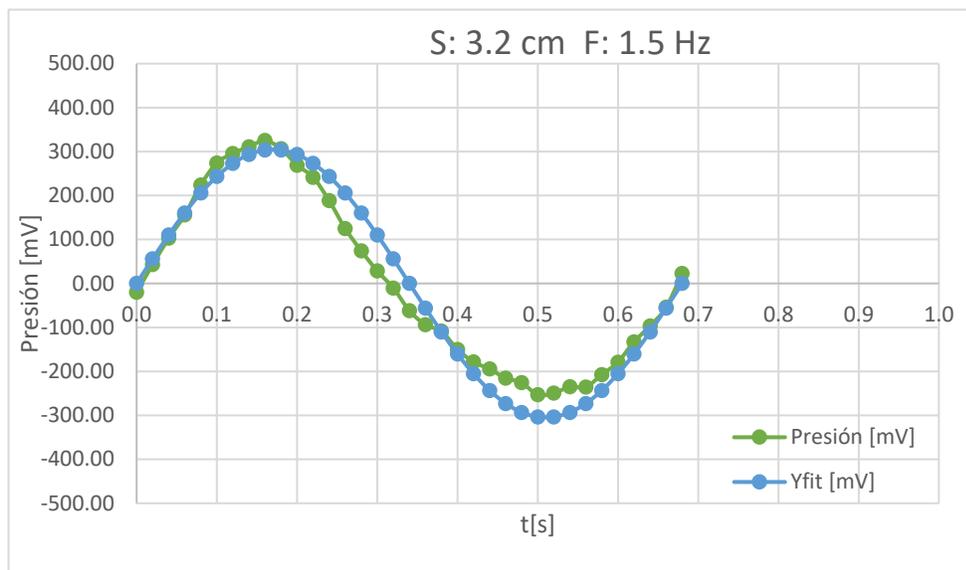


**Figura 3.12** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 35

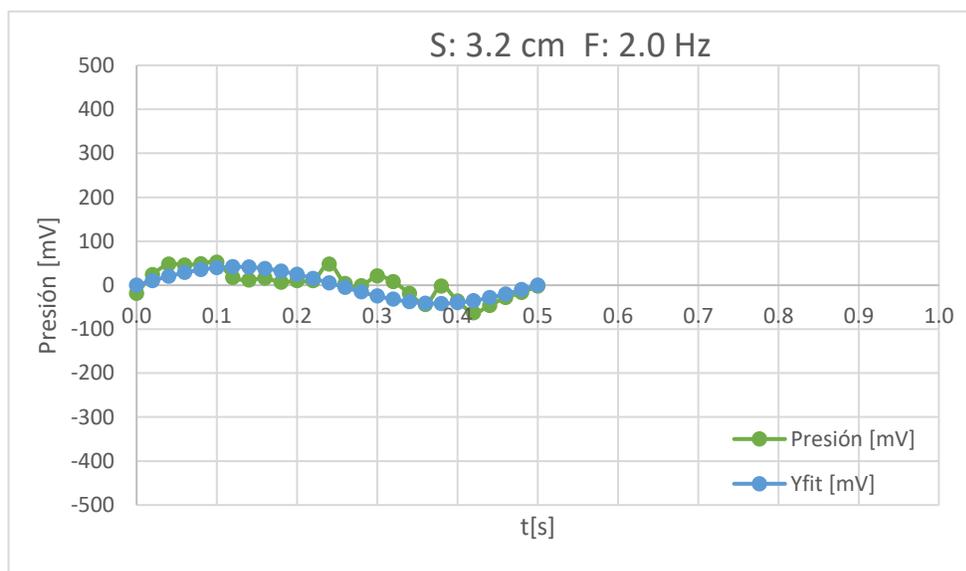
#### Amplitud del pistón pico-pico 3.2 cm



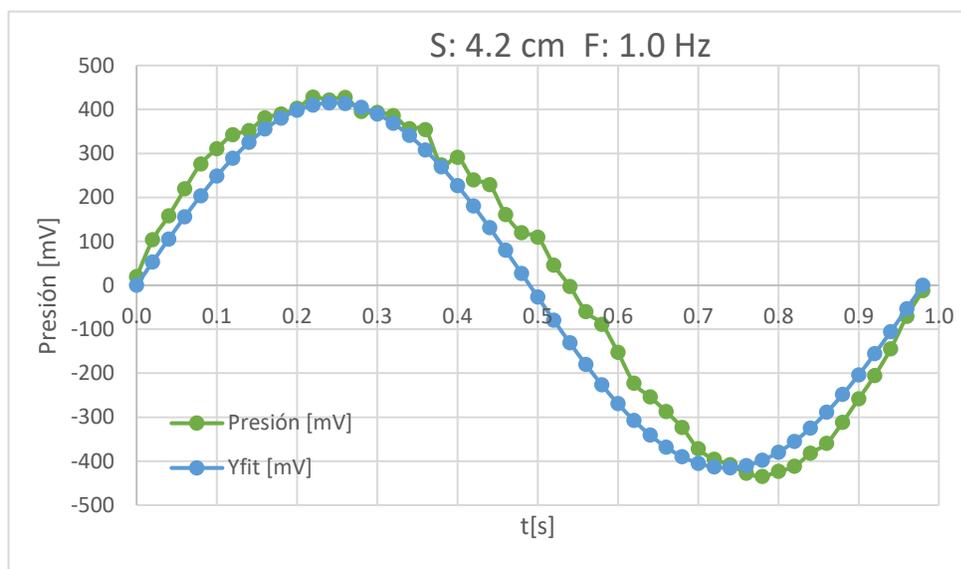
**Figura 3.13** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 52



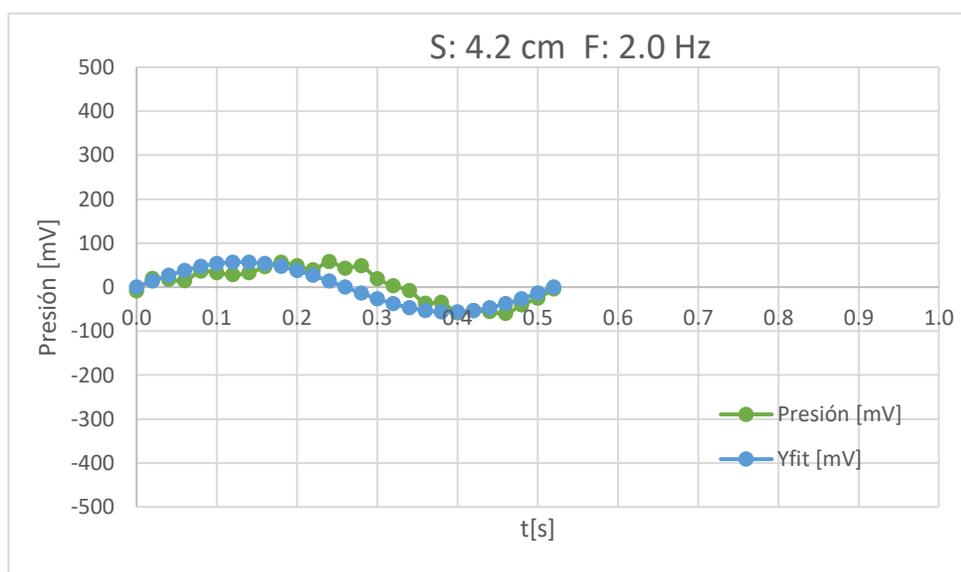
**Figura 3.14** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 35



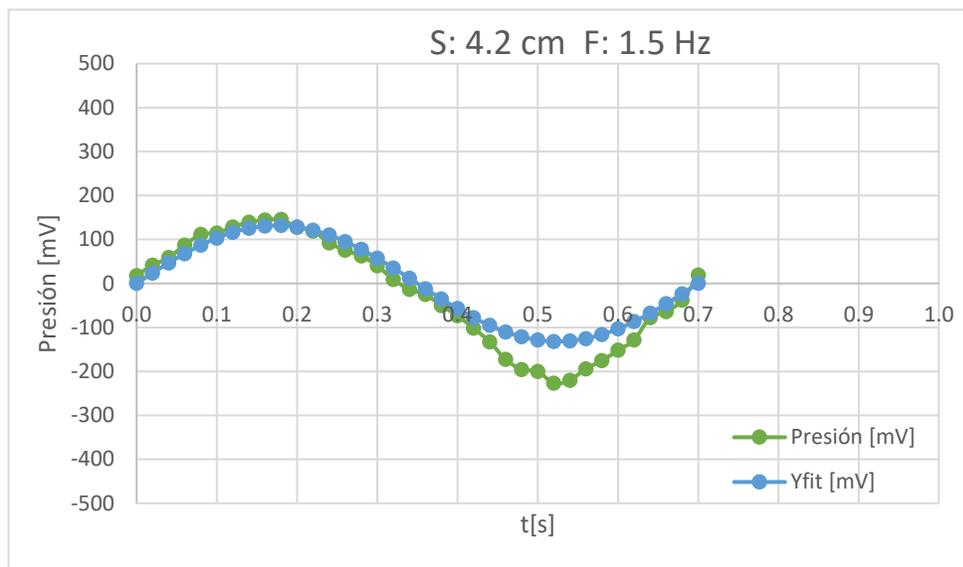
**Figura 3.15** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 26

**Amplitud del pistón pico-pico 4.2 cm**

**Figura 3.16** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.0 Hz, N= 50



**Figura 3.17** Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 2.0 Hz, N= 27

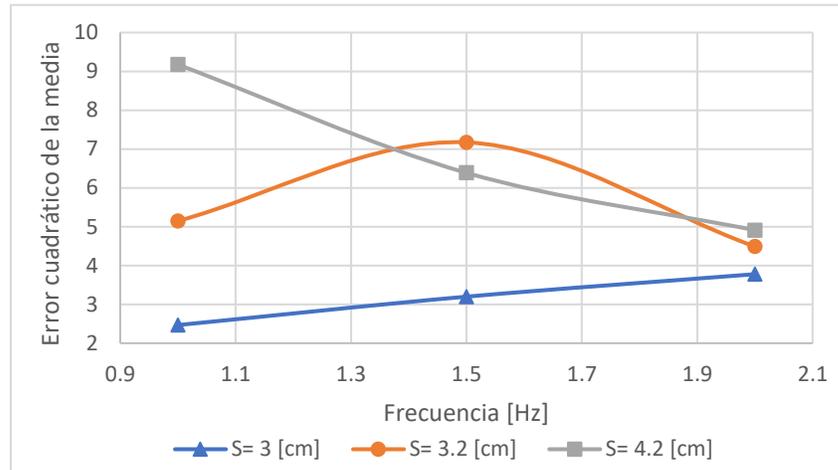


**Figura 3.18 Respuesta de variación de presión [mV] con frecuencia 1.5 Hz, N= 36**

A continuación, se muestra una tabla con el resumen de los resultados por el método de mínimos cuadrados.

