

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar

DISEÑO PRELIMINAR DE UN CANAL DE PRUEBAS HIDRODINÁMICAS
PARA LA ESPOL, SEGÚN LOS REQUERIMIENTOS DE LA ITTC

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Naval

Presentado por:

Ricardo André Delgado Salas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019-2020

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mi papá, Ricardo, por su constante sacrificio, entrega y apoyo incondicional a lo largo de mi vida y carrera universitaria. A mi mamá, María Eugenia, por enseñarme que la vida se trata de vencer los obstáculos y esforzarse para alcanzar tus sueños.

Hey look Ma, I Made It!

AGRADECIMIENTOS

Quiero empezar agradeciendo a mis padres, Ricardo y María Eugenia, y a mis hermanas, Karen y Brianna, por el tiempo y sacrificio que han dedicado en ayudarme.

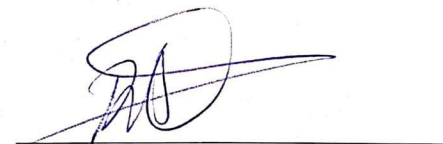
A mi tío Efrén, mi amigo Josep, y a sus familias, por su apoyo desinteresado a lo largo de mi carrera.

A Sophia, Tadea, Ericka y Jorge ya que siempre estuvieron alado mío cuando lo necesite.

A mi tutor, Rubén Paredes, y a mis demás profesores, por sus enseñanzas que han ayudado a convertirme en quien soy ahora.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; yo Ricardo André Delgado Salas doy mi 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"

A handwritten signature in blue ink, consisting of stylized initials 'RAD' followed by a long horizontal stroke extending to the right.

Ricardo André Delgado Salas

EVALUADORES



Ing. Hugo Jama Aveiga.

PROFESOR DE LA MATERIA



Rubén José Paredes Alvarado, Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Esta tesis plantea diseñar de forma preliminar un canal de pruebas hidrodinámicas para la ESPOL, siguiendo los requerimientos de la ITTC, ante la necesidad de disponer de un laboratorio que permita hacer experimentaciones de los diseños navales, evaluando el comportamiento en el mar y su eficiencia previo a su construcción, para realizarlos de una manera más eficiente, con el fin de evitar accidentes, en estructuras existentes y futuros proyectos, que provoquen pérdidas humanas, económicas y daño ambiental.

Se establecieron los requerimientos de diseño a partir de la ITTC, catastro de naves de la región, regresiones lineales y demás teorías sobre velocidades y formas de embarcaciones. Se dimensionó el canal y sus accesorios y se evaluó la viabilidad económica del proyecto a 15 años. Las dimensiones del canal se calcularon utilizando restricciones para disminuir la incertidumbre generada por la interacción del modelo-canal durante las experimentaciones y los accesorios que conforman el canal debidamente dimensionados son: el carro remolcador, generador de olas y absorbedor de olas.

Se obtuvo un TIR del 9% y un VAN de \$ 282.372,25, recuperando la inversión en 9 años, para un canal de dimensiones 90x6,3x4 m que permitirá realizar experimentos con modelos a escala de 2,5 m a una velocidad máxima de 5 m/s (1,00 Fn), en aguas calmadas o en olas, replicando el mar de la región hasta un estado de mar de nivel 5.

El diseño preliminar del canal de pruebas hidrodinámicas para la ESPOL ayudará en la prevención de siniestros navales, permitirá el desarrollo de diseños nacionales, seguridad nacional y la confiabilidad de los procesos de ingeniería marítima, por consiguiente, será una herramienta beneficiosa que aportará al crecimiento del Ecuador y sus habitantes.

Palabras Clave: Canal de pruebas hidrodinámicas, carro remolcador, absorbedor de olas, generador de olas, ITTC.

ABSTRACT

This thesis proposes to preliminary design a towing tank for ESPOL, following the ITTC requirements, given the need to have a laboratory that allows tests on naval designs, evaluating the seakeeping and its previous efficiency to its construction, to carry them out in a more efficient way, in order to avoid accidents, in existing structures and future projects, which cause human, economic and environmental damage.

Design requirements were established based on the ITTC, database of ships in the region, linear regressions and other theories on ship speeds and shapes. The towing tank and its accessories were sized, and the economic viability of the project was evaluated for 15 years. The dimensions of the towing tank were calculated using restrictions to reduce the uncertainty generated by the interaction of the model-tank during the experiments and the accessories were properly sized for the characteristics of the channel, and this are: the carriage, wave generator and wave absorber.

An IRR of 9% and a NPV of \$ 282,372.25 were obtained, recovering the investment in 9 years, for a towing tank with the following dimensions 90x6,3x4 m, that will allow tests with models at a scale of 2.5 m at a maximum speed of 5 m / s (1.00 Fn), in calm waters or in waves, replicating the region's sea to a level 5 sea state.

The preliminary design of the towing tank for ESPOL will help in the prevention of naval accidents, will allow the development of national designs, national security and the reliability of maritime engineering processes, therefore, it will be a beneficial tool that will contribute to the growth of the Ecuador and its inhabitants.

Keywords: *Towing tank, carriage, wave absorber, wave generator, ITCC.*

ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	6
ABSTRACT	7
ÍNDICE GENERAL	8
ABREVIATURAS.....	11
SIMBOLOGÍA.....	12
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS.....	16
CAPÍTULO 1.....	18
1. Introducción	18
1.1 Descripción del problema	18
1.2 Justificación del problema	20
1.3 Objetivos	20
1.3.1 Objetivo General	20
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 Marco teórico.....	21
1.4.1 Clasificación de los Canales de Pruebas Hidrodinámicas	21
1.4.2 Lineamientos recomendados por la Conferencia Internacional de Tanques de Pruebas (ITTC).....	25
1.4.3 Teoría de generador de Olas.....	27
1.4.4 Descripción de Absorberdores de Olas	29
1.4.5 Incertidumbre de mediciones de fenómenos marinos.....	31
1.4.6 Análisis Dimensional aplicado a la resistencia de buques y estados de mar	

1.4.7	Formulación para el diseño de un remolcador para Canal de Pruebas Hidrodinámicas.....	36
CAPÍTULO 2.....		39
2.	Metodología.....	39
2.1	Procedimiento para la selección de las dimensiones principales para el canal de pruebas hidrodinámicas	39
2.1.1	Longitud	40
2.1.2	Ancho.....	42
2.1.3	Profundidad.....	43
2.2	Método para la selección de los equipos para el canal de Pruebas Hidrodinámicas.....	45
2.2.1	Carro Remolcador.....	45
2.2.2	Generador de olas	47
2.2.3	Absorbedor de olas.....	48
2.2.4	Equipos de medición.....	49
2.3	Proceso para la definición de la distribución física del laboratorio	50
2.3.1	Cadena de procesos	50
2.3.2	Organigrama institucional preliminar.....	51
2.4	Análisis de áreas de la Instalación Física.....	52
2.5	Análisis de viabilidad financiera.....	58
CAPÍTULO 3.....		59
3.	RESULTADOS Y ANALISIS	59
3.1	Dimensiones principales para el canal de pruebas hidrodinámicas	59
3.2	Equipos seleccionados para el canal de Pruebas Hidrodinámicas	63
3.3	Distribución de espacios del laboratorio	64
3.4	Presupuesto referencial del diseño preliminar.....	65
CAPÍTULO 4.....		68

4. Conclusiones Y Recomendaciones	68
Recomendaciones.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
APÉNDICES.....	74

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers
ITTC	International Towing Tank Conference
OMI	Organización Marítima Internacional
HSVA	Hamburg Ship Model Basin
SVA	Schiffbau-Versuchsanstalt Postdam
VAN	Valor Actual Neto
TIR	Tasa Interna de Retorno
CNC	Control Numérico Computacional

SIMBOLOGÍA

m	Metro
s	Segundo
Cb	Coefficiente de Bloque
Fn	Numero de Froude
Z	Modulo Seccional
I	Inercia transversal
P	Potencia
τ	Torque
λ	Factor de escala
λ_o	Longitud de ola
λ_l	Dimensión lineal
E	Energía de la Densidad Espectral
Cg	Centro de Gravedad
kg	Kilogramos
kW	Kilovatio
kHz	Kilohercio
L _c	Largo del canal
B _c	Ancho del canal
H _c	Profundidad del canal
V _m	Velocidad del modelo
a	Aceleración
L _m	Eslora del modelo a escala
L _s	Eslora de la embarcación
V _s	Velocidad de la embarcación

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Canal de Pruebas Hidrodinámicas de la Universidad de Gante(Bélgica), construido en 1992	22
Figura 1.2 Canal de pruebas hidrodinámicas para hielo del laboratorio HSVA(Alemania), construido en 1972	22
.....	23
Figura 1.3 Canal Oceánico del laboratorio LabOceano(Brasil), construido en 2003.	23
Figura 1.4 Túnel de cavitación del laboratorio SVA(Viena), construido en 1980.....	23
Figura 1.5 Canal de brazo Rotante del laboratorio KRYLOV(Rusia), construido en 1965.	24
Figura 1.6 Diagrama de ubicación de equipos de medición.	25
Figura 1.7 Canales de pruebas hidrodinámicas certificados por la ITTC.	26
Figura 1.8 Tipos de generadores de ola.....	27
Figura 1.9 Esquema de propagación de ola por generador tipo pistón y flap.....	28
Figura 1.10 Potencia promedio adimensionalizada en función de la profundidad en generadores tipo pisto y flap.....	29
Figura 1.10 Esquema de absorbedor tipo playa.	30
Figura 1.11 Esquema de absorbedor tipo paneles de malla.	30
Figura 1.12 Diagrama de tipos de incertidumbre en una prueba de resistencia.....	31
Figura 1.13 Diagrama de cuerpo libre viga.....	36
Figura 1.14 Diagrama de cuerpo libre carro remolcador.	38
Figura 2.1 Zonas comprendidas en un canal de pruebas.....	40
Figura 2.2 Curva de F_n vs C_b para tipos de embarcaciones.....	41
Figura 2.3 Reflexión de olas divergente con las paredes del canal.....	43
Figura 2.4 Olas divergente, patrón de kelvin.	43
Figura 2.5 Máximo número de Froude según la profundidad del canal.....	45
Figura 2.6 Esquema de carro remolcador.	46
Figura 2.7 Esquema del laboratorio CCOB.	48
Figura 2.8 Cadena de procesos de un experimento en un canal de pruebas.	50
Figura 2.9 Taller de modelos.....	52
Figura 2.10 Taller de pintura.....	53
Figura 2.11 Área de mediciones.....	54

Figura 2.12 Muelle.....	54
Figura 2.13 Oficina de ayudantes.....	55
Figura 2.14 Oficina de técnicos.....	56
Figura 2.15 Oficina de director y asistente administrativo.....	57
Figura 2.16 Sala de reuniones.....	57
Figura 3.1 Resumen de restricciones para el ancho del canal de pruebas hidrodinámicas.	60
Figura 3.2 Resumen de restricciones para la profundidad del canal de pruebas hidrodinámicas.....	61
Figura 3.3 Vista transversal de sección típica del Canal de Pruebas Hidrodinámicas.....	62
Figura 3.4 Distribución física del laboratorio.....	65
Figura 3.5 Máximo número de Froude permitido por canal de prueba hidrodinámica.....	67
Figura A.1 Histograma de eslora de modelos en canales de prueba certificados.....	75
Figura A.3 Histograma de longitud de canales de prueba certificados.....	76
Figura A.4 Histograma de velocidad de modelos en canales de prueba certificados.....	76
Figura B.1 Esquema de carro remolcador.....	80
Figura B.3 Diagrama de cuerpo libre viga.....	81
Figura B.1 Ficha técnica vigas IPN.....	82
Figura B.4 Deflexión en viga IPN200 (Vista Isométrica).....	84
Figura B.5 Deflexión en viga IPN200 (Vista Transversal).....	84
Figura B.6 Deflexión en viga IPN240 (Vista Isométrica).....	85
Figura B.7 Deflexión en viga IPN240 (Vista Transversal).....	85
Figura B.8 Diagrama de cuerpo libre carro remolcador.....	87
Figura B.8 Ficha Técnica de rueda para carro remolcador.....	88
Figura B.9 Curvas típicas de motores siemens.....	89
Fuente: Autoría propia.....	92
Figura D.1 Esquema 2D de carro remolcador.....	97
Figura D.2 Esquema 3D de carro remolcador.....	97
Figura D.3 Distribución Laboratorio Planta Alta.....	98
Figura D.4 Distribución Laboratorio Planta Baja.....	99
Figura D.5 Fachada 2D Laboratorio.....	100
Figura D.6 Fachada 3D Laboratorio (1).....	101

Figura D.7 Fachada 3D Laboratorio (2).....	101
Figura D.8 Ilustración 3D de distribución del Laboratorio (1).....	102
Figura D.9 Ilustración 3D de distribución del Laboratorio (2).....	102
Figura D.10 Ilustración 3D del canal de pruebas hidrodinámicas (1)	103
Figura D.11 Ilustración 3D del canal de pruebas hidrodinámicas (2)	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resumen de velocidad máxima de modelos según tipo de embarcación	41
Tabla 2.2 Tabla de resumen de rango de frecuencias por estado de mar escalado.	47
Tabla 2.3 Tabla de resumen de rango propiedades de ola a generarse en el canal de pruebas.....	48
Tabla 2.4 Tabla comparativa entre CCOB y el canal de pruebas diseñado.	49
Tabla 2.5 Organigrama institucional	51
Tabla 3.1 Resumen de longitud de las zonas de un canal de pruebas.	59
Tabla 3.2 Resumen de base de datos de embarcaciones nacionales.....	60
Tabla 3.3 Resumen de resultados de las dimensiones principales del canal de pruebas.	62
Tabla 3.4 Configuración del absorbedor de olas de nueve paneles de mallas verticales.	63
Tabla 3.5 Resumen de análisis financiero por canal de pruebas.	66
Tabla 3.6 Resumen de numero de Froude máximo de prueba por canal sin realizar corrección de incertidumbre.	66
Tabla A.1 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (América).	77
Tabla A.2 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Europa & Oceanía).	77
Tabla A.3 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Europa & Oceanía).	78
Tabla A.4 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Asia).....	78
Tabla A.4 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Asia).....	79
Tabla C.1 Rubros del presupuesto de la obra civil.	90
Tabla C.2 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Preliminares).	90
Tabla C.3 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Movimiento de Tierras)..	90
Tabla C.4 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil.....	91
(Estructuras en Hormigón y Metal).	91
Tabla C.5 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil.....	91
(Paredes y Revestimientos).....	91
Tabla C.6 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Tumbados).	92
Tabla C.7 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Puertas).....	92
Tabla C.8 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Canal).....	92

Tabla C.9 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Instalaciones Sanitarias).	92
Tabla C.10 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Instalaciones Eléctricas).	93
Tabla C.11 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 110 m).	93
Tabla C.12 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 90 m).	93
Tabla C.13 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 70 m).	94
Tabla C.14 Resumen de presupuesto del personal.....	94
Tabla C.15 Ejemplo de cálculo del costo de mantenimiento del canal.	94
Tabla C.16 Ejemplo de cálculo del costo del uso del carro remolcador en el canal de 90 m.	95
Tabla C.17 Resumen presupuesto de costos operacionales por longitud de canal.	95
Tabla C.18 Resumen de la estimación de ingresos usando valores referenciales de canales de pruebas operativos.....	95
Tabla C.19 Resumen presupuesto de equipos.....	96

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La generación de diseños de estructuras flotantes requiere de una predicción confiable de las fuerzas actuando sobre la misma para proyectar su comportamiento en el mar. Tradicionalmente se sigue una espiral de diseño que requiere de varias iteraciones que disminuyen la incertidumbre de manera gradual. Esta inicia con la etapa de diseño conceptual, seguido de la etapa de diseño preliminar, hasta llegar al diseño contractual y de detalle. El canal de pruebas hidrodinámicas es una herramienta que permite realizar diseños más detallados y con menor incertidumbre la cual permitirá potenciar la investigación, dar apoyo al desarrollo de nuevas tecnologías y mejorar la confianza en el desarrollo de los procesos de diseño e ingeniería de nuestro país.