<b>Carrera de Pistón, S [cm]</b>	<b>Frecuencias [Hz]</b>	<b>Error cuadrático medio</b>	<b>Error cuadrático de la media</b>
<b>3.0</b>	1.0	17.44	2.467
	1.5	18.92	3.198
	2.0	22.34	3.777
<b>3.2</b>	1.0	37.11	5.147
	1.5	42.42	7.171
	2.0	22.89	4.489
<b>4.2</b>	1.0	64.87	9.174
	1.5	38.32	6.387
	2.0	22.52	4.911

**Tabla 3.2 Resumen de aproximación por el método de mínimos cuadrados**



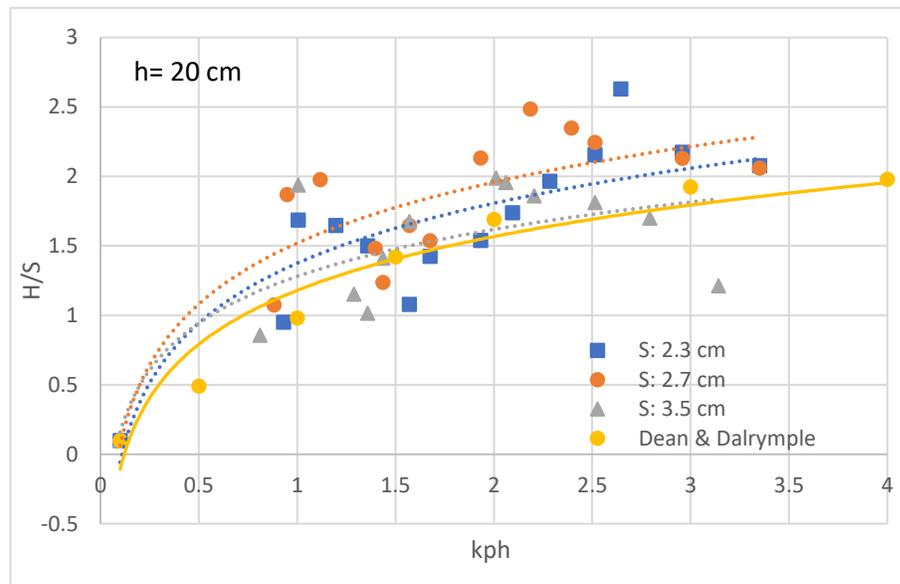
**Figura 3.19 Error cuadrático de la media en olas senoidales**

Se puede establecer que, para ciertas combinaciones de carrera  $S$  y frecuencias  $F$ , las curvas obtenidas tienen una excelente aproximación a la senoidal. Mientras, que en otras curvas, por ejemplo en la Figura 3.16, los resultados obtenidos no tienen una buena aproximación del error cuadrático medio. En el resultado también influye la cantidad de puntos registrados durante el ciclo, evidentemente la desviación estándar decrece a medida que el número de medidas es mayor. Hay que señalar que estas consideraciones estadísticas son adecuadas cuando  $N > 30$ .

### 3.3 Relación Carrera del generador / Amplitud de ola

Al inicio de este proyecto se establecieron requerimientos que debía cumplir el tanque de olas y basados en la teoría de generación de olas. Se estimó el valor que debía tener la carrera para generar ola de la amplitud deseada. El objetivo de esta tercera prueba es recuperar la Figura 1.2, para el movimiento del pistón, obtenida en el libro de (Dean & Dalrymple, 1991), que muestra la razón  $S/H$ . Estableciendo una relación entre los parámetros de la ola y el movimiento del pistón que permitan tener una idea más real acerca de la teoría de generación de olas.

Para obtener puntos en un rango adecuado, se realiza una combinación de pruebas variando la carrera del pistón  $S$  y la frecuencia  $F$ , manteniendo la profundidad del agua en  $h = 20$  cm. Parámetros que fueron suficientes para conseguir diferentes valores de longitud y altura de ola.



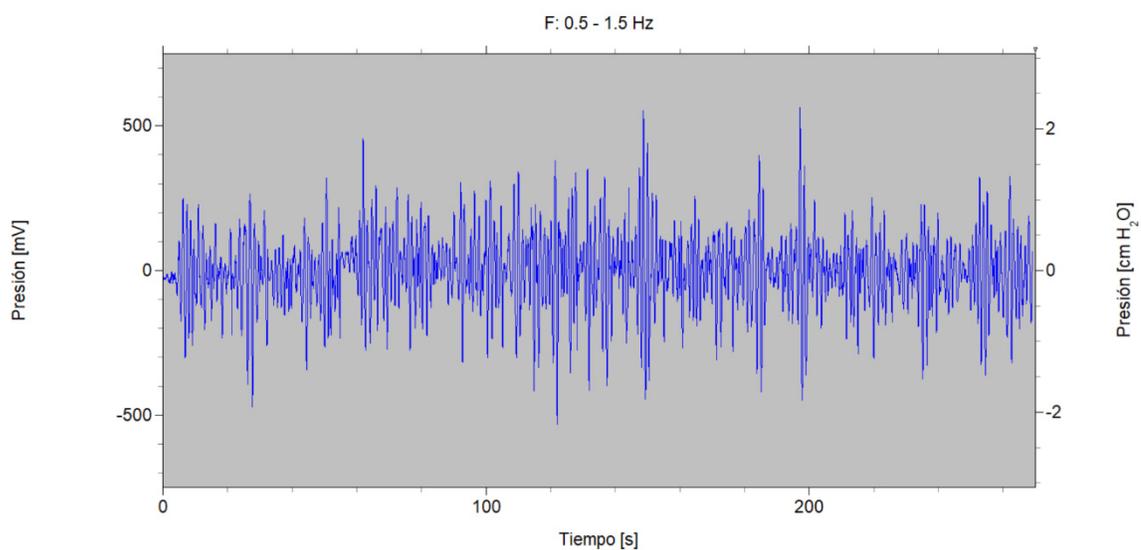
**Figura 3.20** Altura de ola/ carrera vs profundidades relativas

Se obtiene una tendencia similar a la publicada en (Dean & Dalrymple, 1991) y que se representa de color amarillo en la gráfica anterior.

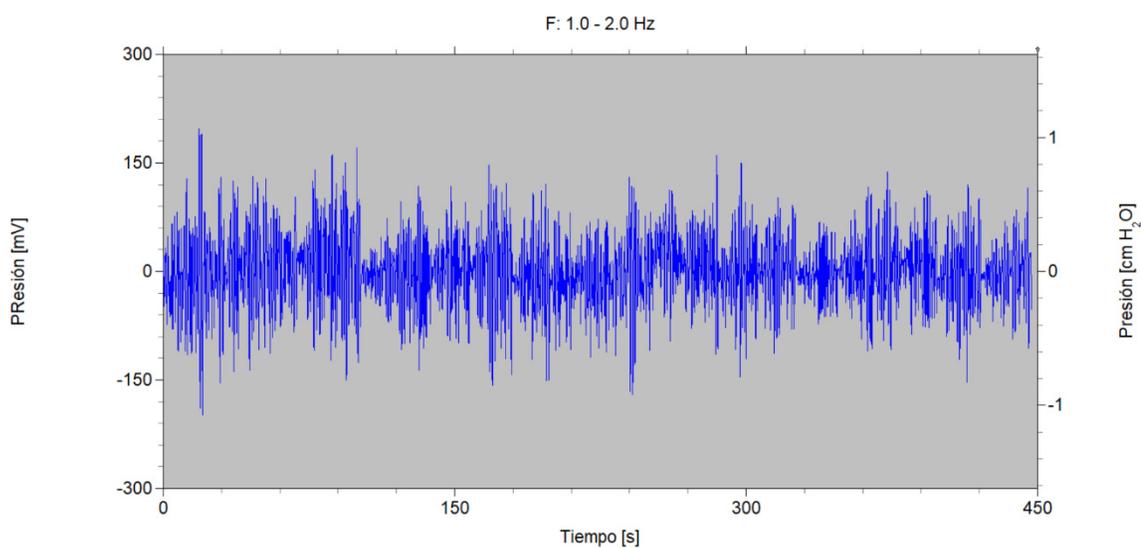
### 3.4 Generación de olas irregulares

Se utilizó las excitaciones aleatorias del vibrador con la finalidad de generar olas irregulares. Las pruebas experimentales se tomaron en un tiempo de registro de 5 minutos aproximadamente, presentando espectros de la presión para 3 rangos diferentes de frecuencias. Estableciendo un nivel de amplitud de densidad espectral de la aceleración con valores de  $0.00001$  y  $0.00005$   $g^2/Hz$ , generando desplazamiento de entre 2 y 8 mm.

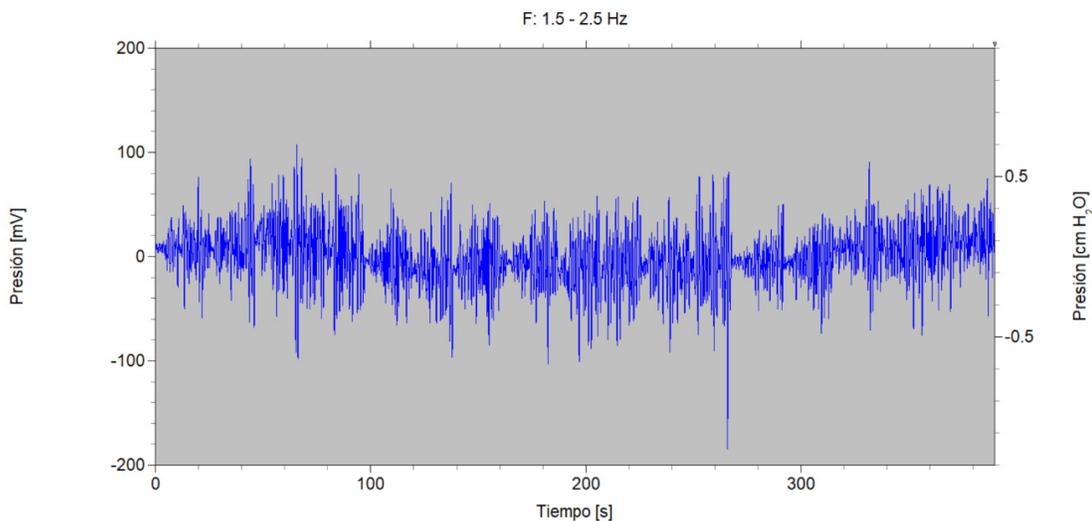
A continuación, se presentan las gráficas con la adquisición de los cambios de presión registrados en los rangos previamente establecidos:



**Figura 3.22** Registro temporal de la presión a frecuencias 0.5 – 1.5 Hz



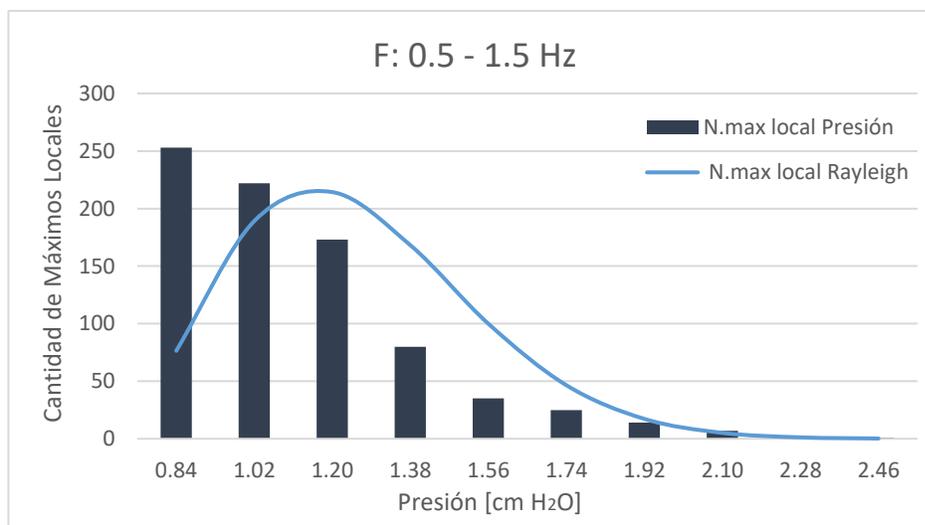
**Figura 3.21** Registro temporal de la presión a frecuencias 1.0 – 2.0 Hz



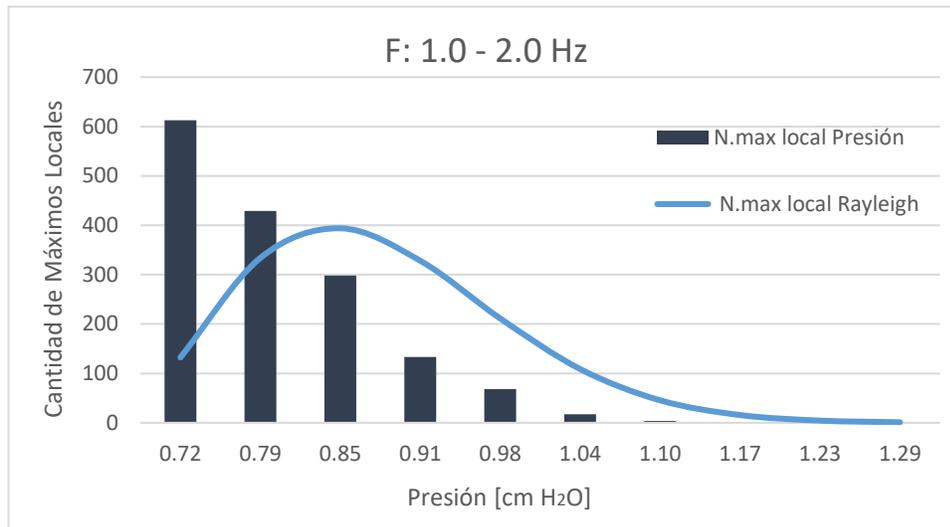
**Figura 3.23 Registro de la presión a frecuencias 1.5 – 2.5 Hz**

### Histograma de máximos locales

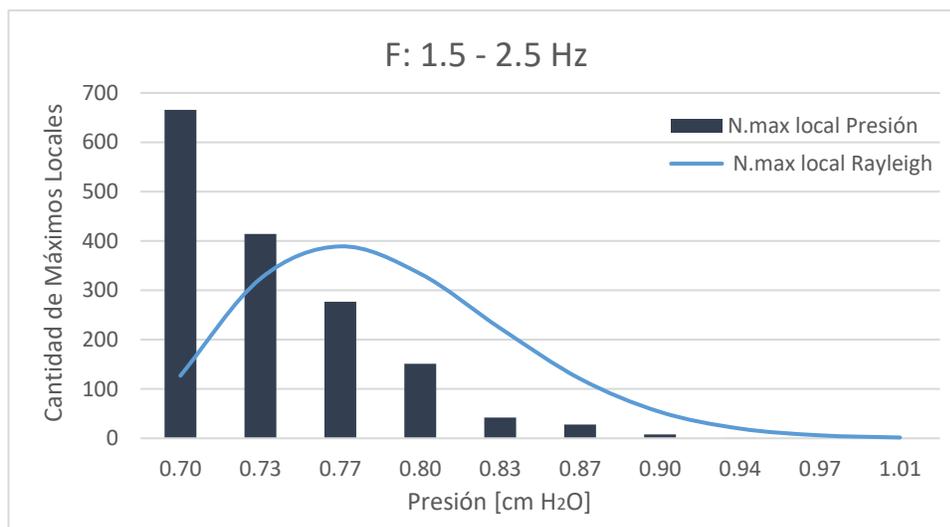
A partir de los datos registrados se identifican los máximos locales de la presión en términos de cm H<sub>2</sub>O, elaborando un histograma en el que se contabilizan estos máximos y se agrupan en determinados rangos de presiones, para compararlos con la distribución probabilística de Rayleigh. Para obtener el valor de varianza, previamente el registro ha sido encerado.



**Figura 3.24 Cálculo de máximos locales para frecuencias 0.5 – 1.5 Hz**



**Figura 3.26** Cálculo de máximos locales para frecuencias 1.0 – 2.0 Hz



**Figura 3.25** Cálculo de máximos locales para frecuencias 1.5 – 2.5 Hz

El espectro del movimiento del vibrador es un espectro establecido con un pico justo en el valor promedio del rango de frecuencias en el que se está trabajando, como se indica a continuación:

- Para el rango de frecuencias 0.5 – 1.5 Hz, se establece una densidad espectral de la aceleración de  $0.00002 \text{ g}^2/\text{Hz}$  y con el valor máximo de  $0.00005 \text{ g}^2/\text{Hz}$ .
- Para el rango de 1.0 - 2.0 Hz, los valores del espectro de la aceleración fueron  $0.00001$  y  $0.00002 \text{ g}^2/\text{Hz}$ , el mismo que fue utilizado para el tercer rango de frecuencias, establecido en 1.5 – 2.5 Hz.

En la Figura 3.26 se registra el máximo valor de un promedio de la presión generada,  $0.70 \text{ cm H}_2\text{O}$ , con una cantidad de máximos locales de 666 aproximadamente. La distribución de Rayleigh presenta convergencia con los valores altos y medios registrados, es decir, los valores reales se aproximan a los valores pronosticados.

## CONCLUSIONES

En este proyecto se ha diseñado y construido un tanque de olas para estudiar el comportamiento de estructuras flotantes en el mar, adaptando su diseño al equipo vibratorio disponible en el laboratorio de Ingeniería Naval. Su construcción fue elaborada con materiales resistentes y ligeros por el tipo de movimiento que soporta. Además se efectuaron pruebas experimentales para comprobar la eficiencia del sistema. Las observaciones realizadas durante estas pruebas son limitadas, debido a que se trabajó con una profundidad del canal definida en  $h = 20$  cm. Al finalizar todas las pruebas, se pueden concluir:

1. Las pruebas realizadas para medir la eficiencia del absorbedor permitieron identificar que el ángulo de inclinación al que este dispositivo absorbe aproximadamente el total de la energía generada por la ola incidente, evitando la refracción de esta, es a  $30^\circ$  con respecto de la horizontal.
2. La calidad de ola generada tiene su limitación en función de la frecuencia y desplazamiento que se aplique. De acuerdo con el rango de frecuencias y amplitudes de las olas que se deseen generar, se deben realizar pruebas para determinar la calidad de ola generada, es decir, no existe una tendencia general a diferentes desplazamientos del generador.
3. Con los resultados de las olas generadas en las pruebas que se han desarrollado se confirma la utilidad del diagrama presentado en (Dean & Dalrymple, 1991), que relaciona los parámetros de ola, altura y longitud, con los requerimientos del generador, carrera y la profundidad del canal.
4. Para estudiar el comportamiento en mar aleatorio, se ha generado un movimiento de ola irregular y se han analizado la distribución de los máximos locales comparándolo con la distribución de Rayleigh. Para medianas y altos valores, la convergencia es razonable, para bajos valores se nota una cierta diferencia posiblemente porque el espectro del vibrador que generó la ola no es de banda angosta.

## RECOMENDACIONES

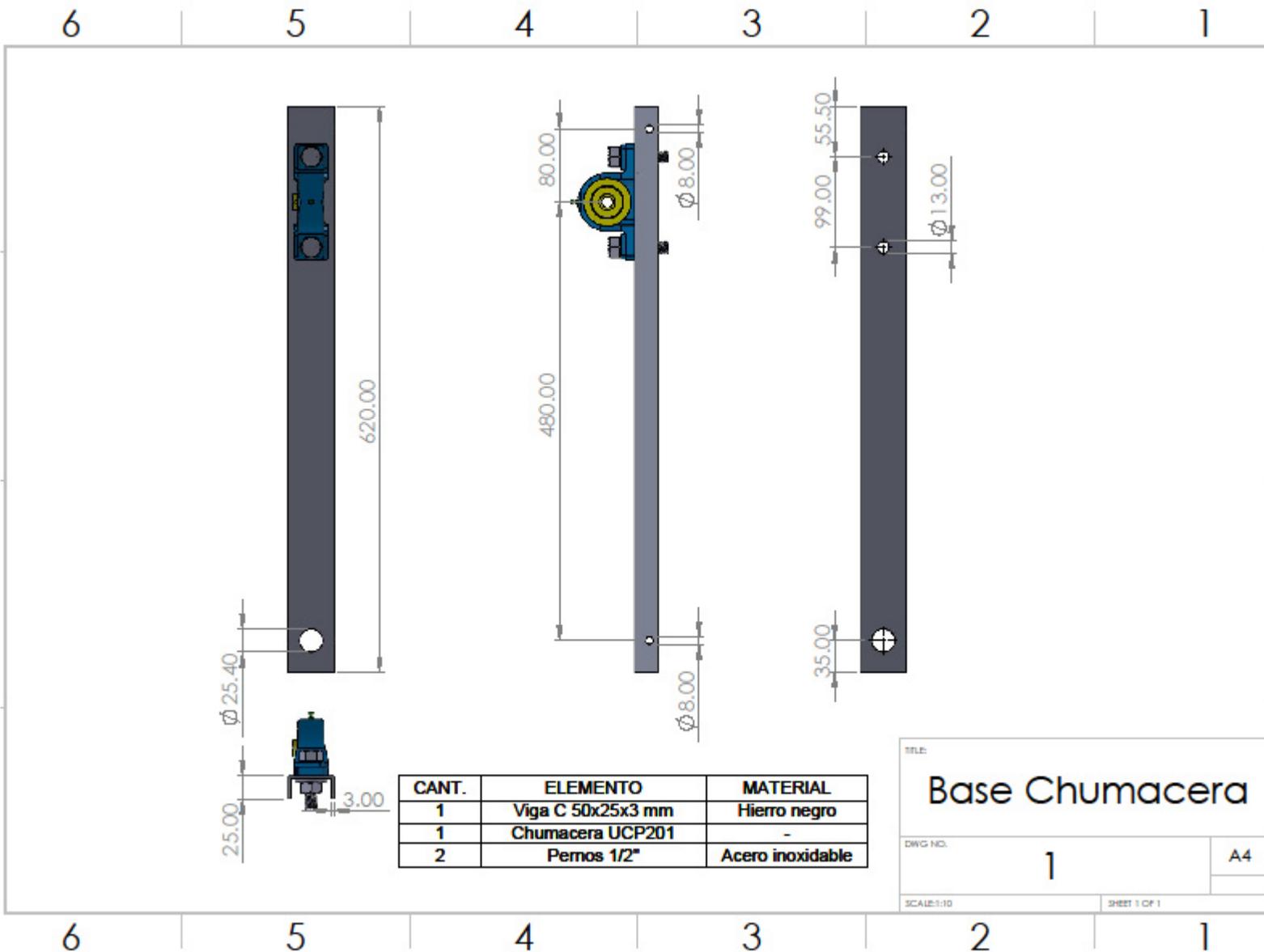
Con la finalidad de mejorar el diseño del tanque de olas y mejorar su efectividad, luego de las observaciones realizadas se puede recomendar lo siguiente:

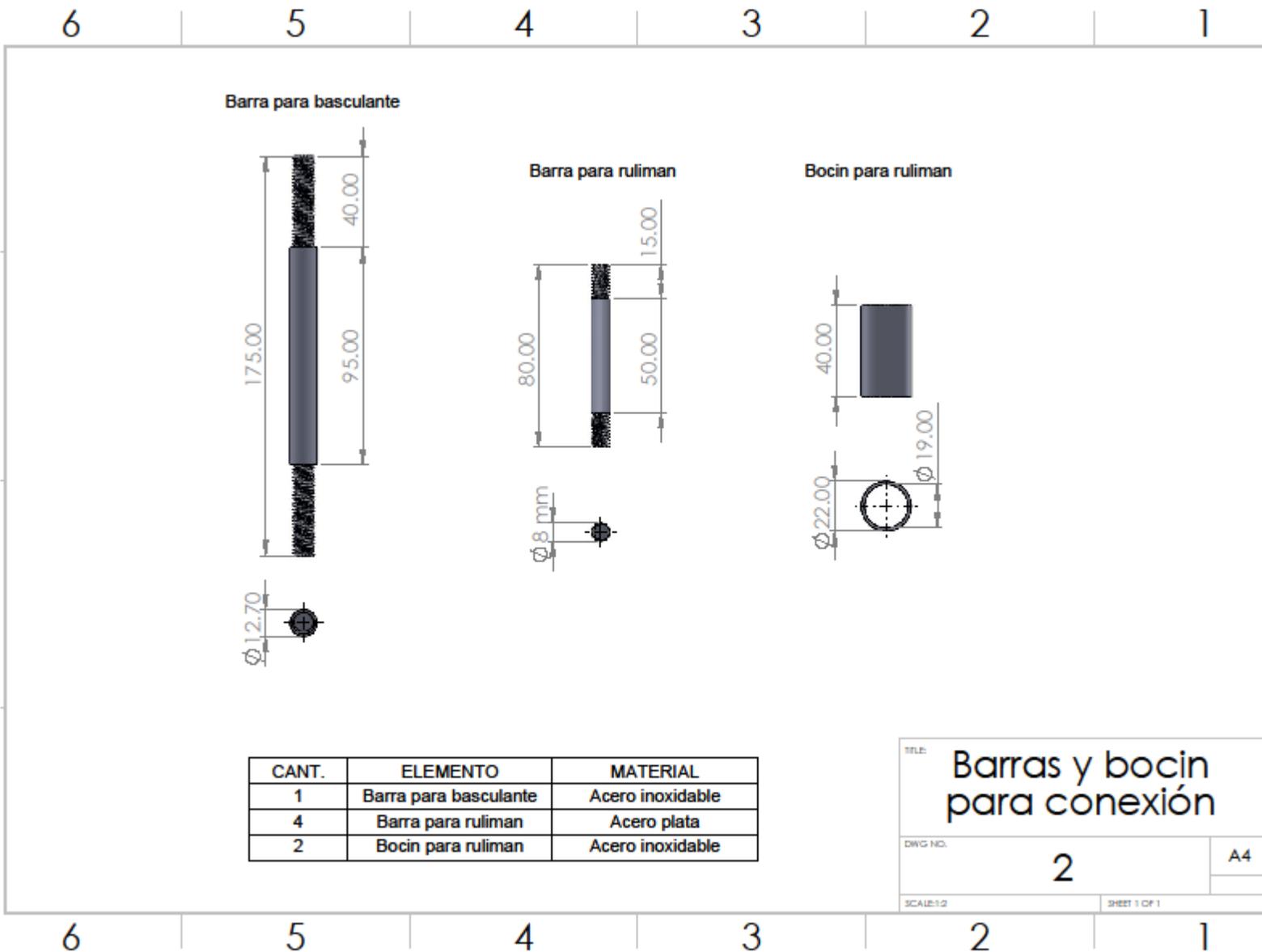
1. Incrementar la robustez de la viga basculante y de la estructura de soporte del sistema de conexión entre el vibrador y generador, para evitar pérdidas en el movimiento.
2. Cambiar el tipo de material de los niveladores, pues al momento en que se realicen pruebas con la profundidad del canal a su máxima capacidad, estos posiblemente fallaran.
3. Considerar la instalación de un absorbedor detrás del generador de olas no solo para evitar la salpicadura de agua, sino también para aminorar el efecto del oleaje en la parte trasera de la paleta, mejorando así la calidad del oleaje producido. Problema que puede incrementar al momento de aumentar la profundidad del canal.