Se va a elaborar el diseño preliminar de un canal de pruebas para la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar (FIMCM) de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) siguiendo los requerimientos de la Conferencia Internacional de Tanques de Prueba, (ITTC por sus siglas en inglés), considerando que esta organización está formada por expertos en el área de hidrodinámica, que desde su creación han generado procedimientos, guías y técnicas para el desarrollo de experimentaciones y análisis numéricos en la industria marítima.

El desarrollo de este proyecto tiene impacto directo en quienes trabajen con el sector marítimo como: ingenieros, diseñadores, investigadores, industria pesquera, de transporte y turismo; además de las fuerzas armadas navales y otras entidades gubernamentales.

1.1 Descripción del problema

Ecuador inicia la tradición de construcción naval desde la época de la colonia, pero a partir de 1960, comienza el proceso industrial de construcción de embarcaciones. Este proceso de elaboración de ingeniería consiste en el cumplimiento sistemático de pasos que permiten al ingeniero desarrollar un diseño. Estos se resumen en etapas de diseño iniciando con un diseño conceptual, seguido por el preliminar, contractual y de detalle. La etapa de diseño preliminar es donde se realiza la optimización de los datos, iterando los cálculos para disminuir la incertidumbre. Aquí es donde se utilizan diferentes

herramientas computacionales y experimentales para la evaluación del diseño, siendo una fase fundamental del proceso de diseño, puesto que el medio en el que trabaja una embarcación, es aleatorio e impredecible, y diseñar utilizando únicamente teorías, regresiones lineales, y base de datos puede incrementar el riesgo de accidentes provocando pérdidas humanas, económicas y un impacto ambiental negativo.

En el proceso de diseño resulta de gran importancia alcanzar las necesidades establecidas para el desempeño de la embarcación como son: la velocidad de trabajo, la seguridad de los tripulantes y la resistencia estructural. Las cuales se obtienen realizando cálculos de resistencia al avance, para definir la potencia requerida de los motores, cálculos de estabilidad, para evitar riesgos de zozobra, y cálculos del comportamiento en el mar, para obtener las aceleraciones de la embarcación, determinando si la tripulación presenta riesgos al momento de trabajar, y para conocer las cargas dinámicas que soportará la estructura de la embarcación.

Hoy en día se pueden realizar análisis numéricos computacionales, lo que otorga al diseñador una herramienta rápida para la evaluación de su trabajo. Sin embargo, aún sigue latente la necesidad de validación mediante la experimentación, ya que los programas computacionales necesitan de información inicial para la simulación, por ejemplo, las condiciones de frontera. Para lo cual es necesario entender el fenómeno físico que ocurre en el cuerpo, teniendo como necesidad la ejecución de experimentos. Por ello, se plantea desarrollar una propuesta de diseño de forma preliminar, de un canal de pruebas hidrodinámicas para la Facultad de Ingeniería Marítima y Ciencias del Mar de la ESPOL. Se expondrá un diseño que cumpla con los requerimientos de la ITTC. La cual es una asociación voluntaria de organizaciones mundiales creada en 1932, que tiene la responsabilidad de predecir el rendimiento hidrodinámico de embarcaciones e instalaciones marinas en función de los resultados de experimentos físicos y numéricos [1]. Además, esta propuesta, tendrá como única restricción el tamaño de los modelos a analizar, el mismo que tendrá un máximo de 2.50 metros, el cual se encuentra dentro del rango típico de eslora de modelos que va desde 1.8 a 14 m, que permitirá facilidad de maniobrabilidad y construcción, sin afectar la confiabilidad de los experimentos.

1.2 Justificación del problema

Ante la falta de una herramienta que permita validar los diseños navales, para disminuir el riesgo de siniestros que pueden ocasionar pérdidas humanas, económicas y daño al medio ambiente, se ve la necesidad de realizar un diseño preliminar de un canal de pruebas hidrodinámicas que permita posteriormente su construcción.

Un canal de pruebas es una cuenca de varios metros de largo y ancho, equipado con un carro remolcador, donde se experimenta con modelos a escala de diseños navales. El carro remolcador se encarga de trasladar los modelos, a velocidades específicas a lo largo del canal. Está equipado con computadoras y dispositivos para registrar o controlar, variables como la velocidad de avance, distribución de pesos, fuerza de resistencia, desplazamiento, aceleraciones, profundidad del agua y temperatura.

El canal permitirá la evaluación experimental de la interacción de cualquier tipo de estructura flotante con el agua. Al someter un modelo físico a las diferentes condiciones de velocidad y estado de mar, se obtienen valores más confiables de resistencia y respuesta a las olas, debido a que la incertidumbre es menor porque el proceso experimental entrega datos precisos.

El canal de pruebas hidrodinámicas brinda beneficios en la mejora de la confiabilidad de los procesos de ingeniería, reduciendo el costo de futuros proyectos, apoyando al desarrollo de nuevas tecnologías marinas, en la evaluación de la eficiencia energética y contribuyendo en la formación académica.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar de forma preliminar un canal de pruebas hidrodinámicas para la ESPOL, siguiendo los requerimientos de la ITTC, aumentando la confiabilidad en los diseños navales en el Ecuador.

1.3.2 Objetivos Específicos

- 1.3.2.1 *Identificar los requerimientos de la Conferencia Internacional de Tanques de Prueba y los parámetros que originan incertidumbres para pruebas de resistencia al avance y comportamiento en olas.*
- 1.3.2.2 *Dimensionar el canal de pruebas incluyendo sus accesorios aplicando los requerimientos de la Conferencia Internacional de Tanques de Prueba (ITTC).*
- 1.3.2.3 *Evaluar la viabilidad económica del proyecto, mediante la elaboración de un presupuesto de la instalación física y equipos de medición seleccionados.*

1.4 Marco teórico

1.4.1 Clasificación de los Canales de Pruebas Hidrodinámicas

Para desarrollar experimentos de modelos a escala de diseños navales, existen diferentes tipos de canales de prueba dependiendo de los parámetros de medición de interés. Entre ellos encontramos:

1. *Canal de Pruebas Hidrodinámicas convencional*, es una cuenca, en la cual una de sus dimensiones es significativamente exagerada. Es un laboratorio de ambiente controlado, donde utilizando un carro remolcador se arrastran modelos a escala de embarcaciones, en aguas calmadas o con olas, las cuales son formadas por un generador de olas ubicado a uno de sus extremos, y disipadas por un absorbedor de olas en el extremo opuesto. Esto con el fin de realizar pruebas experimentales para evaluar el comportamiento de un diseño en el agua. Este canal permite evaluar los siguientes aspectos de los diseños: estabilidad, resistencia al avance en aguas calmadas y olas, estimación de cargas estructurales, comportamiento en el mar y eficiencia energética.



**Figura 1.1 Canal de Pruebas Hidrodinámicas de la Universidad de Gante(Bélgica),
construido en 1992**

Fuente: Flanders Hydraulics Research & Ghent University, 2016

2. *Canal de Pruebas Hidrodinámicas para Hielo*, este canal además de realizar las mismas experimentaciones que un canal de pruebas regular debe ser capaz de poder bajar la temperatura del agua, al punto de producir capas de hielo de diferente espesor. Esto con el fin de poder evaluar la interacción entre el modelo y el hielo, para poder determinar la potencia que se necesita para navegar en estas condiciones.



**Figura 1.2 Canal de pruebas hidrodinámicas para hielo del laboratorio HSVA(Alemania),
construido en 1972**

Fuente: HSVA, 2016

3. *Canal Oceánico*, es una cuenca, en la cual dos de sus dimensiones son significativamente exageradas. Esto para poder realizar movimientos de maniobra del modelo y que pueda recibir olas en todas las direcciones.



Figura 1.3 Canal Oceánico del laboratorio LabOceano(Brasil), construido en 2003.
Fuente: LabOceano, 2003

4. *Túnel de cavitación*, es un sistema cerrado que recircula el agua a diferentes velocidades y presiones. Se utiliza para realizar pruebas de hélices en condiciones de aguas abiertas, u otros apéndices de una embarcación que se encuentran sumergidos en el agua. Permite realizar análisis en: cavitación, vibración y eficiencia.



Figura 1.4 Túnel de cavitación del laboratorio SVA(Viena), construido en 1980.
Fuente: SVA, 2016

5. *Canal de brazo Rotante*, es un canal largo que termina en una curva pronunciada. Este permite analizar maniobrabilidad de embarcaciones, torpedos y submarinos.



Figura 1.5 Canal de brazo Rotante del laboratorio KRYLOV(Rusia), construido en 1965.
Fuente: KRYLOV, 2016

Para el presente proyecto se consideraron como necesidad realizar pruebas de: estabilidad, resistencia al avance en aguas calmadas y olas, estimación de cargas estructurales, comportamiento en el mar y eficiencia energética, de manera que el canal de pruebas seleccionado fue el de tipo convencional.

La instrumentación necesaria para una prueba de resistencia es la siguiente:

1. **Dinamómetro (Load Cell):** este instrumento tiene como función medir fuerza. Los dinamómetros utilizados en pruebas de resistencia al avance cuentan con un sistema que restringe los grados de libertad de movimiento de la embarcación, permitiendo que la embarcación solamente tenga movimiento de cabeceo y alzada.
2. **Medidor de trimados (Devices for sinkage & trim):** es un instrumento que tiene como función medir los movimientos verticales de la proa y popa del modelo. Comúnmente viene integrado con los dinamómetros de resistencia de embarcaciones.
3. **Tacómetro (Tachometer):** es un instrumento que tiene como función medir las rotaciones de las llantas del carro remolcador, con el fin de medir la velocidad de avance.
4. **Termómetro (Thermometer):** es un instrumento que mide la temperatura del agua. Para pruebas de resistencia, es necesario un termómetro especial capaz de medir y transmitir la temperatura en tiempo real.

5. Ultrasonido de agua (Sonar Wave Probe): es un instrumento utilizado para medir la altura del agua en tiempo real.

En la Figura 1.6 se puede observar la ubicación de la instrumentación para las pruebas de resistencia.

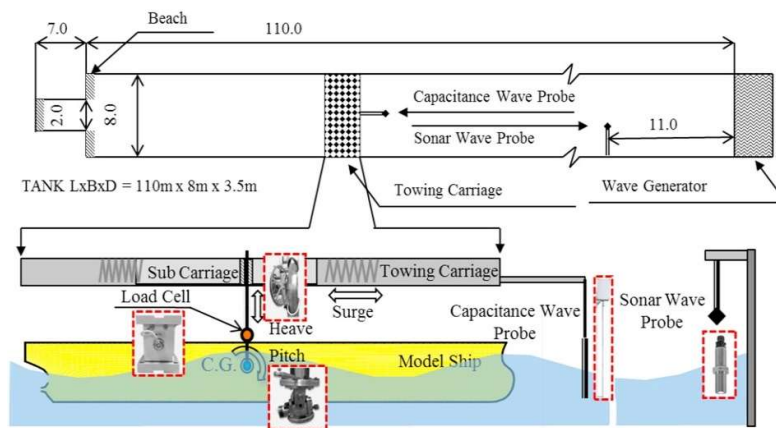


Figura 1.6 Diagrama de ubicación de equipos de medición.

Fuente: Younghwam & Dong-Min, 2016

1.4.2 Lineamientos recomendados por la Conferencia Internacional de Tanques de Pruebas (ITTC)

La Conferencia Internacional de tanques de prueba, o “International Towing Tank Conference”, es una asociación voluntaria de organizaciones internacionales que tienen la responsabilidad de la predicción del comportamiento hidrodinámico de embarcaciones e instalaciones marinas, basadas en resultados de experimentos físicos y numéricos [2]. Esta conferencia cuenta con más de 40 canales de pruebas hidrodinámicas convencionales certificados en el mundo, de los cuales dos están ubicados en sur América, uno en Brasil y otro en Chile.

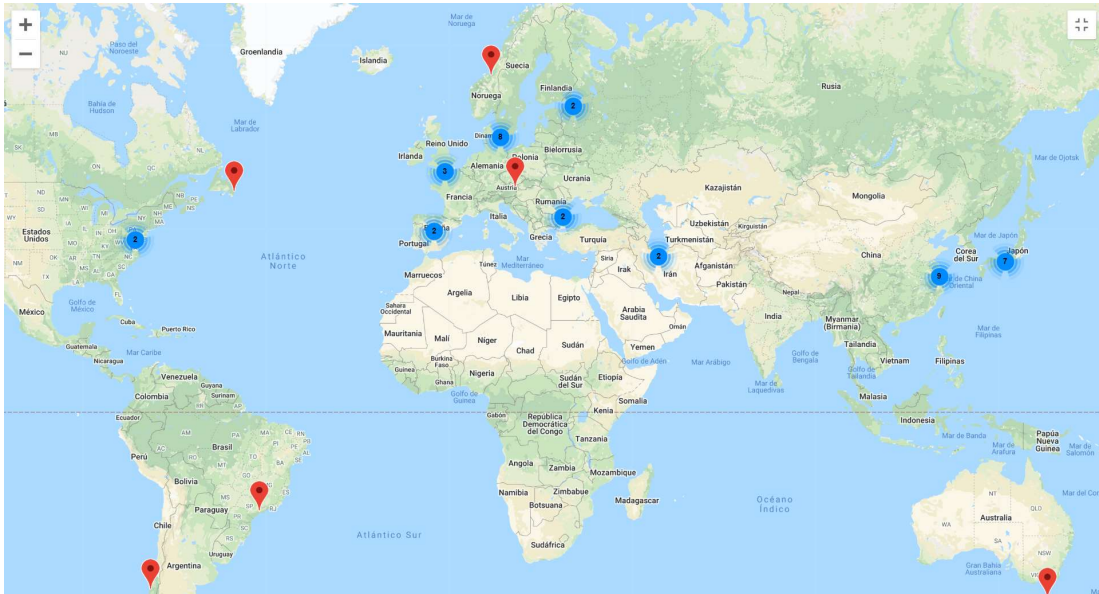


Figura 1.7 Canales de pruebas hidrodinámicas certificados por la ITTC.

Fuente: International Towing Tank Conference, 2019

La ITTC, es reconocida como una organización no gubernamental por la Organización Marítima Internacional (OMI). Se fundó en el año 1932 y desde entonces cada tres años se realizan conferencias.

Como resultados de estas conferencias, la ITTC ha creado guías y lineamientos de procedimiento en canales de prueba. Entre las guías y lineamientos consideradas en este trabajo se encuentran:

1. *Control de documentos y datos (4.2.4)*, donde indican como debe ser elaborado el reporte de los experimentos.
2. *Preparación de experimento (7.5-01)*, detalla cómo elaborar los modelos, la calibración de los instrumentos y como procesar la incertidumbre de los datos recolectados.
3. *Experimentación (7.5-02-02 – 7.5-02-07)*, donde se encuentran guías para las experimentaciones de: resistencia, propulsión, pruebas de hielo, pruebas en vehículos marinos de alta velocidad, maniobrabilidad, cargas y respuestas, comportamiento en el mar, ingeniería oceánica y por último estabilidad.

Además, también han desarrollado lineamientos y guías para experimentación numérica.

1.4.3 Teoría de generador de Olas

Un generador de olas es un equipo mecánico que, tras el movimiento cíclico de sus partes en contacto con el agua, es capaz de producir olas. Los generadores de olas se clasifican por su mecanismo en los siguientes tipos: pistón, solapa e inmersión. Ver Figura 1.8.

Para el canal de pruebas hidrodinámicas se consideró un generador de tipo solapa o “flap”, debido a que las condiciones a evaluar son de mar abierto en aguas profundas y este es el recomendado para generar olas de aguas profundas. Este es un panel que se ubica a lo largo de la profundidad del canal. Donde uno de sus extremos funciona como pivote, mientras el otro es empujado de manera mecánica para la generación de olas.

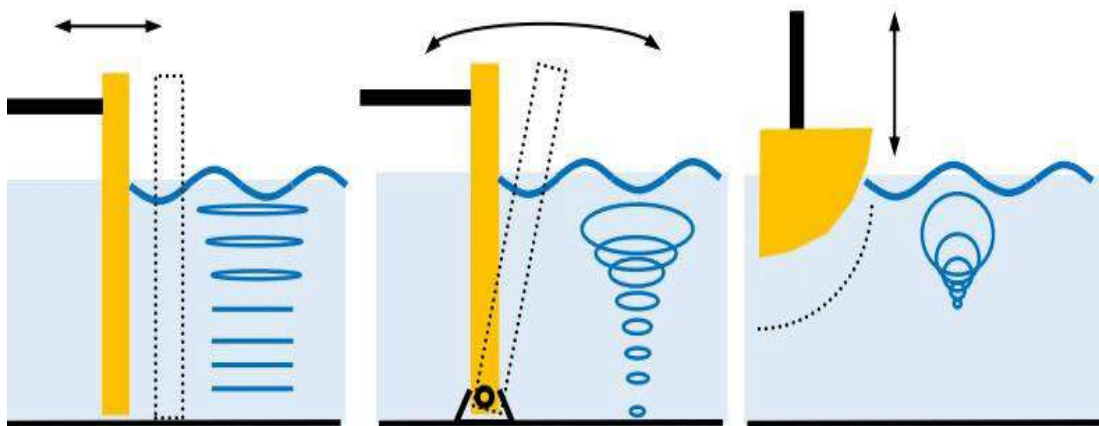


Figura 1.8 Tipos de generadores de ola.
Fuente: Kawaguchi, Nakano, Miyajima, & Arikawa, 2019

Para un generador tipo flap, es posible determinar la relación entre el desplazamiento del panel y las características principales de la ola generada considerando la profundidad del agua en el reservorio [3] , como se muestra en la Figura 1.9.

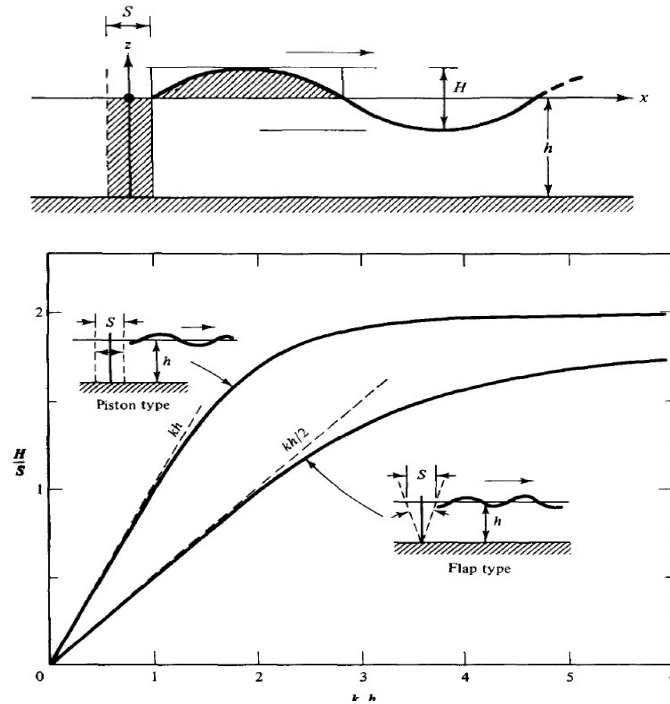


Figura 1.9 Esquema de propagación de ola por generador tipo pistón y flap.
 Fuente: Dean & Dalrymple, Wavemaker Theory, 1991

Para el generador tipo solapa (flap), existe la siguiente formulación:

$$\frac{H}{S} = 4 \left(\frac{\sinh(kh)}{kh} \right) \frac{khsin(kh) - \cosh(kh) + 1}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (1.1)$$

Donde:

H = Altura de la ola generada

S = desplazamiento horizontal del punto más alejado del pivote de la solapa

k = Numero de la ola producida

h = profundidad del agua

La cual permite predecir la ola a generar según las variables indicadas.

La potencia requerida para generar las olas es obtenida con la siguiente formulación:

$$P = ECn \quad (1.2)$$

Donde:

E = Energía promedio por unidad del ancho del panel.

C_n = Velocidad a la que la energía se transmite, o velocidad de grupo. La cual para aguas profundas es igual a 0.5C.

C = Velocidad de la ola.

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \lambda_0 \quad (1.3)$$

Donde:

λ_0 = Longitud de ola.

ρ = Densidad del agua.

H = Altura de la ola.

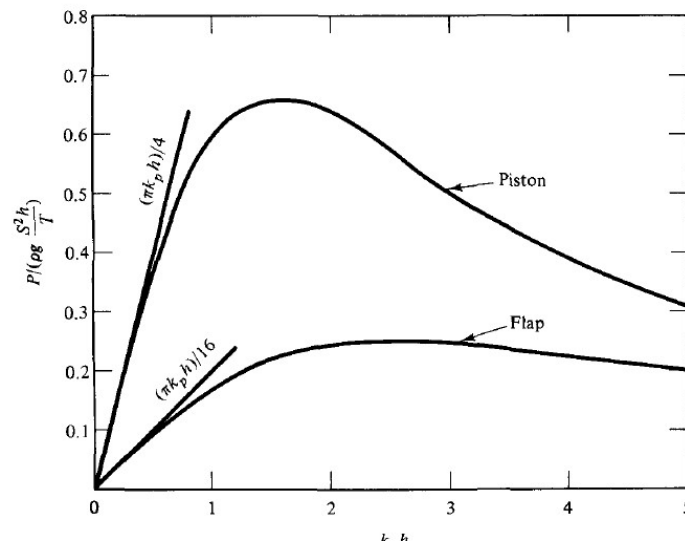


Figura 1.10 Potencia promedio adimensionalizada en función de la profundidad en generadores tipo pisto y flap.

Fuente: Dean & Dalrymple, Wavemaker Theory, 1991

1.4.4 Descripción de Absorbedores de Olas

El absorbedor de olas es un sistema que se ubica al extremo opuesto del generador de olas para minimizar la energía de las olas reflejadas, evitando que se produzcan interferencias en los datos de la experimentación.

Los absorbedores se clasifican en absorbedores de playa y absorbedores de paneles.

El absorbedor de playa es una configuración en donde la profundidad del tanque se reduce progresivamente, imitando a una playa real. Ver Figura 1.10.

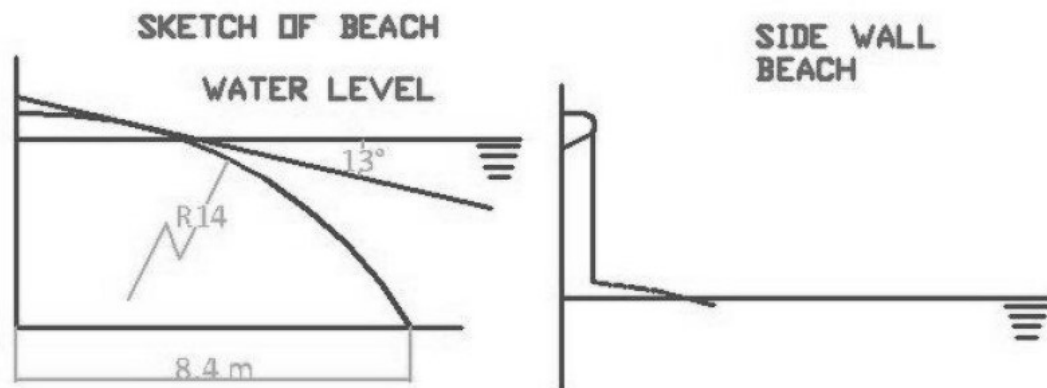


Figura 1.10 Esquema de absorbedor tipo playa.
Fuente: Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, 1976

El absorbedor de panel es una configuración de varios paneles de malla, entre verticales y horizontales, donde cada panel tiene una porosidad diferente, con la finalidad de disipar progresivamente la energía de la ola. Ver Figura 1.11.

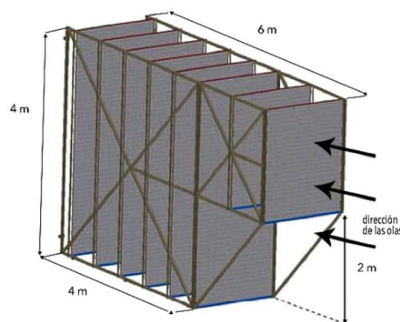


Figura 1.11 Esquema de absorbedor tipo paneles de malla.
Fuente: Klinghammer, Lomónaco, & Higuera, 2007

La longitud óptima de este tipo de absorbedor, está entre 0.35 y 1 vez la longitud de la ola. En la publicación “Design optimization for a passive mesh screen wave absorber for the CCOB”, se muestran resultados de diferentes combinaciones de mallas que fueron probadas. Donde se demostró que, para canales de 3 m de profundidad, la mejor combinación fue la de 9 paneles de malla verticales. Por consiguiente, es la configuración

conveniente para el diseño del canal, debido a que sus restricciones de diseño incluyen las del presente proyecto. [4]

1.4.5 Incertidumbre de mediciones de fenómenos marinos

Según, Pereira [5], la incertidumbre es un parámetro que permite medir la correlación de los datos, pudiéndose interpretar como error. Esto significa que mientras mayor sea la incertidumbre, mayor es la duda de que los datos sean válidos.

Se han identificado posibles fuentes de incertidumbre de experimentos, las cuales son:

1. Falta de conocimiento de los efectos ambientales sobre la medición.
2. Factor humano.
3. Valores asignados a constantes, en el proceso de datos.
4. Asunción de hipótesis del modelo incorporadas al sistema de medidas.
5. Condiciones aparentes en repetición de experimentos.

Según la ITTC [6], los tipos de incertidumbre a presentarse en experimentos en un canal de pruebas hidrodinámicas son: geometría, instalación, calibración, repetición de experimento y reducción de datos. Ver Figura 1.12.

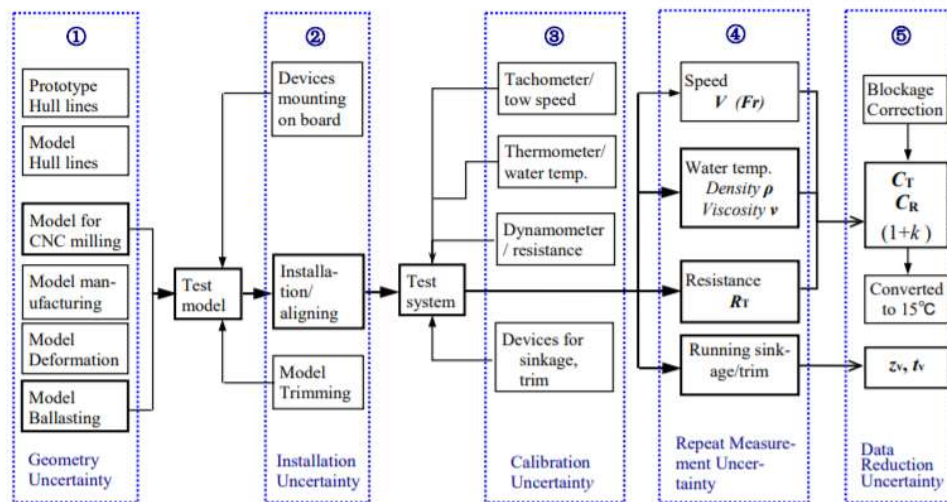


Figura 1.12 Diagrama de tipos de incertidumbre en una prueba de resistencia.
Fuente: General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Test 7.5-02-02-02, 2017

1. *Incertidumbre de Geometría*: se presenta en todo el proceso de construcción del modelo, desde los planos del prototipo, la manufactura del modelo y las propiedades físicas a replicar.
2. *Incertidumbre de instalación*: se presenta durante la experimentación, en la distribución de pesos, el alineamiento y el trimado.
3. *Incertidumbre de calibración*: se presenta en los equipos electrónicos de recolección de datos.
4. *Incertidumbre de repetición de experimento*: al repetir el experimento las condiciones iniciales nunca serán iguales, por lo cual el manejo de datos arrastra incertidumbres.
5. *Incertidumbre de reducción de datos*: dependiendo de efectos hidrodinámicos, es posible que se deban hacer correcciones a los datos, lo cual genera incertidumbre. Esto depende de las limitaciones de la instalación física.

De acuerdo a lo comentado por Pereira [5], en un experimento, no siempre se mide la variable deseada de forma directa. Se realizan mediciones de otros parámetros y, por medio de cálculos se llega a la variable de interés.

Como influyen estas incertidumbres en el valor de medida final, se lo conoce como propagación de error. El error está comprendido por los errores sistemáticos y los errores de precisión.

Los errores sistemáticos son debido a los desaciertos en los procedimientos de medida.

Éstos se clasifican en:

1. Errores por calibración del instrumento
2. Errores por adquisición de datos
3. Errores por reducción de datos

Para el cálculo de estimación del valor total del error sistemático, se utiliza la suma cuadrática denominada RSS (root sum square):

$$B_i = \sqrt{\sum_{k=1}^J (B_i)_k^2} \quad (1.4)$$

Donde:

B_i = estimación del error sistemático asociado a la variable de interés

$(B_i)_k$ = son las estimaciones de los errores sistemáticos que aportan al error sistemático total. Los valores de $(B_i)_k$ deben ser estimados para cada variable utilizando la información disponible en el momento.

Los errores de precisión son debido a eventos que pueden dar varias respuestas ante la misma medida. Se encuentra el factor humano, condiciones ambientales, los instrumentos, las variaciones en energía eléctrica, etc.

Para el cálculo de estimación del error de precisión se utiliza la siguiente fórmula estadística:

$$P_r = t * S_r \quad (1.5)$$

Donde:

t = factor de cobertura.

S_r = desviación estándar de N muestras.

1.4.6 Análisis Dimensional aplicado a la resistencia de buques y estados de mar

El análisis dimensional es un método que permite crear relaciones simplificadas de un grupo de variables físicas, basándose en el principio que toda ecuación que exprese una relación física debe ser dimensionalmente homogénea.

La resistencia al avance de un cuerpo en el agua, tiene dos componentes friccional y residual. La resistencia friccional es el resultado de la suma de todas las fuerzas tangenciales del fluido, ocasionada por el contacto de un cuerpo moviéndose en el agua, y la resistencia residual es el resultado de la suma de todas las fuerzas normales actuando en toda la superficie del cuerpo sumergido, ocasionando olas en la superficie del agua en el caso de un cuerpo semisumergido.

Aplicando el análisis dimensional a un problema de resistencia, se llega a que un valor adimensional de resistencia, para el caso de la resistencia residual, es equivalente a una función que depende de la velocidad, longitud y gravedad, a su vez, en el caso de la resistencia friccional, este depende de la velocidad, longitud y viscosidad del agua.