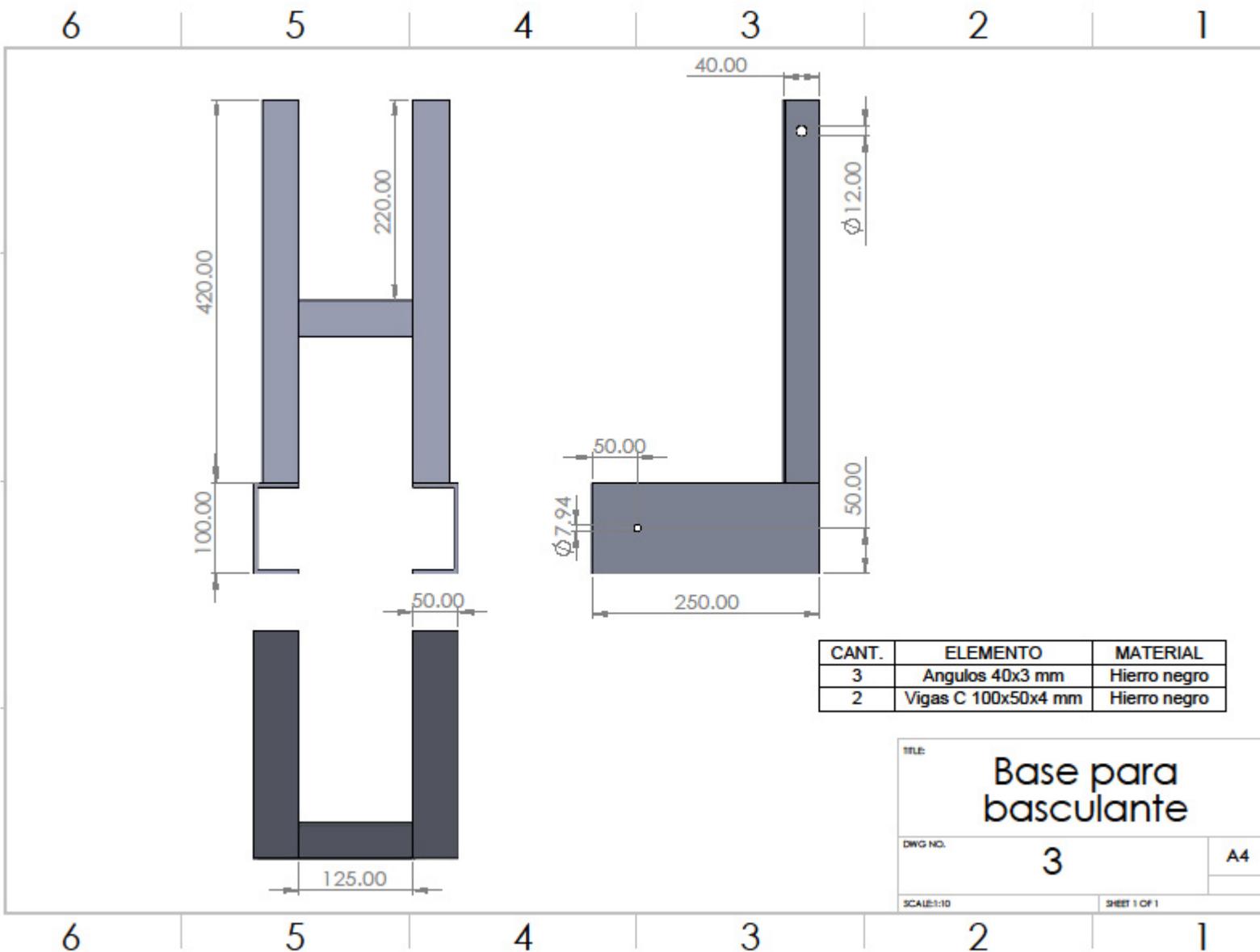
## BIBLIOGRAFIA

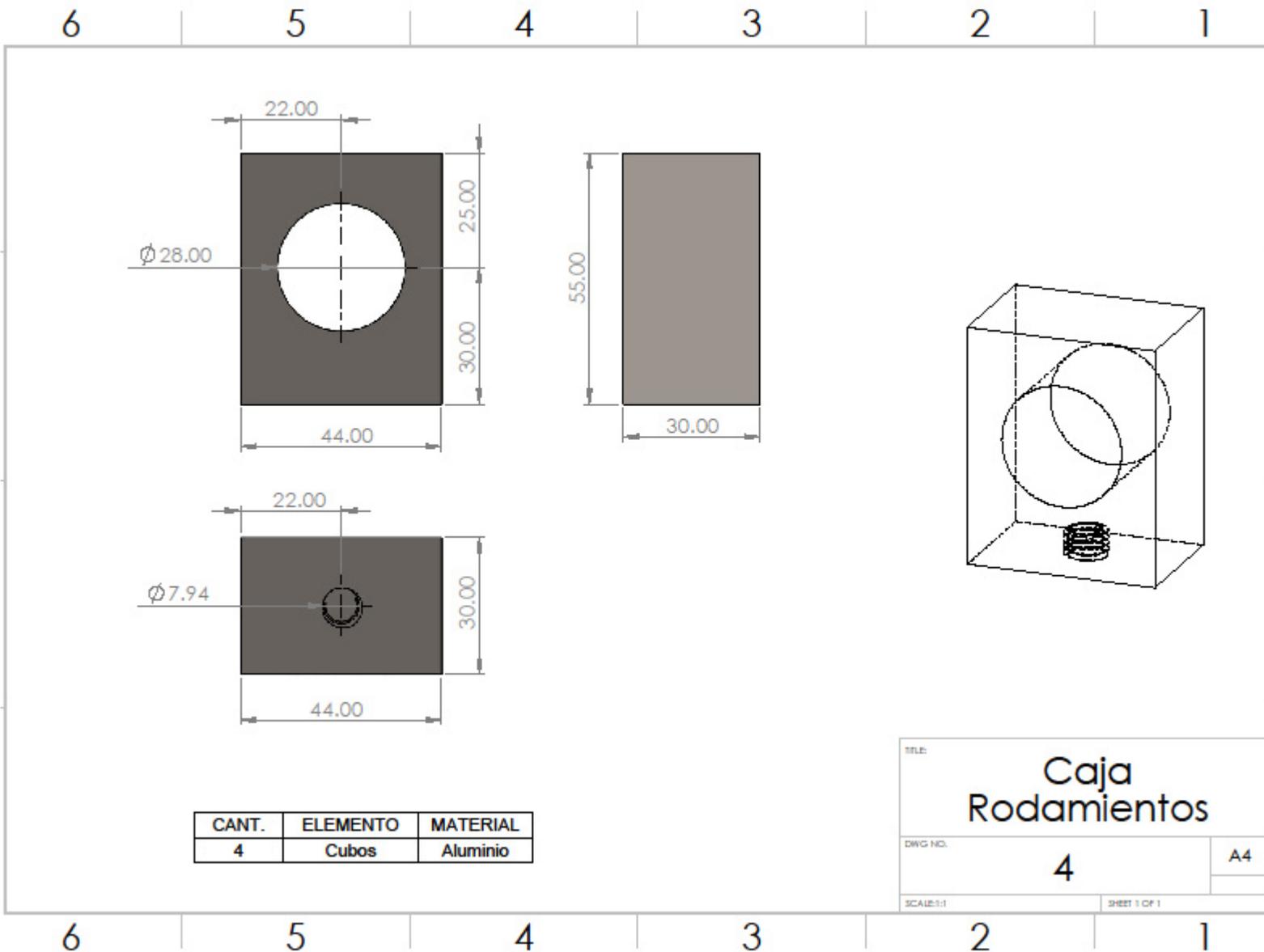
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1991). Wavemaker Theory. En *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists* (págs. 170-186). Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- EP, M. (2016). *Maricultura del Camaron Blanco*. Obtenido de Manabí Gobierno Provincial: <http://manabiproduce.gob.ec>
- Gonzalez, J. M. (Octubre de 1988). Nuevos métodos de predicción de calidad de olas generadas en laboratorios . Madrid.
- Guillouzuic, B. (2014). *MARINET*. Obtenido de Collation of Wave Simulation Methods: <http://www.marinet2.eu/>
- Manual de Prácticas, Complementos de Física* . (s.f.). Sevilla: Departamento de Física Aplicada .
- Moran, J. (Septiembre de 2017). Experimentación de la respuesta del modelo de un mástil por vibración aleatoria de la base. Guayaquil.
- Productos: Edinburg Design* . (2016). Obtenido de Edinburg Design : <http://www4.edesign.co.uk>
- Productos: Gunt Hamburg* . (s.f.). Obtenido de <https://www.gunt.de/es>
- Products: VR5800-BSR Shakers Systems*. (s.f.). Obtenido de Vibration Research: <http://www.vibrationresearch.com>
- Rytkonen, J., & Granholm, G. (1989). Experimental Investigation of the Plunger Type Wave Maker. *Rakenteiden Mekaniikka*, 25-46.
- Santos, R. R. (2017). Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en el Ecuador. *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, 23-28.
- Straub, L. G. (1953). *Laboratory wave - generating apparatus*. Washington DC.
- Toro, M. (8 de Febrero de 2005). Detenida entrega de crudo a buques, en Balao. *El Universo*.