Según el PNA [7], William Froude, llegó a la conclusión de que la resistencia residual de embarcaciones geoméricamente similares, modelo-prototipo, es proporcional al cubo de las dimensiones lineales, siempre y cuando sus velocidades se encuentran en la razón de la raíz cuadrada de sus dimensiones lineales. A estas velocidades las llamó, velocidades correspondientes o mejor conocida como el número de Froude.

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{Lg}} \quad (1.6)$$

Donde:

V = velocidad de la embarcación.

L = eslora de la embarcación.

g=gravedad

Con lo cual se obtuvieron las siguientes razones de dimensiones entre un prototipo y un modelo a escala de la misma:

$$\frac{Ls}{Lm} = \lambda \quad (1.7)$$

Donde:

Ls = eslora embarcación real

Lm = eslora modelo a escala

$$\frac{Vs}{Vm} = \sqrt{\lambda} \quad (1.8)$$

Donde:

Vs = Velocidad embarcación real

Vm = Velocidad modelo a escala

$$\frac{RRS}{RRM} = \lambda^3 \quad (1.9)$$

Donde:

RRS= Resistencia residual de la embarcación real

RRM= Resistencia residual del modelo a escala

Para la escala de las condiciones de mar de una embarcación real a un modelo se utiliza el número de Froude, la relación de dispersión y la densidad espectral.

Si se mantiene el número de Froude y la gravedad constante para el caso real y el caso del modelo, entonces la velocidad se escala con la razón de la raíz de la dimensión lineal.

Y en términos de dimensión

$$V = \frac{L}{T} \quad (1.10)$$

Donde:

L = longitud

T = tiempo

Si se cumple la relación de dispersión para aguas profundas se tiene

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (1.11)$$

Donde:

T = periodo

g = gravedad

Por lo tanto, el periodo también se escala a razón de la raíz de la dimensión lineal.

Se tiene que la unidad de energía de la densidad espectral es proporcional al cuadrado de la altura de las olas.

$$E = \frac{1}{2}\rho g\lambda_l^2 \quad (1.12)$$

Donde:

ρ = densidad del agua

g = gravedad

λ_l = dimensión lineal

Con lo que, si se mantiene la densidad del agua y la gravedad como constantes, la energía del espectro se escala a razón de la dimensión lineal al cuadrado.

$$\frac{Es}{Em} = \lambda^2 \quad (1.8)$$

Donde:

Es = Energía del espectro real

Em = Energía del espectro a escala

1.4.7 Formulación para el diseño de un remolcador para Canal de Pruebas Hidrodinámicas

El carro de remolque es una estructura ubicada encima del canal de pruebas que tiene como función el arrastrar los modelos de embarcaciones a lo largo del canal de pruebas, a diferentes velocidades.

Esta estructura está formada por vigas acostadas, las cuales deben ser capaces de soportar los esfuerzos cortantes a producirse por el peso sobre ellas. Según [8], estas deben tener una mínima deflexión de:

$$v = \frac{L}{600} \quad (1.13)$$

Donde:

L = longitud no soportada

Para el presente proyecto se consideraron las siguientes condiciones:

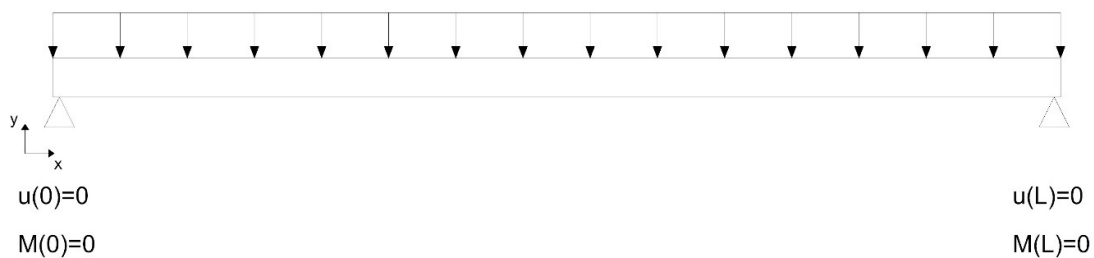


Figura 1.13 Diagrama de cuerpo libre viga.

Fuente: Autoría propia

Utilizando la teoría de vigas se llegó a las siguientes formulaciones, para sección media:

Para el módulo seccional requerido:

$$Z = \frac{wL^2}{8\sigma} \quad (1.14)$$

w = peso distribuido.

L = longitud de la viga

σ = Esfuerzo permisible del material

Para determinar la Inercia necesaria para obtener la deflexión mínima:

$$I = \frac{-5wL^4}{384Ev} \quad (1.15)$$

Donde:

w = peso distribuido.

L = longitud de la viga

E = módulo de elasticidad del material

v = deflexión

El carro de remolque es impulsado por motores, cuya potencia es estimada considerando el torque y velocidad requerida.

$$P = \frac{Tv}{R} \quad (1.16)$$

Donde:

T = Torque requerido

v = velocidad máxima

R = radio de la llanta

El Torque se obtiene con la siguiente formulación:

$$\tau = Fd \quad (1.17)$$

Donde:

F = fuerza total

d= distancia del centro de masa hasta el punto más alejado de las llantas.

La fuerza total es la suma de la fuerza inercial, la fuerza de fricción y la resistencia al avance del modelo. Ver Figura 1.14.

$$F_t = ma + Fr + R \quad (1.18)$$

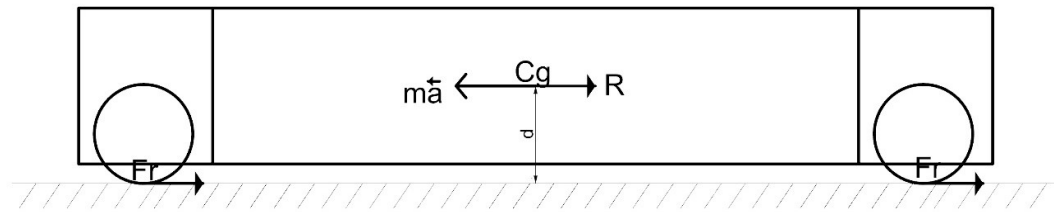


Figura 1.14 Diagrama de cuerpo libre carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Con el fin de realizar el diseño preliminar de un canal de pruebas hidrodinámicas convencional que sea competitivo a nivel internacional, se definieron los requerimientos de diseño necesarios para analizar las embarcaciones operando actualmente en nuestra región. Para establecer las dimensiones principales del canal de pruebas se utilizó la base de datos de los canales de pruebas certificados a nivel mundial por la ITTC, el catastro de naves de la Sub Secretaria de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial, regresiones lineales y demás relaciones sobre velocidades y formas de embarcaciones. Los componentes que forman un canal de pruebas hidrodinámicas son: el carro remolcador, generador de olas y absorbedor de olas, los mismos que se dimensionaron mediante análisis estructural, teoría de olas e investigación previa respectivamente. Posteriormente, las recomendaciones de la ITTC se definió la cadena de procesos para el canal, que permitió realizar la distribución para la obra civil, la cual se dimensionó utilizando referencias de infraestructuras con las mismas características. Finalmente, presupuesto del proyecto se calculó tomando como base obras realizadas con infraestructura similar y los precios unitarios por rubros disponibles en el país.

2.1 Procedimiento para la selección de las dimensiones principales para el canal de pruebas hidrodinámicas

Para determinar las dimensiones principales del canal de pruebas (longitud, ancho y profundidad), se establecieron tres requerimientos de diseño:

- Longitud del modelo
- Tiempo de adquisición de datos
- Aceleración.

La longitud del modelo se estableció a partir de la base de datos de modelos utilizados por canales de pruebas certificados por la ITTC, estableciéndose en 2,5 metros de longitud para ser competitivos con los modelos de canales de prueba existentes en la región. Además, esta longitud otorga facilidades de maniobra.

El tiempo de adquisición de datos para las pruebas a realizar en el canal se fija a partir de las recomendaciones otorgadas por la ITTC, las cuales indican 10 segundos como el tiempo mínimo requerido, de manera que no se realicen correcciones en la incertidumbre. [9]

Las zonas de aceleración y desaceleración, se dimensionan directamente con la aceleración de carro remolcador. Mientras mayor sea la aceleración se necesitará menor longitud del canal de pruebas hidrodinámicas, pero una potencia total de motores mayor. Utilizando la base de datos de los canales de pruebas certificados de la ITTC se estableció una aceleración de $1,5 \text{ m/s}^2$ para reducir la longitud zona de aceleración y desaceleración.

2.1.1 Longitud

Un canal de pruebas hidrodinámicas se divide en cinco zonas longitudinales: absorbedor de olas, aceleración, toma de datos, desaceleración y finalmente una zona para el equipo de generador de olas. La longitud que comprende las zonas del absorbedor de olas y generador de olas dependen directamente de la selección de los equipos, los cuales serán indicados posteriormente.

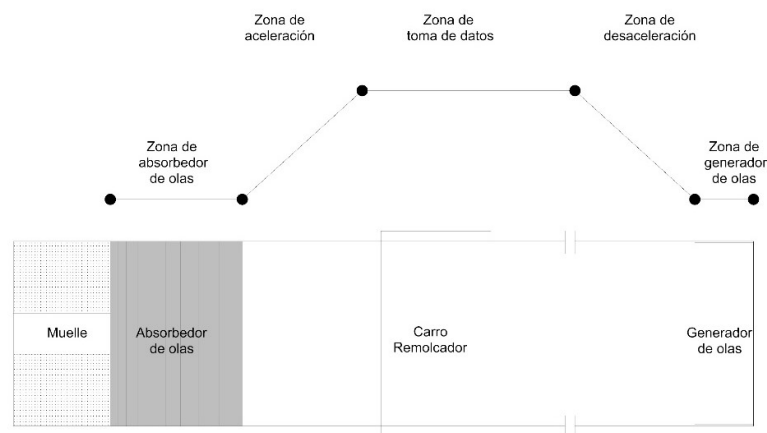


Figura 2.1 Zonas comprendidas en un canal de pruebas

Fuente: Autoría propia

Para establecer la longitud de las zonas de aceleración y desaceleración, se utilizó el requerimiento de diseño de la aceleración de $1,5 \text{ m/s}^2$, que se encuentra dentro del rango de aceleración de estructuras similares que van desde 1 a 2 m/s^2 , y la velocidad máxima

de remolque, y para definir la longitud que corresponde a la zona de adquisición de datos se realizó el siguiente proceso:

1. Se verificaron las dimensiones y los tipos de las embarcaciones existentes en el Ecuador utilizando el catastro de embarcaciones de la Sub Secretaria de Puertos y Transporte Marítimo y Fluvial.
2. Se determinó el rango de número de Froude típico (F_n) y Coeficiente de bloque (C_b) de cada uno de los tipos de embarcaciones registradas usando la Figura 2.2 [10]
3. Se determinó la velocidad máxima de navegación para cada embarcación a partir del parámetro adimensional número de Froude.
4. Se determinó la velocidad máxima experimental para cada tipo de embarcación realizando un análisis dimensional modelo-prototipo.
5. Con los datos generados, se seleccionó la velocidad máxima a la cual debe ser arrastrado el modelo.

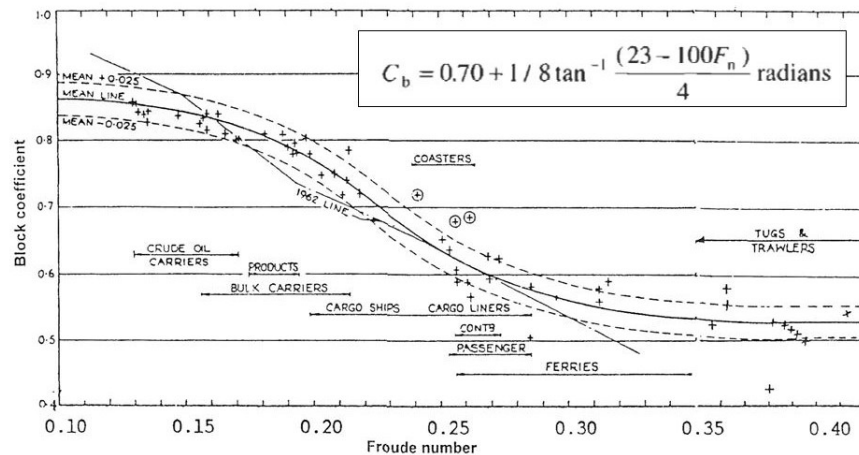


Figura 2.2 Curva de F_n vs C_b para tipos de embarcaciones.
Fuente: Parametric Design, 2003

Tabla 2.1 Resumen de velocidad máxima de modelos según tipo de embarcación

Fuente: Autoría propia

Tipo de Embarcación	V_m [m/s]
Tanqueros	0,84
Graneleros	1,06

Portacontenedores	1,41
Pasajeros	1,41
Pesqueros & Remolcadores	1,98
Patrulleros	3,45

2.1.2 Ancho

Para establecer el ancho del canal se utilizó el factor de bloqueo máximo para evitar correcciones de incertidumbre, éste es la razón entre el área transversal del modelo y el área transversal del tanque según el libro “Ship Resistance and Propulsion”, [11]. La ITTC propone tener un factor de bloqueo menor al 0,5% para evitar correcciones, además se recomienda cumplir una relación de 2 a 1 entre ancho y profundidad del canal. Para determinar el área transversal máxima de los posibles modelos que serán analizados, se obtuvieron las dimensiones de manga y calado del tipo embarcación con mayor coeficiente de bloque, utilizando regresiones paramétricas, [10], y se realizó un análisis dimensional para finalmente obtener los valores de manga y calado del modelo. Así, relacionando estos dos valores se obtuvo el valor de ancho del canal.

$$b = \frac{2(B_m * L_m)}{3 * 0.5\%} \quad (2.1)$$

Donde:

b= Ancho del canal

L_m=Eslora del modelo

B_m=Manga del modelo

Otro elemento para considerar fue la reflexión de las olas divergentes debido al movimiento del modelo, como se muestra en la Figura 2.3. Para ello, se utilizó la formulación propuesta por Vaca [12]:

$$= 4L_m \tan(19.5^\circ) + B_m \quad (2.2)$$

Donde:

b= Ancho del canal

L_m=Eslora del modelo

B_m=Manga del modelo

Obteniendo así un ancho que no produzca interferencia hasta tres esloras a popa del modelo. Habiéndose obtenido un valor que se encuentra por debajo del requerido para cumplir el requerimiento del factor de bloqueo.

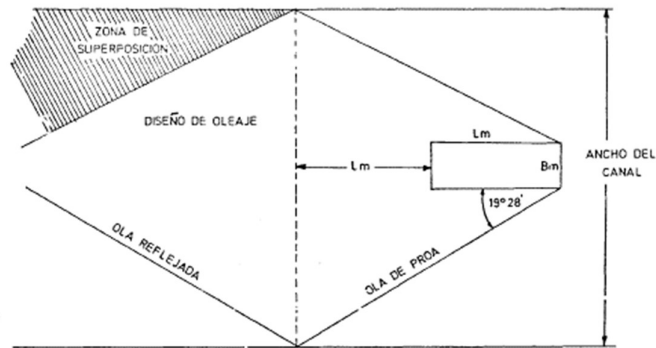


Figura 2.3 Reflexión de olas divergente con las paredes del canal.

Fuente: Vaca, 1973

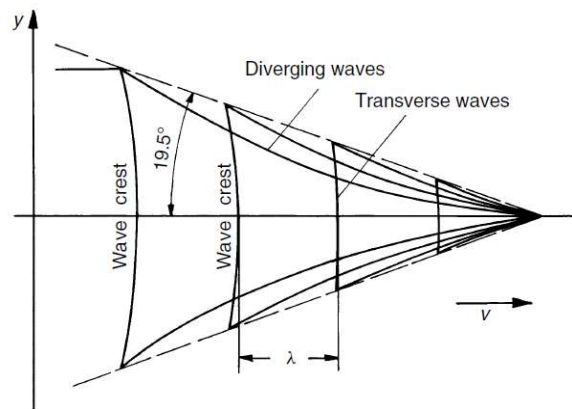


Figura 2.4 Olas divergente, patrón de kelvin.

Fuente: Molland, Turnock, & Hudson, 2011

2.1.3 Profundidad

Se identificaron las siguientes tres restricciones para determinar la profundidad de agua necesaria en el canal hidrodinámico:

1. Restricción del factor de bloqueo especificada para la obtención del ancho.

$$h = \frac{(Bm * Tm)}{3 * 0.5\%} \quad (2.3)$$

Donde:

h= Profundidad del canal

L_m=Eslora del modelo

B_m=Manga del modelo

2. Olas de agua profunda: Bhattacharyya [13], menciona una formulación con la que se determinó el requisito de aguas profundas:

$$\frac{h}{L} > \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

Donde:

h=Profundidad del agua

L=Longitud de ola

3. Verificar que no ocurran efectos de aguas poco profundas para embarcaciones rápidas: Se verificó, utilizando que el número de Froude para profundidad sea menor a 0.8 , para evitar efectos de aguas poco profundas para embarcaciones rápidas, según lo plantea Bertram [14]. Obteniendo un valor mayor a las 2 restricciones previamente identificadas.

$$h = \frac{Fn^2 L}{Fn h^2} \quad (2.5)$$

Donde:

h=Profundidad del agua

Fn=Numero de Froude máximo en experimentos en el canal

Fn_h=Numero de Froude de altura

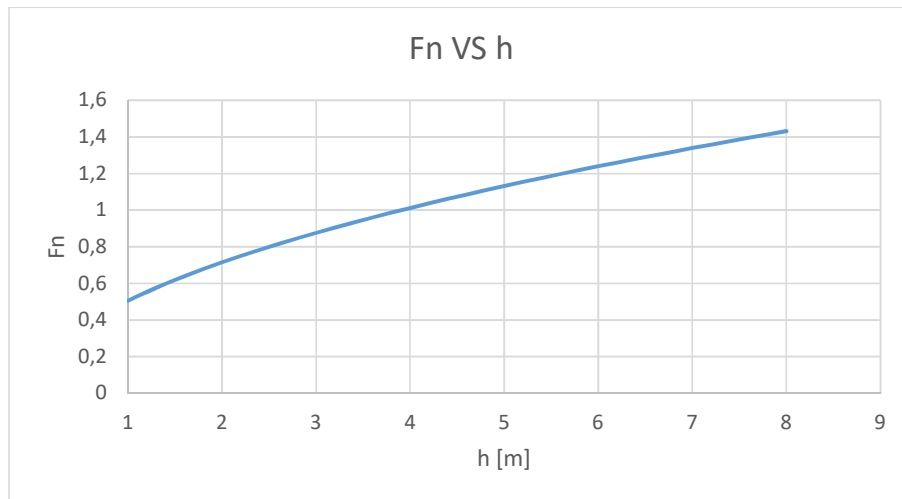


Figura 2.5 Máximo número de Froude según la profundidad del canal.
Fuente: Bertram, 2000

2.2 Método para la selección de los equipos para el canal de Pruebas Hidrodinámicas

El dimensionamiento de los equipos que utilizará el canal de pruebas se realizó mediante el uso de teoría de vigas, cinética, teoría de olas, e investigación previa sobre el absorbedor de olas. Además, se tomó en consideración la interferencia que podían ocasionar estos equipos sobre el canal de pruebas y en consecuencia sobre la experimentación. Los equipos son los siguientes:

2.2.1 Carro Remolcador

El diseño del remolcador se dividió en dos partes: La estructura y la selección de los motores.

La configuración seleccionada de la estructura fue de cuatro vigas longitudinales y dos transversales, para tener dos zonas con piso separadas por un espacio hueco central para poder realizar las instalaciones del modelo. Ver Figura 2.6.

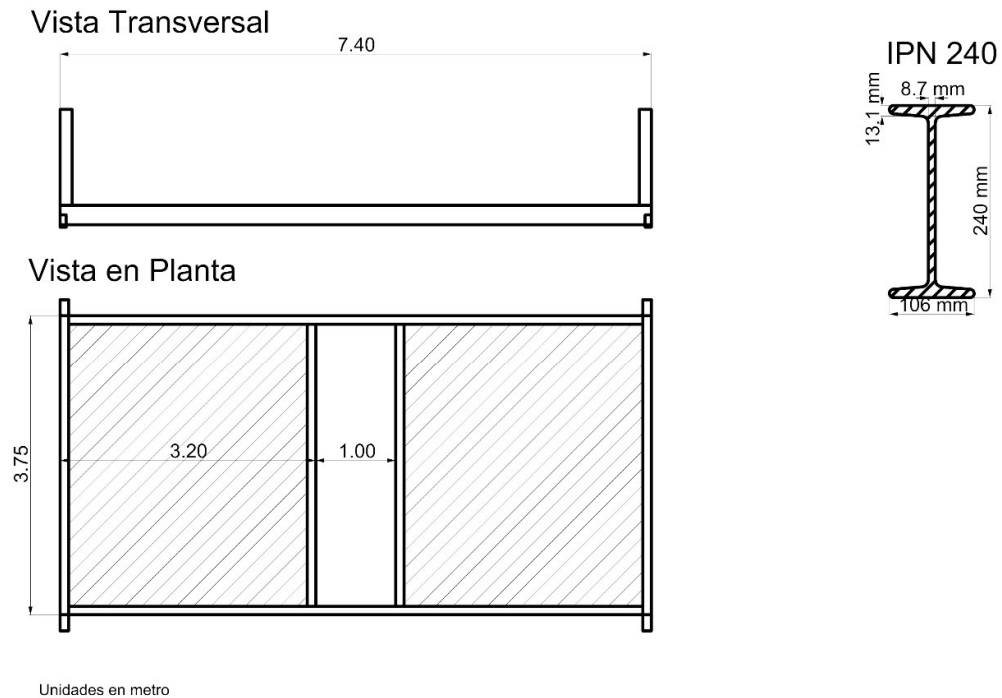


Figura 2.6 Esquema de carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

La longitud del remolcador fue definida dando el espacio suficiente para facilidades de instalación, las cuales son un espacio a los extremos del modelo para que se pueda realizar la instalación con facilidad. Para el ancho, se decidió que el remolcador no descansara en el muro del canal evitando que posibles vibraciones perturben el agua. Por buenas prácticas de manufactura, recomendadas por expertos en el área, se verificó la deflexión de las vigas utilizando la ecuación 1.13, mencionada en el marco teórico. Para la selección de motores, ver Apéndice C, se determinó el torque necesario para acelerar el remolcador de 0 a 5 m/s en menos de 20 metros, debido a la restricción de la aceleración. Para esto se necesitó determinar las fuerzas que influían en el movimiento, las cuales fueron: la inercial, de fricción y resistencia de la embarcación. Este proceso de diseño permitió determinar la potencia necesaria para cada motor.

2.2.2 Generador de olas

El diseño del generador de olas para el canal de pruebas hidrodinámicas necesitó como requisito poder replicar los estados de mar de la región, y a su vez las recomendaciones establecidas por la ITTC. Estas recomendaciones especifican que el generador para olas regulares debe poder generar olas de 0.5 a 2 veces la eslora del modelo, [15].

Para pruebas de comportamiento en el mar, fue necesario verificar que, para la longitud y velocidad del modelo y frecuencias de las olas a producir, no existiera interferencias. Esto se comprobó según los datos de las guías de la ITTC para comportamiento en el mar, [15].

Estado de mar	Rango T [s]		Rango T ($\lambda = 30$) [s]		Rango w ($\lambda = 30$) [1/s]	
0,00	1,20	1,20	0,22	0,22	28,68	28,68
1,00	0,40	2,80	0,07	0,51	86,04	12,29
1,00	0,80	5,00	0,15	0,91	43,02	6,88
1,00	1,00	6,00	0,18	1,10	34,41	5,74
2,00	1,00	7,00	0,18	1,28	34,41	4,92
2,00	1,40	7,60	0,26	1,39	24,58	4,53
3,00	1,50	7,80	0,27	1,42	22,94	4,41
3,00	2,00	8,80	0,37	1,61	17,21	3,91
4,00	2,50	10,00	0,46	1,83	13,77	3,44
4,00	2,80	10,60	0,51	1,94	12,29	3,25
5,00	3,40	12,20	0,62	2,23	10,12	2,82
5,00	3,70	13,50	0,68	2,46	9,30	2,55

w de interferencia 0,265

Tabla 2.2 Tabla de resumen de rango de frecuencias por estado de mar escalado.

Fuente: Autoría propia

Para esto, primero se definió el rango de frecuencias, las cuales se obtuvieron escalando las frecuencias de los estados de mar con el rango de λ , mismo que se consiguió con la base de datos de la Subsecretaría de Puertos y Transportes Marítimos y Fluvial.

De igual manera, utilizando los datos de los estados de mar para longitud y altura significativa de las olas, se obtuvo los rangos de longitud y altura de ola que se deben generar en el canal.

Propiedades de Ola	Longitud Promedio [m]		Altura Promedio [m]	
	Min	Max	Min	Max
Rango	0,24	5,00	0,02	0,42
Rango Redondeado	0,20	5,00	0,00	0,50

Tabla 2.3 Tabla de resumen de rango propiedades de ola a generarse en el canal de pruebas.

Fuente: Autoría propia

Por último, utilizando la fórmula 1.1 se calculó el barrido necesario para el generador de olas. Y con la fórmula 1.2 se obtuvo la potencia necesaria para los motores.

2.2.3 Absorbedor de olas

En el laboratorio “The Cantabria Coastal and Ocean Basin” (CCOB) que es una cuenca oceánica con la capacidad de generar olas en todas las direcciones, con dimensiones de 30, 44 y 4,5 metros de largo, ancho y profundidad respectivamente, realizó un estudio para la selección y optimización de absorbentes de olas de tipo panel de mallas verticales, determinando cual era el más eficiente para su instalación.

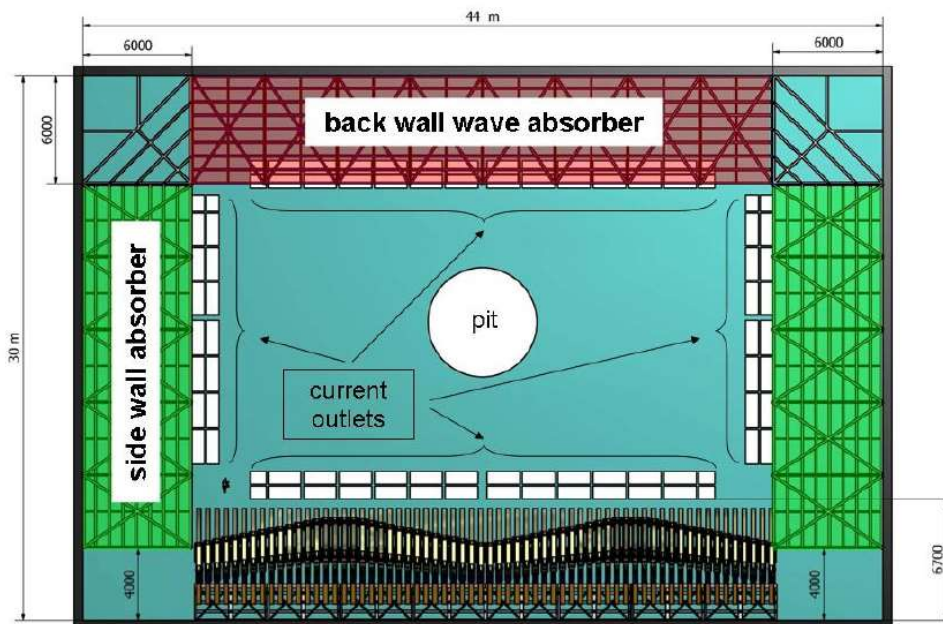


Figura 2.7 Esquema del laboratorio CCOB.

Fuente: Klinghammer, Lomónaco, & Higuera, 2007

Las razones por las cuales es ideal seleccionar este absorbedor para el canal de pruebas diseñado, es debido a que satisface la condición de profundidad, porque la requerida es

de 4 metros y este está diseñado para 4,5 metros; puede disipar olas generadas a 30 metros, mientras que, las de este laboratorio serán generadas a 90 metros y, finalmente, la longitud total del absorbedor deberá encontrarse entre 0,35 y 1 veces la longitud de la ola más grande a generarse en el canal, como menciona Klinghammer [4], que en el canal de pruebas del proyecto, serán de 5 metros y la distancia del absorbedor seleccionado por ellos es de 4,5 que se encuentra dentro del rango requerido para nuestra instalación.

Laboratorio	CCOB	Canal de Pruebas diseñado
Longitud del canal[m]	30	90
Ancho del canal [m]	44	6,3
Profundidad del canal [m]	4,5	4
Distancia de medición [m]	11	30

Tabla 2.4 Tabla comparativa entre CCOB y el canal de pruebas diseñado.

Fuente: Autoría propia

2.2.4 Equipos de medición

Las variables de interés medidas durante una prueba de resistencia típica son: fuerza resistencia al avance del modelo, ángulo de trimado, velocidad de avance y temperatura del agua.

Para medir la resistencia se utiliza un dinamómetro para pruebas hidrodinámicas. Para su selección, se aproximó la resistencia del tipo de embarcación con el mayor coeficiente de bloque, utilizando el método de Holtrop.

Para medir los ángulos de trimado, se puede utilizar los medidores de trimados ubicados en proa y popa del modelo para medir los calados. Otro método es con dinamómetros especializados, capaces de medir el ángulo de trimado. Para el canal de pruebas se seleccionó un dinamómetro de 3 grados de libertad, con sensor de cabeceo y alzada, capaz de realizar esta medición.

Para establecer la velocidad de avance, se seleccionó variadores de velocidad electrónicos. Por recomendación de la ITTC, se seleccionó un tacómetro digital medidor de pulsos, para medir las revoluciones del motor conectados a las ruedas del carro remolcador.

En las pruebas en el canal, es necesario medir la temperatura para poder determinar las propiedades físicas del agua. Se seleccionó una termocupla de agua, con la capacidad de medir y transmitir los datos en tiempo real.

2.3 Proceso para la definición de la distribución física del laboratorio

2.3.1 Cadena de procesos

Se definieron los procesos necesarios para realizar pruebas experimentales en el canal siguiendo los pasos recomendados para pruebas hidrodinámicas por la ITTC [1], siendo los siguientes detallados en la Figura 2.8:

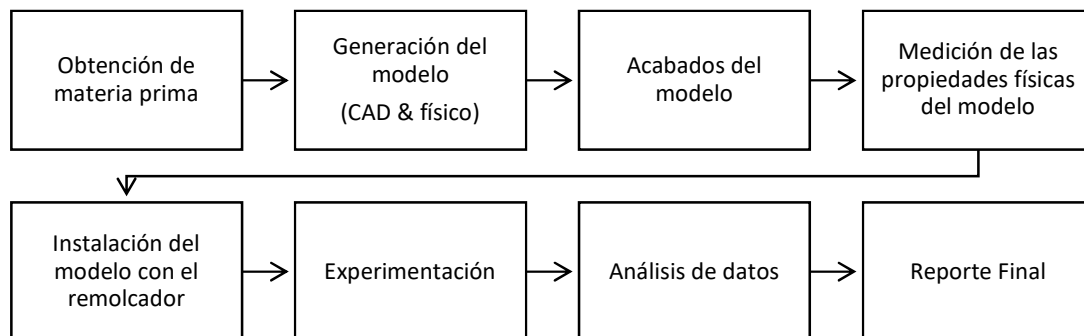


Figura 2.8 Cadena de procesos de un experimento en un canal de pruebas.