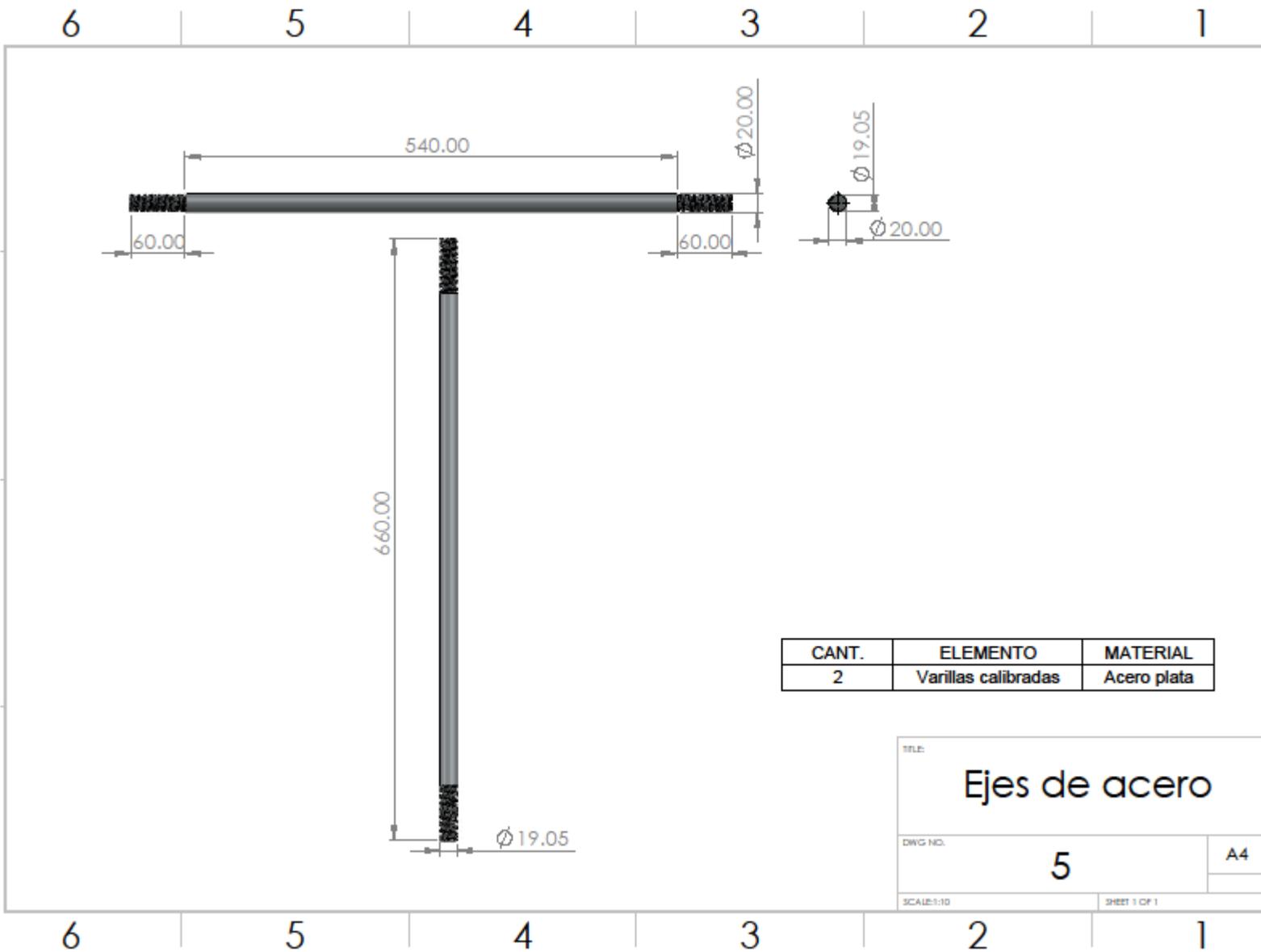
## **ANEXOS**

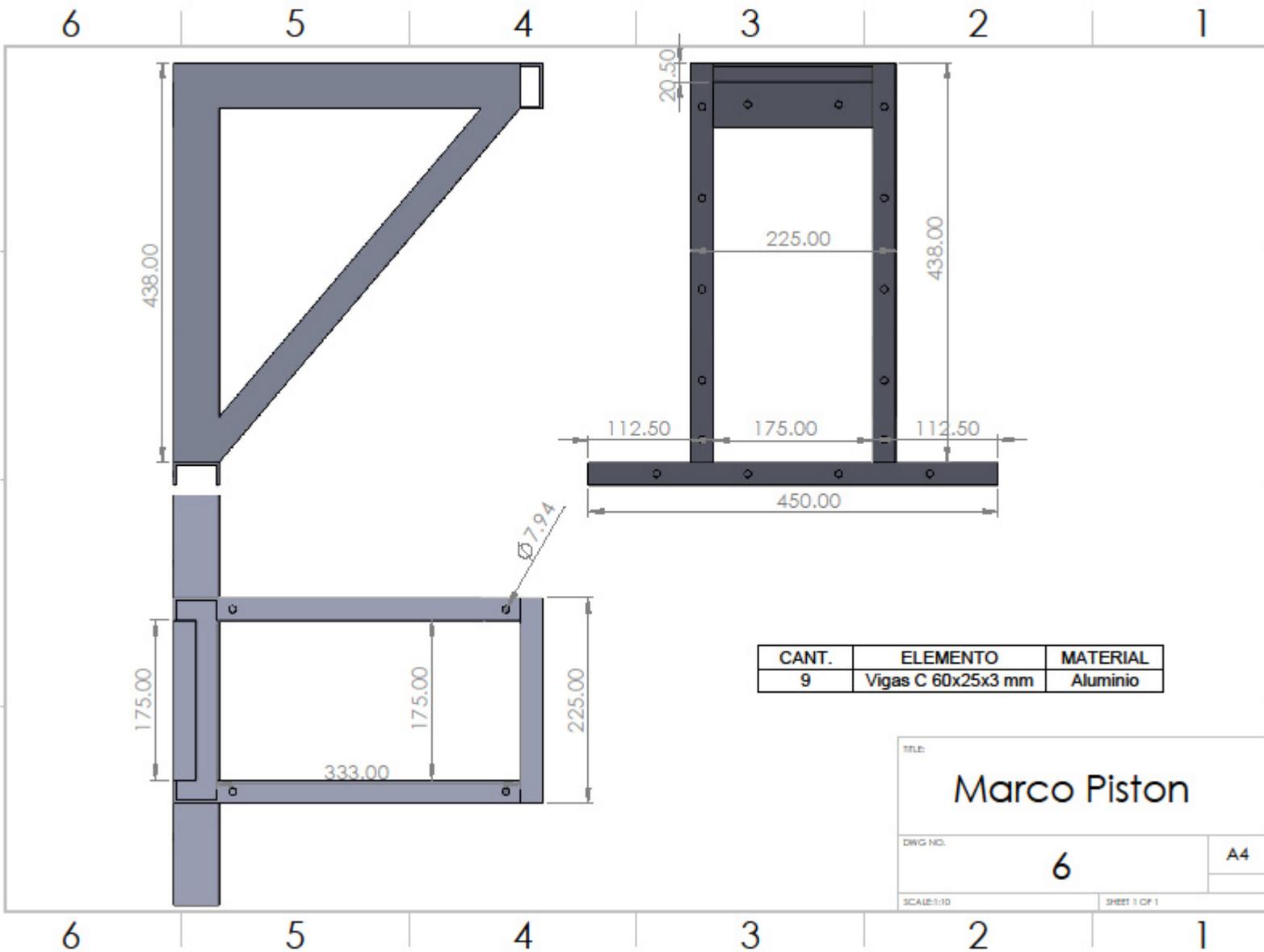


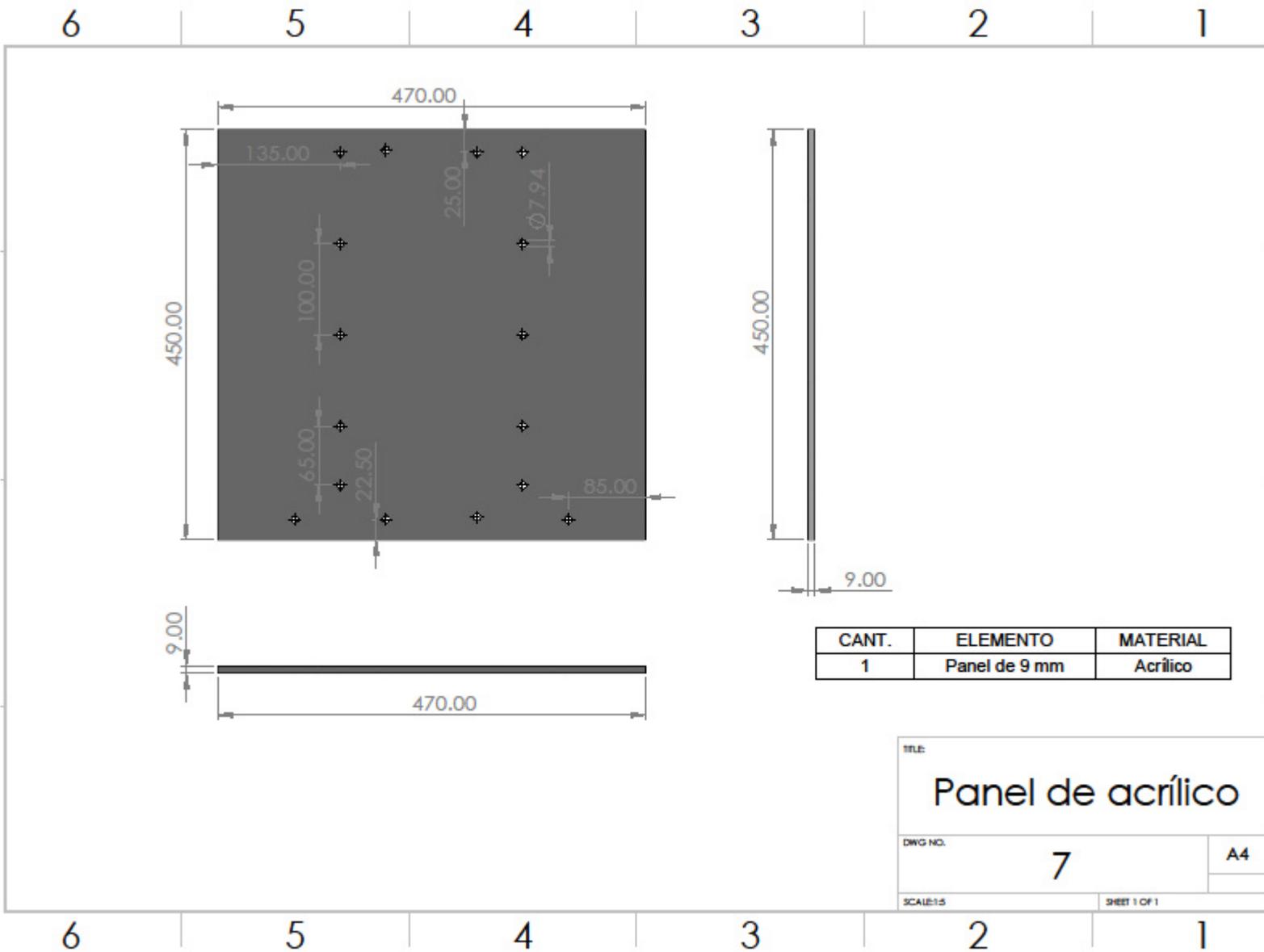


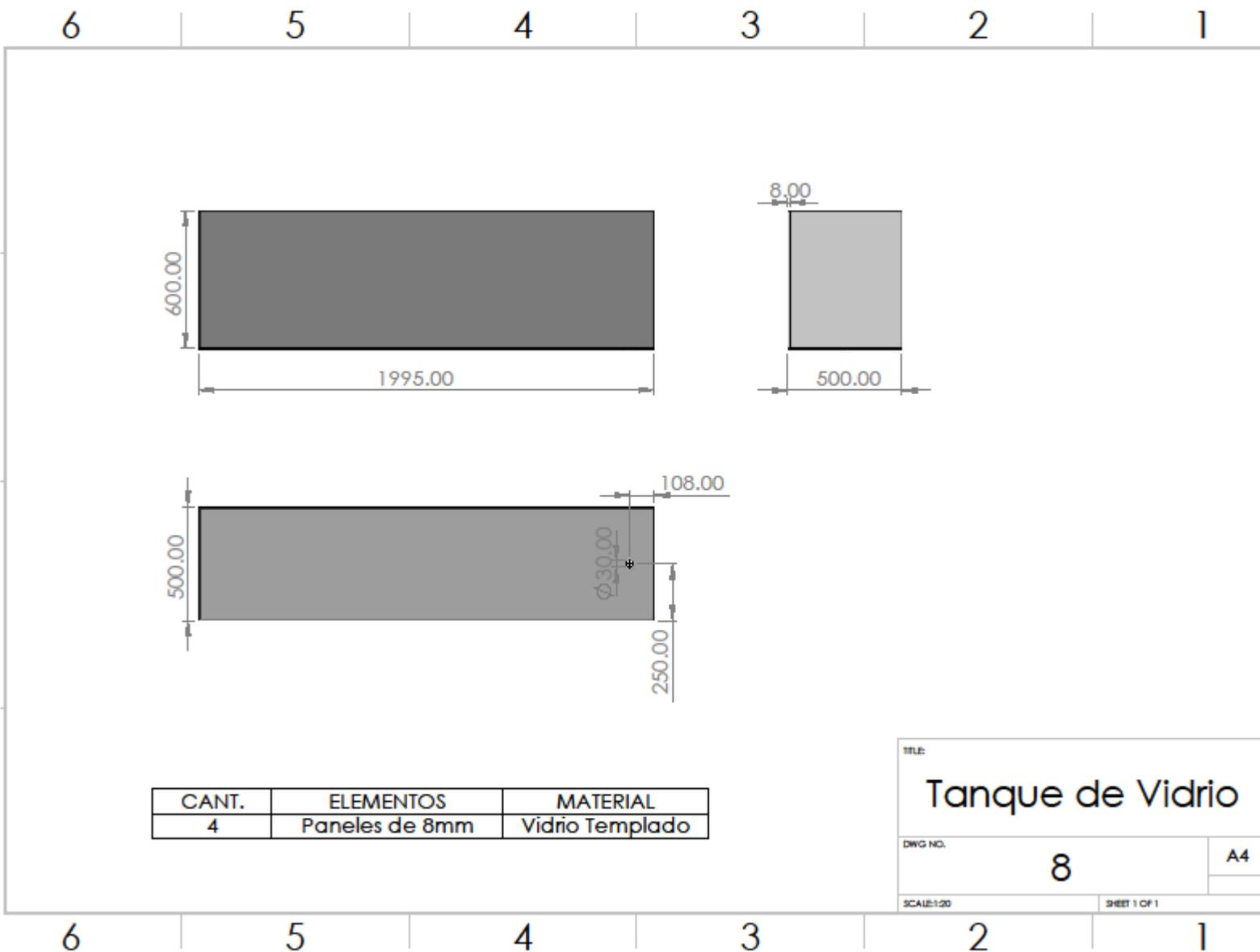


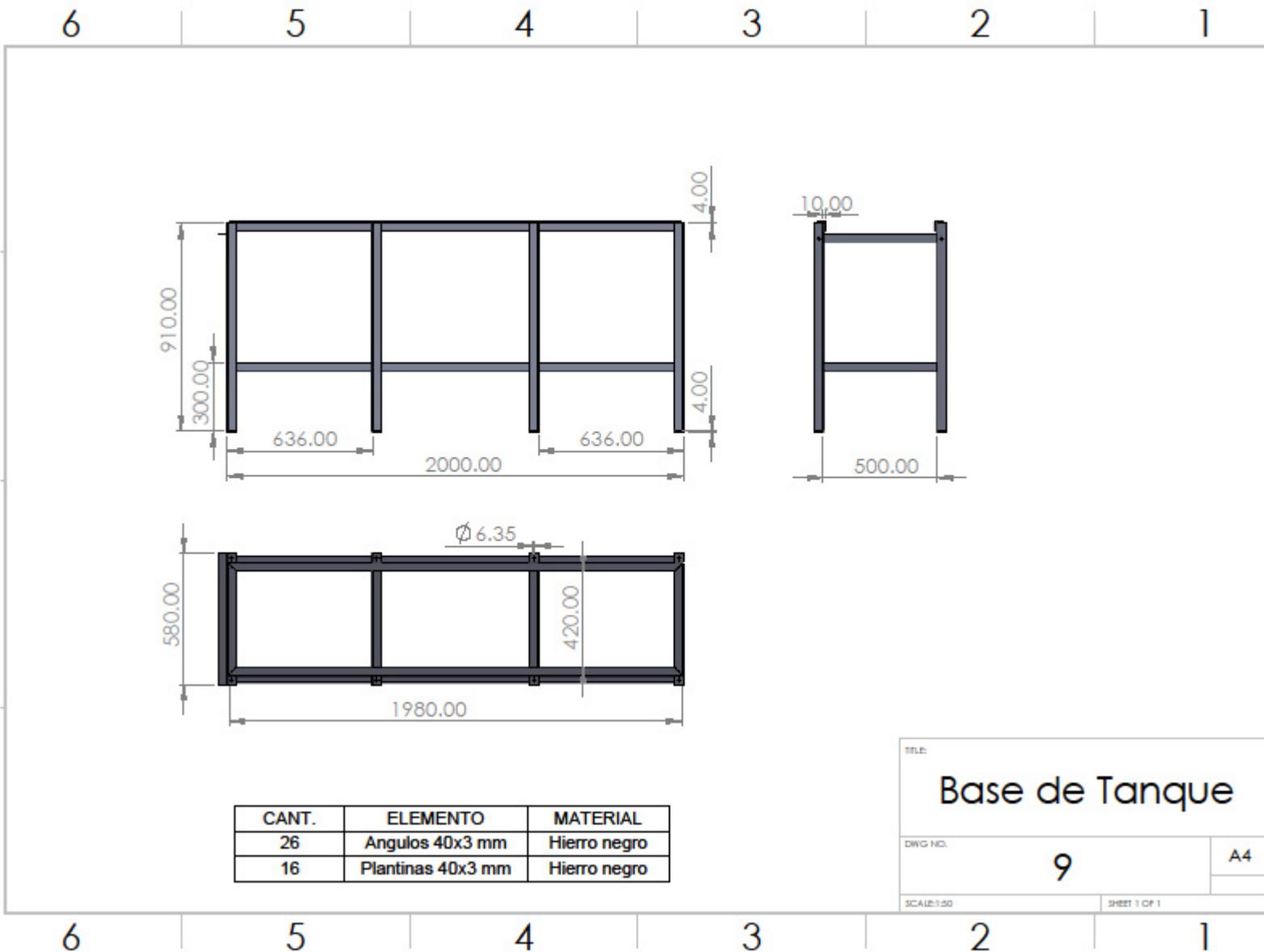


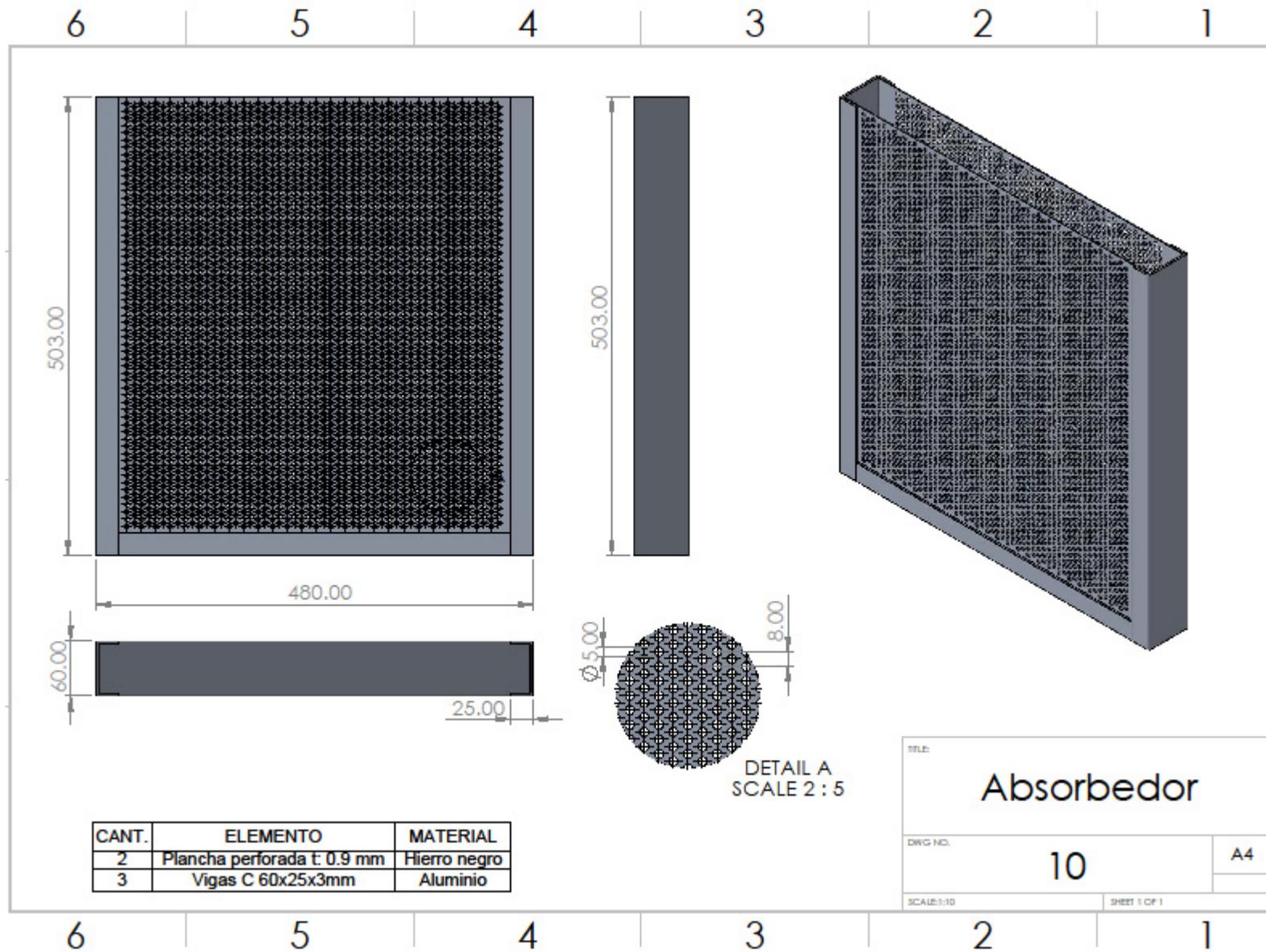


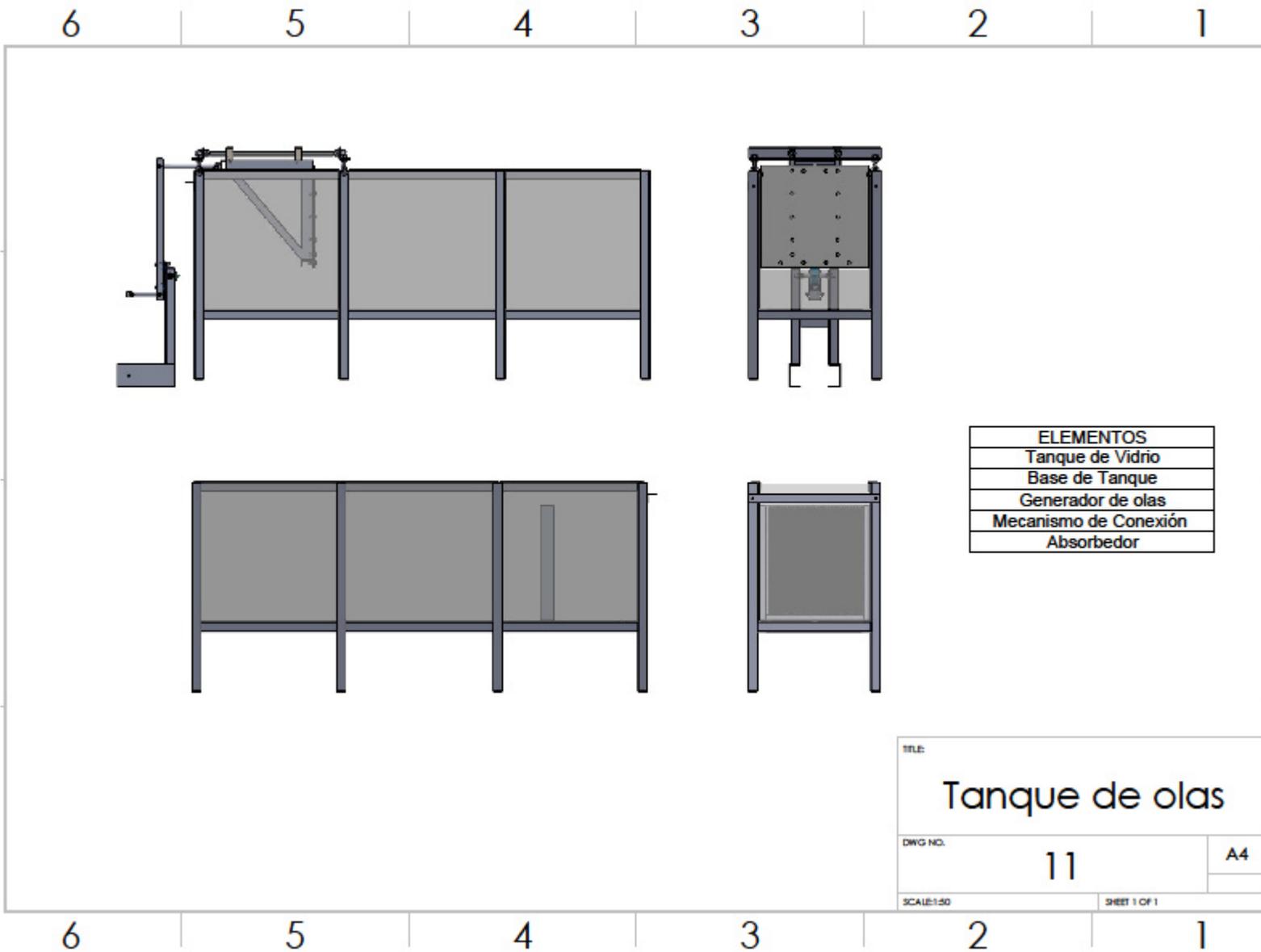












## ANEXO 2

### 1. GUÍA PARA EL USO DEL VIBRADOR VR 5800

A continuación, se presenta el procedimiento para el uso correcto del vibrador, desde la conexión del amplificador con la computadora, hasta la configuración para realizar pruebas senoidales y aleatorias, el mismo que esta presenta en VR9500 Revolution, Quick Start Guide.

#### 1.1. Establecer comunicación con el computador

##### Configuración de VR5800

Se requiere configurar la tarjeta de red dedicada para VibrationVIEW, para ello se seleccione la tarjeta de red dedicada al VR9500 desde el Panel de Control. Elegir la opción "View network status and tasks" para luego seleccionar la opción "Manage network connections", seguido de "Change adapter settings", con el clic derecho sobre la tarjeta de red conectada al VR9500 y seleccionar "Properties".

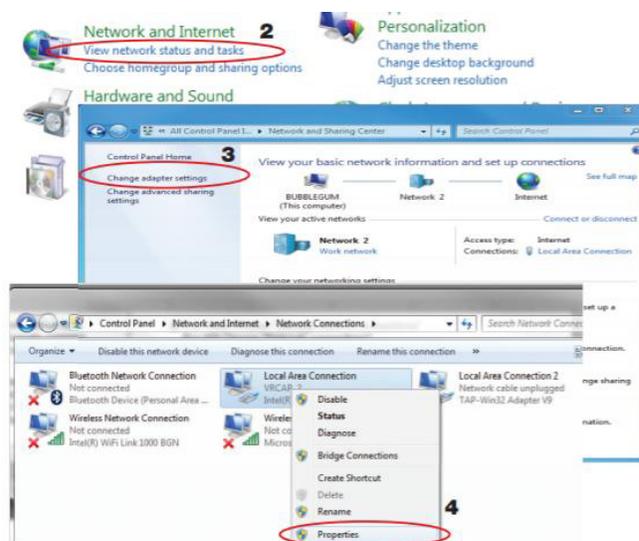


Figura 1. Configuración de comunicación para VR5800

Deshabilitar todas las opciones excepto Protocolo de Internet versión 4 (TCP / IPv4) y asignar la dirección 192.168.3.10 y la máscara de subred 255.255.255.0 como se muestra en el cuadro de diálogo "Properties" del protocolo de Internet (TCP / IP). Si se instalan varias tarjetas de red en la computadora, se puede ajustar la dirección IP. Otros valores recomendados son 192.168.2.10 y 192.168.4.10, aunque cualquier subred de Clase C o Clase D funcionará. Haga clic en el botón "Ok" para volver al cuadro de diálogo anterior. Haga clic en la pestaña "Sharing" en el cuadro de diálogo "Properties". Asegúrese de que la conexión compartida a Internet para esta conexión esté desmarcada (NO habilitada).