Fuente: Autoría propia

A partir de estos se establecieron los espacios físicos del laboratorio:

1. Taller de modelos: el área de este cuenta con espacio físico para un stock de materia prima, área de trabajo manual, equipo CNC y su respectivo equipo de control.
2. Taller de pintura y acabados: esta es una habitación aislada de manera que prevenga la contaminación por la toxicidad de los materiales; además cuenta con espacio suficiente para almacenar material y otorga libertad de circulación para el proceso de pintura.
3. Área de medición: en ella se determinan las propiedades físicas del modelo, como la masa del modelo, su centro de gravedad y sus inercias de masa en los tres ejes.
4. Cuarto de bombas: ubicado en un subsuelo donde se encuentran los filtros y las bombas para dar mantenimiento al agua del canal.
5. Muelle: ubicado al inicio del canal de pruebas, es la zona prevista para la correcta instalación modelo-remolcador.

6. Área de oficinas: en un segundo piso se encontrarán las áreas destinadas para el personal. Un cuarto para el análisis de datos para cuatro estudiantes y/o ayudantes de investigación, uno para un técnico de modelos y el técnico de experimentación, la oficina para un asistente administrativo, la oficina del director del laboratorio con baño privado y vista hacia el canal de pruebas y, por último, una sala de reuniones con vista hacia el canal de pruebas y área de mediciones.

2.3.2 Organigrama institucional preliminar

El equipo de trabajo que se encargará de las operaciones en el laboratorio se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2.5 Organigrama institucional
Fuente: Autoría propia

Puesto	Cantidad	Descripción del puesto
Técnico de modelado	1	Realizar el proceso de creación del modelo desde su diseño como maqueta electrónica, planos de detalle para construcción, selección de materiales, hasta la determinación de propiedades físicas del mismo
Técnico de experimentación	1	Será el encargado de la instalación modelo-remolcador en el muelle y realizará la prueba en su totalidad desde establecer parámetros y condiciones, hasta la obtención de resultados
Director del laboratorio	1	Analizar los datos y elaborar informe con los resultados obtenidos al cliente
Ayudantes de investigación	4	Dar soporte en cualquier de las áreas de trabajo del laboratorio
Asistente Administrativo	1	Encargado de los trámites administrativos del laboratorio.
Conserje	1	Encargado de la limpieza de la instalación física y el mantenimiento del agua del canal.

2.4 Análisis de áreas de la Instalación Física

Se determinaron las áreas necesarias de cada espacio físico dependiendo de las actividades a realizarse en el mismo:

1. Taller de modelos: Se delimito el área, destinando un espacio para la máquina CNC, incluyendo un escritorio para ubicar los controles de la misma. Se estimó un espacio para almacenar materia prima, considerando el volumen del material a utilizar, el cual se estimó con las medidas del mayor modelo a utilizarse en el canal. El taller tiene una puerta doble externa a un costado para el ingreso de la materia prima. Se destinó un espacio con un área estimada para ubicar un modelo y poder hacer trabajos manuales.

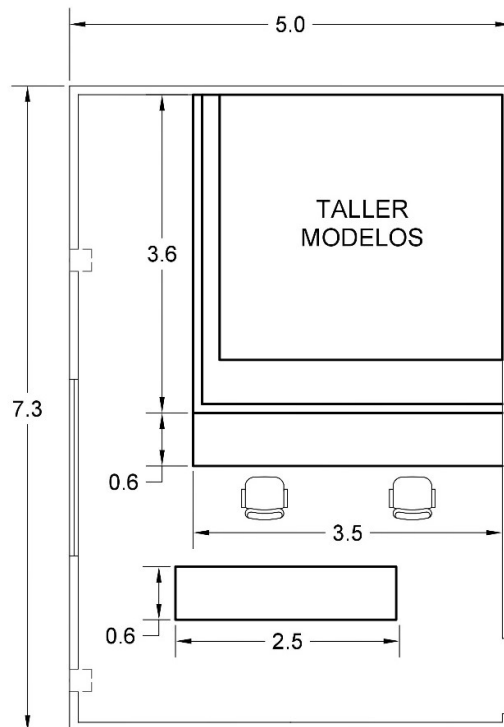


Figura 2.9 Taller de modelos.

Fuente: Autoría propia

2. Taller de pintura: Se ubicó una mesa de trabajo en el centro, estimándola con las dimensiones del modelo. Dejando espacio libre a sus alrededores para poder realizar los trabajos de pintura. En la pared posterior se ubicaron repisas para almacenar el material.

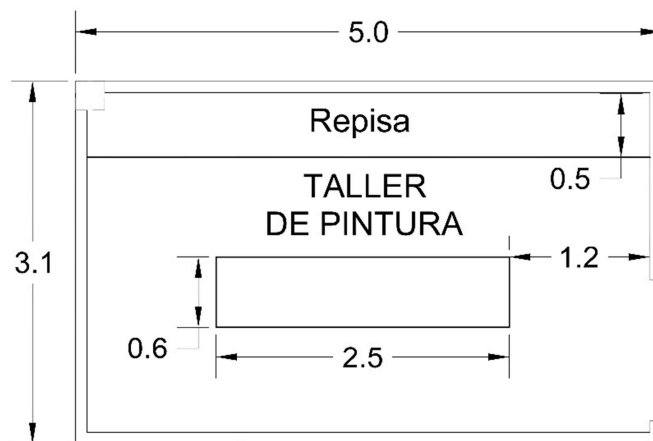


Figura 2.10 Taller de pintura.
Fuente: Autoría propia

3. Área de medición de masas e inercia del modelo: Esta se estimó para cuatro mecanismos de medición, masa e inercias en los 3 ejes, los cuales se obtuvieron con las dimensiones del modelo, entre los cuales se dejó un área suficiente de circulación para facilidades de trabajo.

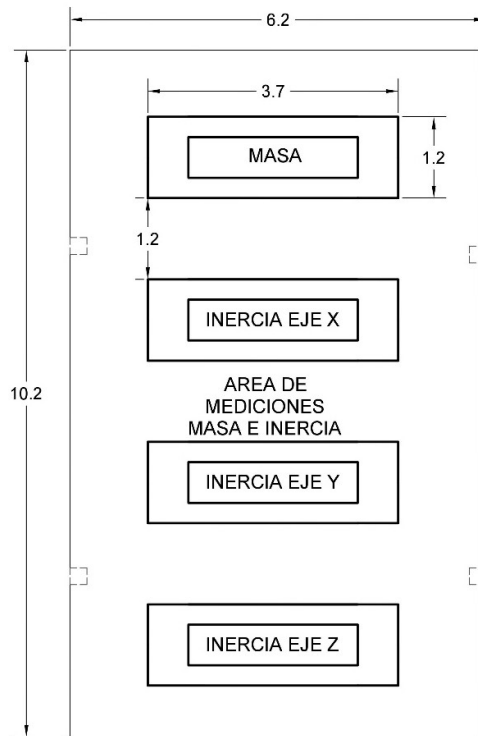


Figura 2.11 Área de mediciones.
Fuente: Autoría propia

4. Muelle: Se dimensionó dejando holgura suficiente para que el modelo no sufra daños durante la instalación.

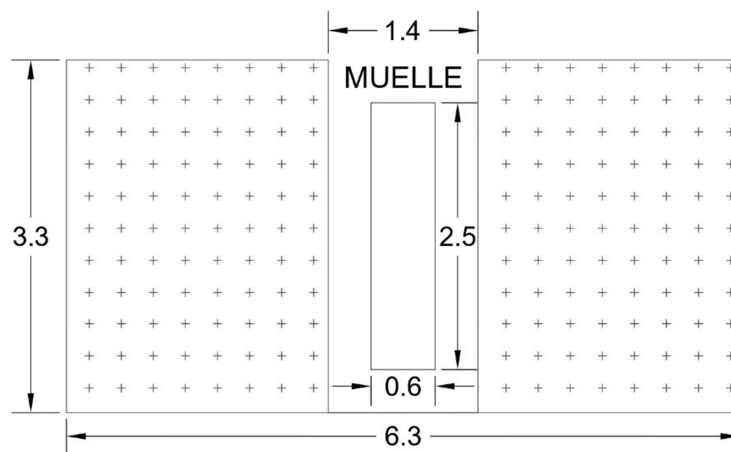


Figura 2.12 Muelle.
Fuente: Autoría propia

5. Cuarto de bombas: Se dimensiono el área, con la capacidad de ubicar 7 filtros de agua con capacidad de 35 GPM cada uno y sus respectivas bombas de 3HP cada una.
6. Área de oficinas: La figura 2.13 muestra el área de oficina de ayudantes, se dimensionó para 4 escritorios de tipo modular, dejando área para circulación alrededor de todo el perímetro de ellos.

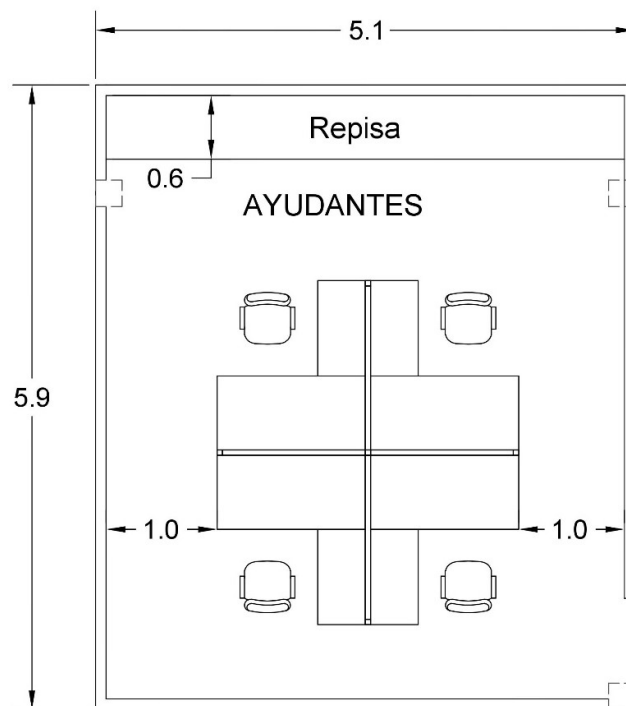


Figura 2.13 Oficina de ayudantes.
Fuente: Autoría propia

La figura 2.14 muestra el area de oficina de los tecnicos . La cual cuenta con 2 escritorios y una zona de repisa.

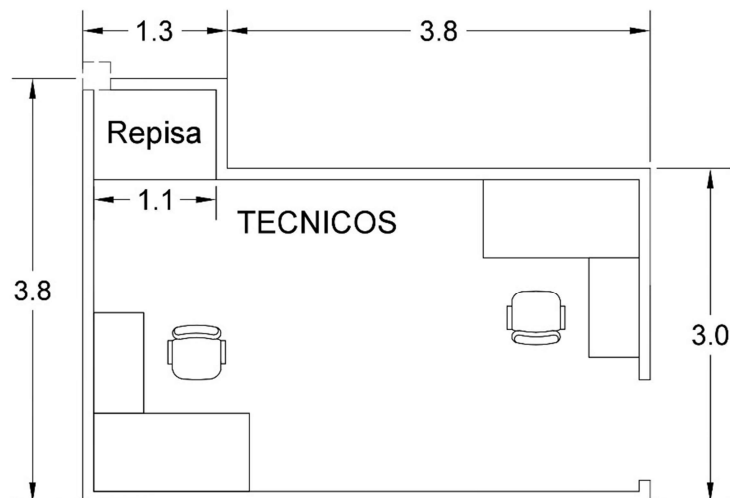


Figura 2.14 Oficina de técnicos.
Fuente: Autoría propia

La figura 2.15 muestra la oficina del director y del asistente administrativo. La oficina del director se dimensionó con capacidad de un escritorio ejecutivo, repisas y medio baño. La oficina del asistente administrativo se dimensionó con capacidad de un escritorio modular.

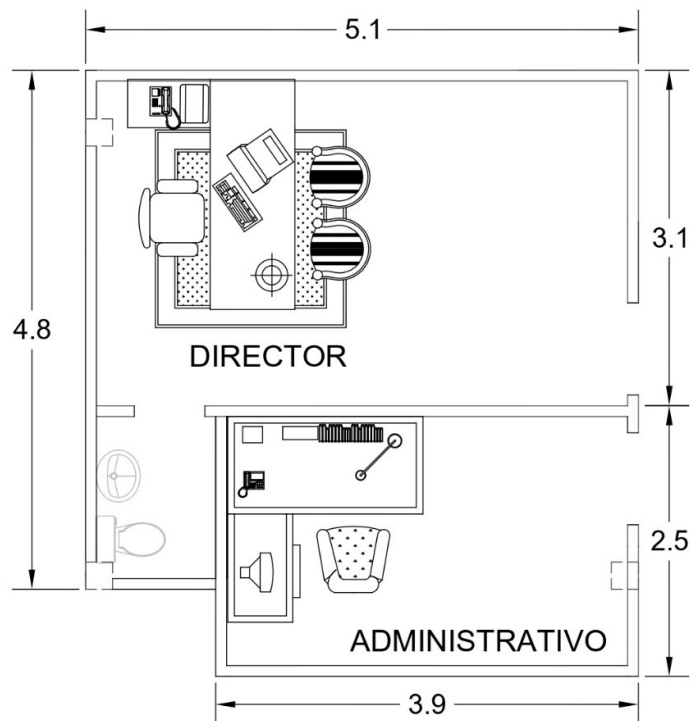


Figura 2.15 Oficina de director y asistente administrativo.
Fuente: Autoría propia

La sala de reuniones, se estimó para ubicar una mesa con capacidad de 10 personas.

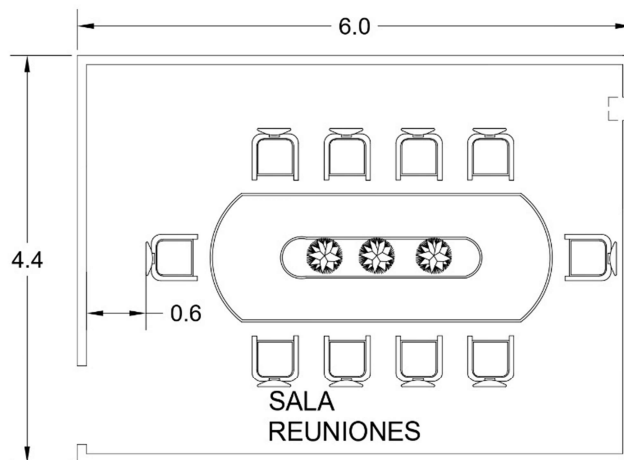


Figura 2.16 Sala de reuniones.
Fuente: Autoría propia

2.5 Análisis de viabilidad financiera

Se realizó un análisis de viabilidad financiera a 15 años de tres escenarios de canales de pruebas hidrodinámicas con diferente longitud, tomando en consideración la inversión inicial, los costos de obra civil y equipos con sus depreciaciones anuales, los costos de operación, fijos y variables, para obtener la tasa interna de retorno (TIR) y de valor actual neto (VAN) para seleccionar la mejor propuesta en función del costo/beneficio.

Se elaboraron dos presupuestos, de obra civil y equipos. Los rubros necesarios para la construcción civil fueron estimados utilizando los datos de Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Manta, además de presupuestos de obras civiles anteriores de infraestructura similar. Todos los rubros vienen dados por costo unitario por metro cuadrado, cúbico o global y, de los planos elaborados anteriormente, se determinó la cantidad, esto dio como resultado el costo total por rubro y de la obra civil. Se seleccionaron los equipos requeridos para el funcionamiento del laboratorio y el costo total de ellos a través de proformas de empresas nacionales. Los costos operacionales del laboratorio estimados se dividen en: costos fijos y variables. Los costos fijos engloban los servicios básicos, nóminas del personal y, los costos variables comprenden el uso y mantenimiento del canal. Además, gracias a datos proporcionados por otros canales de prueba, se estimó un ingreso anual para este canal.

Se elaboraron tres presupuestos considerando diferentes longitudes de canal de pruebas 110, 90 y 70 metros, variando solamente la longitud de toma de datos; para realizar una comparativa que permita seleccionar la mejor opción que genere un balance entre eficiencia y economía. Lo que diferenció estos presupuestos fue el costo de obra civil y el costo variable de operación.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANALISIS

El canal de pruebas hidrodinámicas está diseñado para poder realizar experimentación en las áreas de: estabilidad, resistencia, cálculos estructurales y comportamiento en el mar. El cual será capaz de analizar todas las embarcaciones existentes en el país, en la región y futuros proyectos de hasta 250 m de eslora.

El canal cuenta con un generador de olas capaz de replicar los estados de mar hasta un estado de mar número 5. Al extremo contrario del generador de olas, se ubica un absorbedor de olas de tipo panel, con la finalidad de mitigar la energía de las olas y también posee un carro de remolque, capaz de alcanzar una velocidad de 5 m/s con una aceleración de 1.5 m/s².

3.1 Dimensiones principales para el canal de pruebas hidrodinámicas

Los resultados de las longitudes de las cinco zonas que comprenden el canal de pruebas se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Resumen de longitud de las zonas de un canal de pruebas.

Fuente: Autoría propia

Zona	Longitud [m]
Absorbedor de olas	4,5
Zona de aceleración	20
Zona de toma de datos	40
Zona de desaceleración	24
Generador de olas	1,5

Las velocidades máximas de los modelos para cada tipo de embarcación existentes en la región se observan en la Tabla 3.2, así como la máxima velocidad a alcanzar por el carro de remolque.

Tabla 3.2 Resumen de base de datos de embarcaciones nacionales.

Fuente: Autoría propia

Tipo de Embarcación	Fn Típico	Cb Típico	L _s [m]	λ	V _s [m/s]	V _m [m/s]
Tanqueros	0,15	0,845	228,17	91	8,04	0,84
Graneleros	0,19	0,8	38,1	15	4,15	1,06
Portacontenedores	0,24	0,68	104,75	42	9,13	1,41
Pasajeros	0,27	0,615	91,5	37	8,53	1,41
Pesqueros & Remolcadores	0,38	0,55	115,58	46	13,46	1,98
Patrulleros	0,70	N/A	50	20	15,43	3,45

Para el cálculo del ancho, se utilizó un factor de bloqueo de 0.5%, el cual dio como resultado un ancho de 6.5 m, ver Figura 3.1. Adicionalmente se realizó un cálculo para verificar que no se produzcan interferencias por la reflexión de las olas divergentes, hasta tres esloras a popa del modelo, dando como resultado una medida de ancho de 4m. Para el canal de pruebas se seleccionó la medida de mayor valor.

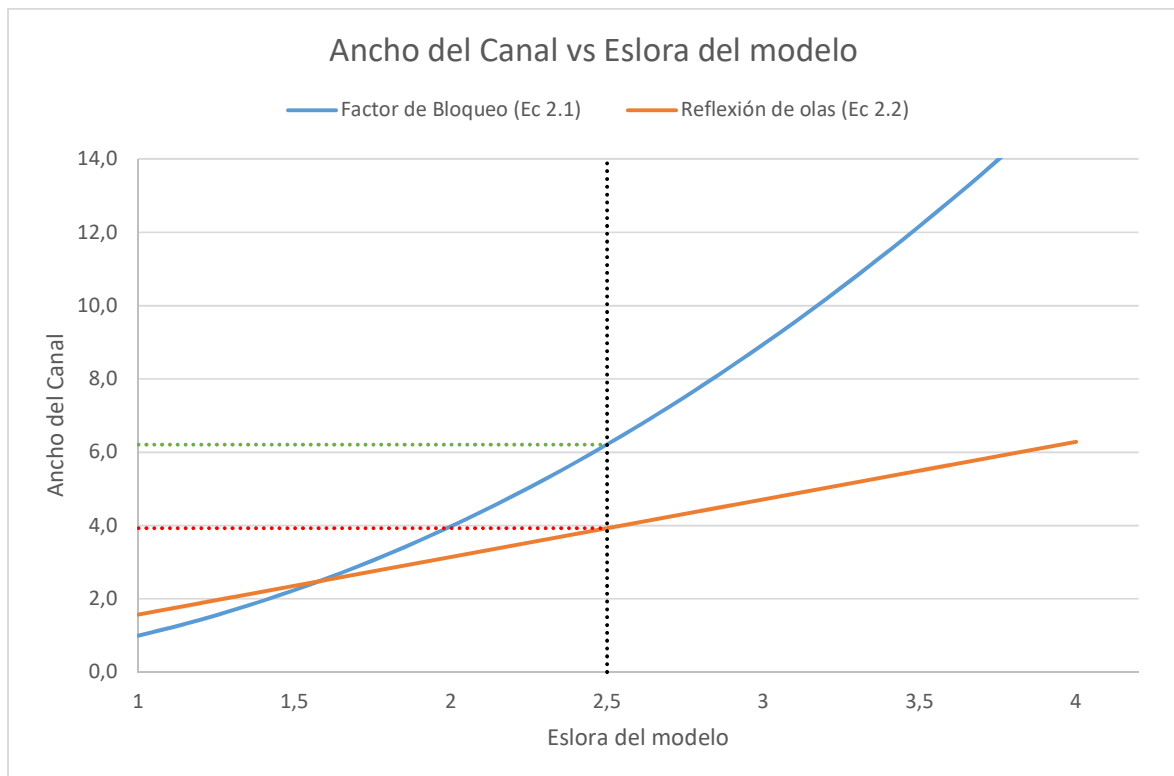


Figura 3.1 Resumen de restricciones para el ancho del canal de pruebas hidrodinámicas.

Fuente: Autoría propia

Para calcular la profundidad, se realizaron tres tipos de cálculos:

1. Se utilizó un factor de bloqueo del 0.5%, dando como resultado un valor de 3,35 m.
2. Se verificó la condición de aguas profundas, con lo cual se obtuvo un valor de 2.5 m.
3. Se verificó que no ocurran efectos de aguas poco profundas para embarcaciones rápidas, obteniendo un valor mínimo de profundidad de 4 m.

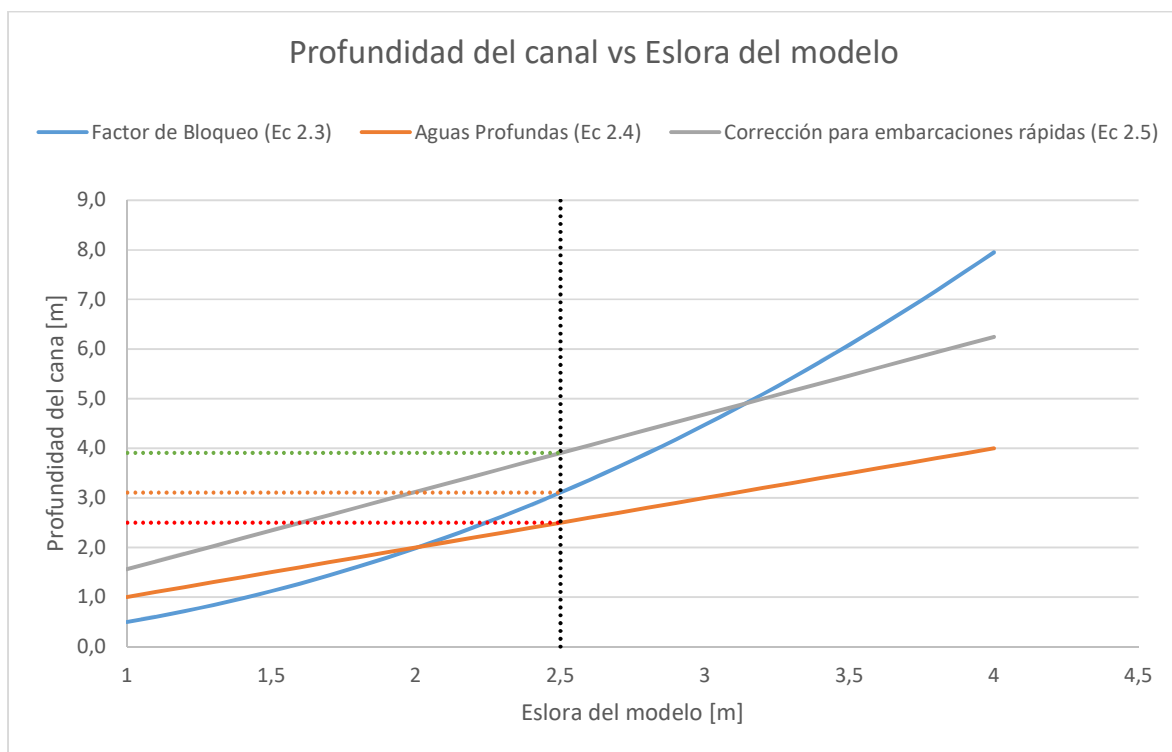


Figura 3.2 Resumen de restricciones para la profundidad del canal de pruebas hidrodinámicas.
Fuente: Autoría propia

Para el canal de pruebas se seleccionó una profundidad de 4.8 m, el cual corresponde a la profundidad del agua requerida más un muro de 80 cm de seguridad, esto porque la altura máxima de la ola que se puede generar es de 50 cm, y 30 cm de holgura para la instalación.

Tabla 3.3 Resumen de resultados de las dimensiones principales del canal de pruebas.
Fuente: Autoría propia

Dimensión	Longitud [m]
Largo	90
Ancho	6,50
Profundidad	4.05

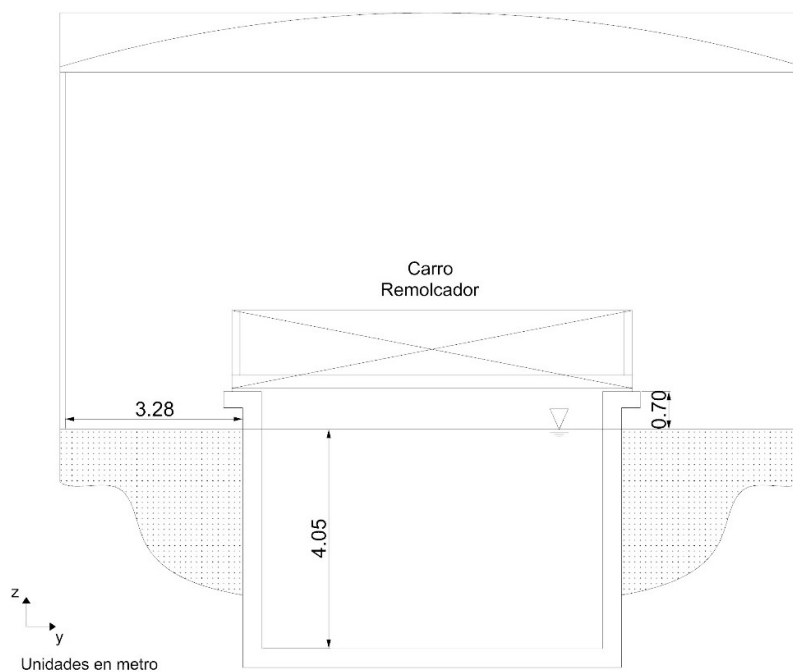


Figura 3.3 Vista transversal de sección típica del Canal de Pruebas Hidrodinámicas.
Fuente: Autoría propia

3.2 Equipos seleccionados para el canal de Pruebas Hidrodinámicas

El carro de remolque tiene una longitud no soportada de 7,4 m, una deflexión menor a 5 mm, con cuatro motores Siemens Simotics IE2 de 18,7 kW y 280 kg cada uno, capacidad para soportar a seis personas y un dinamómetro de 110 kg. El peso total del remolque elaborado con vigas de acero IPN 240 es de 3 toneladas. Este remolque puede alcanzar velocidades de hasta 5 m/s. Los cálculos se especifican en el apéndice B.

El generador de olas está dividido en seis paneles de tipo solapa, con un motor Siemens Simotics IE2 de 1,12 kW cada uno, y un desplazamiento de 35 cm. El rango de olas que puede producir el generador de olas es de 0,2 a 5 m de longitud y de alto hasta 50 cm. Este generador puede recrear olas regulares e irregulares y estados de mar hasta el número cinco.

El absorbedor de olas es de tipo panel y tiene una configuración de nueve paneles de mallas verticales con diferente porosidad. En la Tabla 3.4 se puede observar la posición de cada panel y el porcentaje de porosidad.

Tabla 3.4 Configuración del absorbedor de olas de nueve paneles de mallas verticales.

Fuente: Autoría propia

Distancia [m]	Porosidad [%]
4,5	51,5
3,7	42
3	36,6
2,4	36,6
1,9	23,3
1,4	23,3
0,95	15
0,55	10
0,25	10

El equipo electrónico requerido por el laboratorio es el siguiente:

1. Un dinamómetro R47-01 marca Cussons de 110 kg, con capacidad para medir fuerza de resistencia hasta 300 N y diseñado para modelos de hasta 3 m. Posee un sistema interno que permite el movimiento vertical hasta 400 mm, el trimado hasta 30 grados y restringe el rolido del modelo.
2. Una termocupla RTD Pt-2 que soporta temperaturas de -100 hasta 150 grados Celsius que cuenta con un panel digital que muestra los datos en tiempo real.

3. Medidor de altura de agua ultrasónico SITRANS Probe LU con un máximo de 6 metros de profundidad.
4. Un variador de velocidad MICROMASTER MM440 marca SIEMENS DE 200-240 VAC.
5. Un tacómetro medidor de pulsos AUTONIX MP5W para contar las revoluciones del motor. Capaz de medir un rango de frecuencias de 0.0005 Hz a 50 kHz.