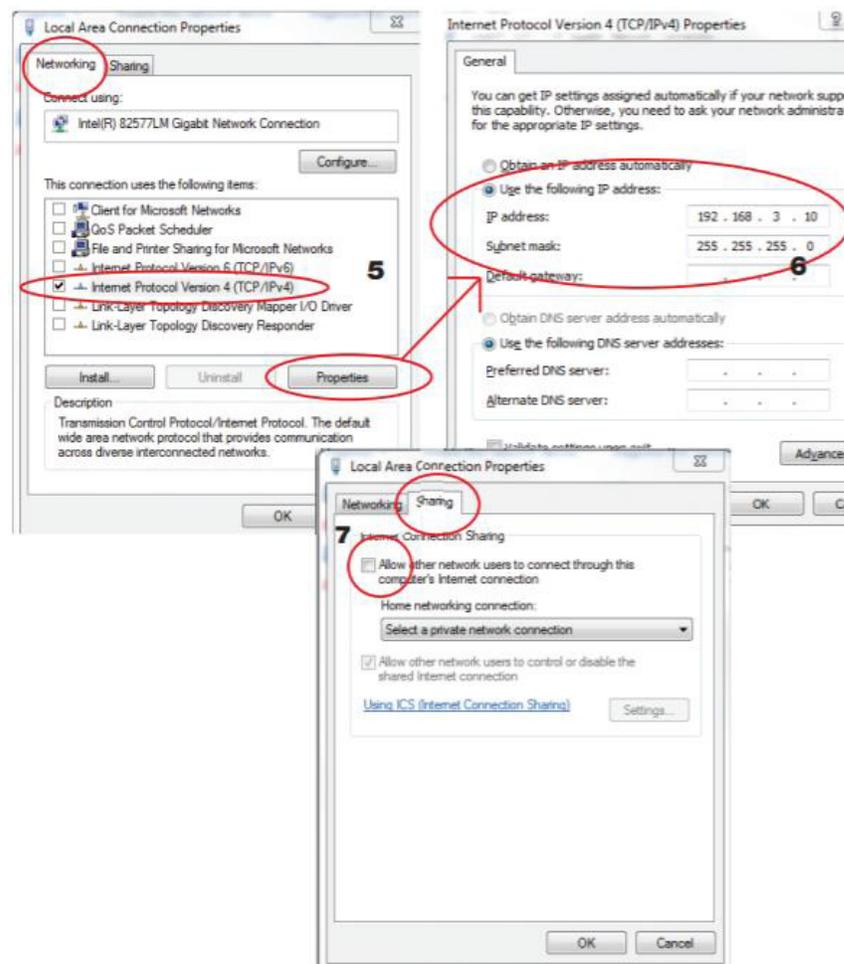


Figura 2. Configuración de comunicación para VR5800

### Conectar a VibrationVIEW

VibrationVIEW debe estar configurado para usar la conexión de red apropiada después de que la red esté configurada. Se inicia VibrationVIEW haciendo doble clic en el icono de VibrationVIEW en el escritorio. Seleccione la "Configuration" en el comando de menú de hardware. A continuación, se selecciona la tarjeta de red previamente configurada. Típicamente esto será 192.168.3.10 y aplicar.

El número de serie VR5800 se agregará al menú desplegable para los canales 1-4 cuando se conecte inicialmente a la computadora. Seleccionar el número de serie del VR5800 apropiado para configurar los canales 1-4 y, opcionalmente, los canales 5-8, los canales 9-12 y 13 a 128 (en bloques de 4 canales). A los cuadros de control del VR5800 se les asignan direcciones del rango enumerado en los parámetros de "Control Boxes Address parameters", tal como se muestra a continuación:

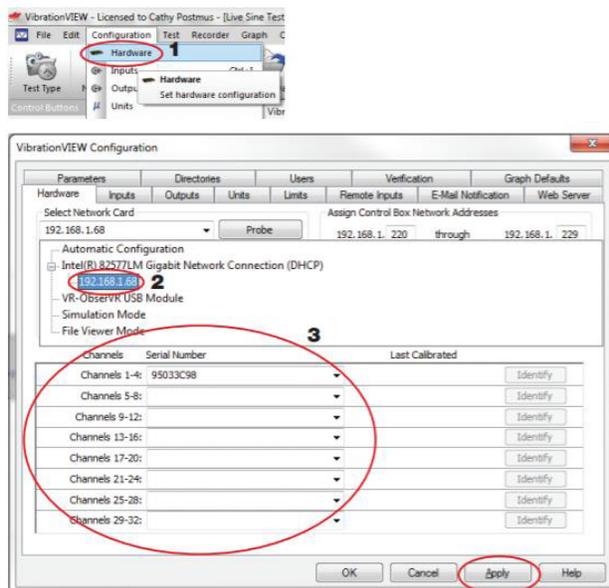


Figura 3. Configuración de comunicación en el equipo VR5800

## 1.2. Configuración para pruebas senoidales

Para programar excitaciones senoidales en el vibrador, se debe seleccionar en "New test", la opción correspondiente a Senoidal. Se va a cargar una configuración en Modo de Prueba simple por defecto y para deshabilitarla, se debe seleccionar la opción de menú de parámetros y desmarcar "Define new test as Quick Tests".

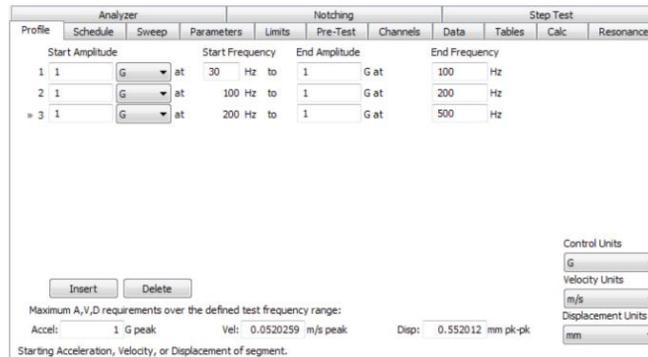


Figura 4. Logo de prueba senoidal

Se ingresan los puntos de corte de frecuencia y amplitud en la opción "Sine Profile" y con clic derecho se puede definir diferentes segmentos, insertarlos o removerlos, formando una tabla fácil de leer. Una prueba puede estar compuesta por más de 1000 segmentos. El operador puede seleccionar controlar la aceleración, velocidad o desplazamiento constante o en rampa. En "Sine Schedule" se puede ingresar la duración en términos de duración, número de ciclos sinusoidales o cantidad de barridos.

Se debe establecer un rango de seguridad, es "Sine Limits" para que la prueba se pueda abortar si la aceleración controlada supera o sobrepasa el nivel deseado por un número de dB configurado por el operador. Los límites de aborto también pueden habilitarse para canales de monitoreo individuales.

Finalmente, se aceptan y guardan todos los cambios realizados, volviendo a la pantalla principal, donde se inicia la prueba seleccionando el botón "Starting". También se pueden realizar pruebas especiales, accediendo a "Edit Test Settings", donde se pueden cambiar valores de resonancia, muescas o fichas de datos.



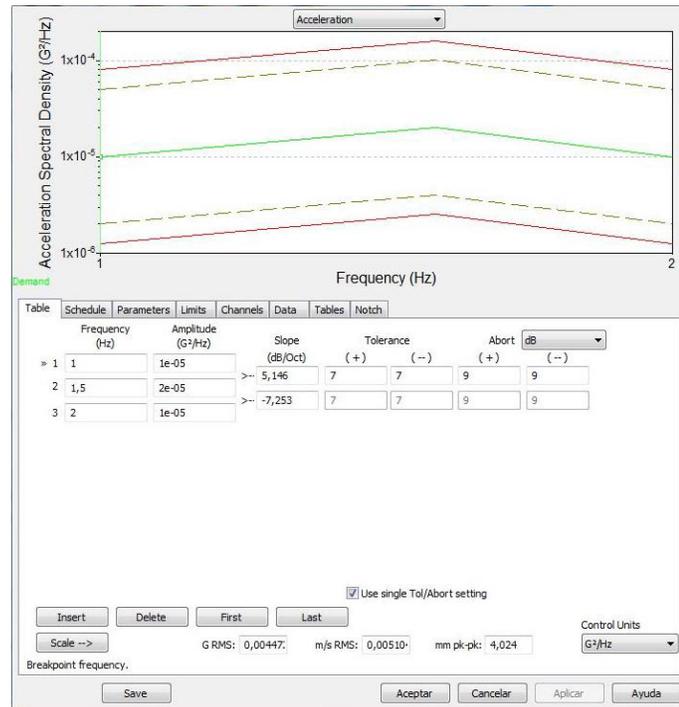
**Figura 5. Configuración para pruebas senoidales**

### 1.3. Configuración para pruebas aleatorias

Para programar excitaciones aleatorias en el vibrador, se debe seleccionar en "New test", la opción correspondiente a "Random". Al igual que en el tipo de pruebas anterior se debe desmarcar la opción de "Define new test as Quick Tests".

Entrando a la opción de "Edit test" se va a desplegar una ventana donde se podrán configurar a prueba a realizar. En "Random table" se ingresa el rango de frecuencias [Hz] y la amplitud de densidad espectral [ $g^2/Hz$ ], el rango de frecuencias puede extenderse hasta 50000 Hz. En cada segmento, se puede seleccionar amplitudes diferentes dentro del rango de frecuencias, generando un espectro con picos.

Las pruebas se pueden programar para ejecutar un período de tiempo definido por el usuario, la duración en términos de tiempo usando el formato horas:minutos:segundos es ingresada en la opción "Random Schedule".



**Figura 5. Configuración para pruebas aleatorias**

Al igual que en excitaciones senoidales, para las pruebas aleatorias el usuario puede establecer límites de seguridad para proteger el artículo de prueba y sistema de vibración, estos límites corresponden a la aceleración, límites de línea y límites de conducción. La entrada de control también se verifica contra la aceleración de vibración y los límites de desplazamiento.

Luego de aceptar y guardar los cambios realizados, el equipo está listo para comenzar las pruebas.