3.3 Distribución de espacios del laboratorio

En la Figura 3.1 se muestra la distribución arquitectónica del canal de pruebas y se indican las áreas con sus respectivas dimensiones:

1. Taller de modelos: 34 m² - (7.30 x 5.0 m)
2. Taller de pintura: 16 m² - (3.10 x 5.0 m)
3. Área de medición: 62 m² - (10.2 x 6.2 m)
4. Muelle: 5 m² - (3.30 x 1.4 m)
5. Área de análisis de datos: 34 m² - (5.90 x 5.1 m)
6. Oficina de Técnicos: 15.3 m² - (3.00 x 5.1 m)
7. Oficina del director: 15.8 m² - (3.10 x 5.1 m)
8. Sala de reuniones: 26 m² - (4.40 x 6.0 m)
9. Cuarto de bombas: 40.7 m² - (5.50 x 7.4 m)

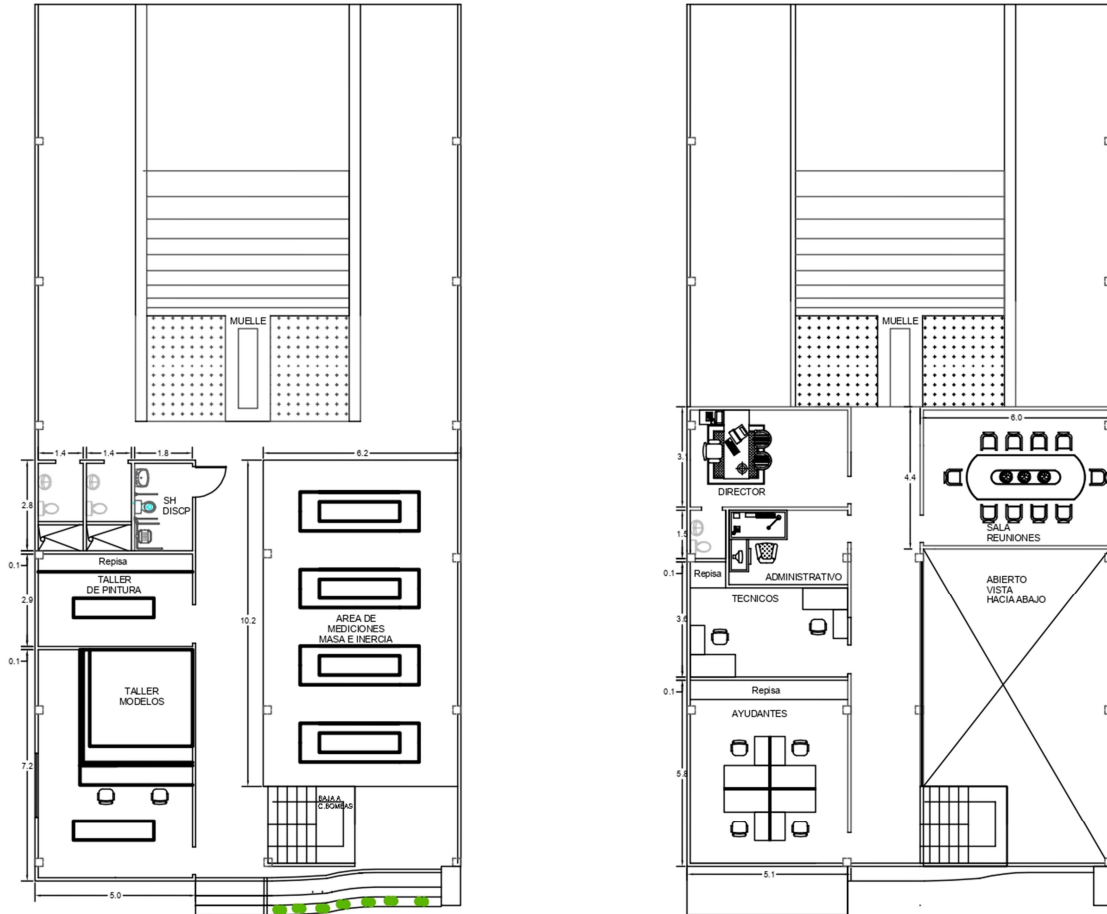


Figura 3.4 Distribución física del laboratorio.
Fuente: Autoría propia

3.4 Presupuesto referencial del diseño preliminar

Se muestra en la Tabla 3.5 los costos de inversión inicial para los canales de prueba de 70, 90 y 110 metros. Además, se presenta también el valor actual neto (VAN) con un interés esperado del 5% y la tasa interna de retorno (TIR), ambas a quince años. Ver Apéndice B.

Tabla 3.5 Resumen de análisis financiero por canal de pruebas.

Fuente: Autoría propia

Descripción	110	90	70
Inversión Inicial	\$ 1.144.542,27	\$ 986.595,66	\$ 836.279,34
VAN (5%)	\$49.387,56	\$282.544,92	\$416.468,26
TIR	6%	9%	11%
Año de Recuperación	11	9	8
Costo de Operación	\$ 98.944,21	\$ 98.836,01	\$ 99.884,18
Ingreso	\$ 252.180,00	\$ 252.180,00	\$ 252.180,00

En la Tabla 3.6 se presentan el número de Froude máximo que se puede alcanzar en cada prueba por cada canal, que no requieran correcciones por incertidumbre.

Tabla 3.6 Resumen de numero de Froude máximo de prueba por canal sin realizar corrección de incertidumbre.

Fuente: Autoría propia

Descripción	110	90	70
V [m/s]	5,00	3,30	1,67
Fn	1,01	0,67	0,34

En la Figura 3.4 se observa la restricción del número de Froude máximo a alcanzar por canal, para no tener que realizar correcciones de incertidumbre. El canal de pruebas de 70 metros no cumple la condición de número de Froude que englobe todas las embarcaciones de desplazamiento, $Fn=0.4$, debido a esto, la opción de construir un canal de pruebas de esta longitud no es adecuada. Sin embargo, el canal de 90 y 110 metros puede realizar pruebas para todas las embarcaciones de la región. El canal de 90 metros satisface las necesidades actuales del país, sin embargo, si se llegasen a requerir analizar embarcaciones con velocidades mayores a las contempladas actualmente se necesitarán realizar más repeticiones de la prueba y correcciones en incertidumbre. El canal de 110 permite alcanzar mayores velocidades y esta dimensionado para embarcaciones actuales y futuras.

Finalmente, se selecciona un canal de pruebas de 90 metros ya que este tiene una tasa interna de retorno más llamativa y una inversión inicial menor que el de 110 metros. De modo que, si llegase a necesitarse pruebas más rápidas y con menor incertidumbre, el canal de pruebas de 90 metros podrá extenderse como una segunda etapa del proyecto.

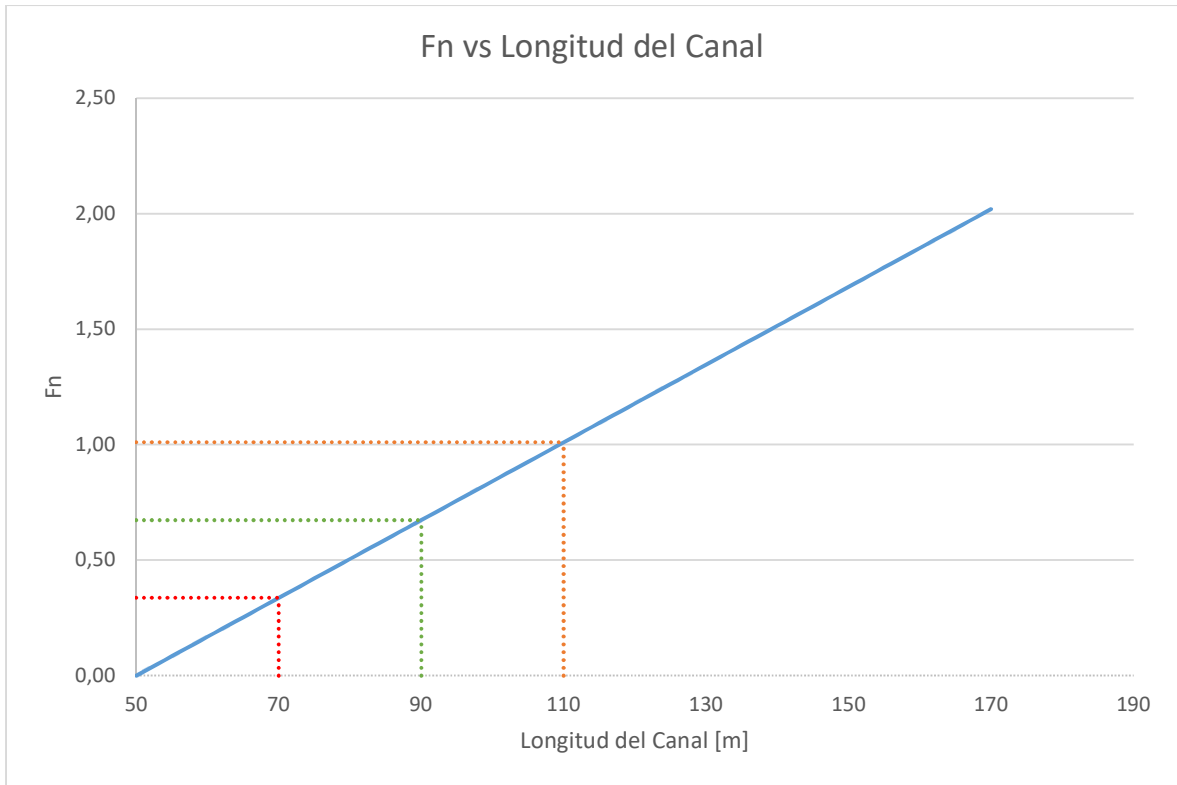


Figura 3.5 Máximo número de Froude permitido por canal de prueba hidrodinámica.
Fuente: Autoría propia

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Existieron en el mundo múltiples catástrofes derivadas de la falta de validación de los diseños de embarcaciones a nivel mundial. Esta propuesta del diseño preliminar de un canal de pruebas hidrodinámicos ayudará en la prevención de siniestros y la reducción de riesgos en el ámbito naval, minimizando pérdidas humanas, económicas y daños ambientales. Además, contribuirán con el fortalecimiento de la ingeniería ecuatoriana transformando al Ecuador, en un país productor de tecnología.

El país se convertirá en el segundo en la costa del pacífico en contar con un laboratorio de este tipo, diseñado para alcanzar mayor precisión de datos experimentales, mayor velocidad de modelo, y recrear todos los estados de mar de la región.

Es necesario considerar que, al ser un laboratorio que desarrolla conocimiento y tecnología, la inversión realizada no presentará ganancias inmediatas. Serán ganancias intangibles que, pasado los diez años de trabajo, se convertirá en un proyecto lucrativo. De la misma manera, actualmente no se cuenta con personal calificado para el ideal funcionamiento de este laboratorio, por lo que la capacitación previa de ingenieros y científicos será indispensable. Se espera también que las políticas navales del país incentiven a los constructores ecuatorianos a validar sus diseños como requisito para su navegación, generando así apoyo entre las entidades gubernamentales y los servicios que oferta la academia.

Se identificaron y seleccionaron correctamente los requisitos necesarios para un canal de pruebas hidrodinámicas que permitirá evaluar estabilidad, resistencia al avance en aguas calmadas y olas, estimación de cargas estructurales, comportamiento en el mar y eficiencia energética.

Con los requisitos se establecieron los parámetros fijos para el diseño del canal de manera que los análisis realizados fuesen confiables y no requieran correcciones por incertidumbre.

Se calculó la capacidad del generador de olas requerido para replicar todos los estados de mar de la región sin generar efectos resonantes con el modelo y disponiendo del catastro de naves del país, se determinaron las velocidades necesarias a alcanzar en el canal para las experimentaciones.

Un canal de pruebas hidrodinámicas de 90 metros de longitud, 6.5 metros de ancho y 4 metros de profundidad se diseñó para la ESPOL siguiendo los lineamientos de la ITTC. El mismo realizará análisis para modelos de hasta 2,5 metros de eslora y un número de Froude máximo de 1,00, que podrá prestar servicios a todas las embarcaciones del país. Sus dimensiones otorgan confiabilidad y precisión en los resultados, además, gracias a la instalación física se evita la presencia incertidumbre por efectos de reducción de datos. El generador de olas diseñado para este canal crea olas regulares e irregulares, siendo capaz de recrear los estados de mar presentes en la región y una longitud y altura de ola máxima de 5 metros y 50 centímetros respectivamente.

El carro remolcador será capaz de arrastrar modelos a velocidades de hasta 5 metros por segundos permitiendo realizar análisis a las embarcaciones existentes en el país, en la región y futuros proyectos de hasta 250 metros de eslora.

Se realizó un análisis entre los beneficios y costo de tres laboratorios de longitudes diferentes, eligiendo el de 90 metros de longitud que satisface los requerimientos para las embarcaciones existentes, pero con la necesidad de correcciones por incertidumbre en posibles futuros proyectos. De esta forma se ha llegado a un equilibrio entre lo técnico y económico, así como a la realidad del país.

Recomendaciones

Al ser este un diseño preliminar se recomienda una segunda vuelta a la espiral de diseño donde se deberá realizarse un análisis estructural detallado que permita determinar de forma precisa los rubros correspondientes a la obra civil; consiguiendo así, un presupuesto más ajustado.

Buscando la automatización de este laboratorio se recomienda también elaborar un sistema de control PLC de forma que todos los equipos de control estén sincronizados en el canal de pruebas.

A fin de recrear olas bidimensionales, es necesario realizar una investigación y determinar, de ser posible, un generador de olas cuyas partes trabajen desfasadas en el tiempo.

Un análisis macroeconómico del proyecto ayudara a visibilizar el impacto social que generaría este proyecto al país.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Towing Tank Conference, «ITTC,» 20 Octubre 2019. [En línea]. Available: <https://ittc.info/>.
- [2] International Towing Tank Conference, «Resistance Test 7.5-02-02-01,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [3] R. Dean y R. Dalrymple, «Engineering Wave Properties,» de *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1991, pp. 93-100.
- [4] C. Klinghammer, P. Lomónaco y P. Higuera, «Desing optimization for a passive mesh screen wave absorber for the CCOB,» de *Coastal Engineering 2012 - 33rd International Conference*, Santander, 2007.
- [5] J. F. Pereira, *Estimacion de Incertidumbres en Canales de Pruebas Navales*, Madrid, Madrid: Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales, 2009.
- [6] International Towing Tank Conference, «General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Test 7.5-02-02-02,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [7] E. V. Lewis, *Principles of Naval Architecture Second Revision Volume II*, Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [8] Bhatia.A, *Overview of Electric Overhead Traveling (EOT) Cranes*, Stony Point, New York: Continuing Education and Development, 2019.
- [9] International Towing Tank Conference, «Example for Uncertainty Analysis in Resistance Test in Towing Tanks 7.5-02-02-02.1,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [10] The Society of Naval Architects and Marine Engineers, «Parametric Design,» de *Ship Desing and Construction Vol I*, Jersy City, The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2003, pp. 11.1-11.46.

- [11] A. Molland, S. Turnock y D. Hudson, «Components of Hull Resistance,» de *Ship Resistance and Propulsion*, New York, Cambridge University Press, 2011, pp. 12-68.
- [12] B. Vaca, *Investigacion y Diseño de un tanque de Pruebas para modelos de Buques para el Departamento de Ingenieria Maritima y Ciencias del Mar*, Guayaquil, Guayas: Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1973.
- [13] R. Bhattacharyya, *Dynamics of Marine Vehicles*, New York: Wiley-Interscience.
- [14] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [15] International Towing Tank Conference, «Seakeeping Test 7.5-02-07-02.1,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [16] DIPAC, *Ficha Tecnica Viga IPN*, Manta, Manabí, 2020.
- [17] «McMasterrcar,» 09 02 2019. [En línea]. Available: <https://www.mcmaster.com/22495t53>.
- [18] M. Lane, A. Shaeboub, F. Gu y A. Ball, *Investigation of reductions in motor efficiency and power factor caused by stator faults when operated from an inverter drive under open loop and sensorless vector modes*, Huddersfield, 2017.
- [19] ASTINAVE EP, «ASTINAVE EP,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.astinave.com.ec/v2/historia/>.
- [20] J. R. Marin, *Notas de clase Estructuras Navales I*, Guayaquil, 2018.
- [21] F. Bonnefoy, *Experimental Ship Hydrodynamics*, Nantes, Paises del Loira: Centrale Nantes, 2018.
- [22] D. D. Molyneux, «Best Practice Guidelines for Tank Testing of Wave Energy,» *The Journal of Ocean Technology*, pp. 39-66, 2009.
- [23] R. Dean y R. Dalrymple, «Wavemaker Theory,» de *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, Singapore, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 1991, pp. 170-178.
- [24] K. Younghwam y P. Dong-Min, «Study on added resistance of a tanker in head waves at different drafts,» *Ocean Engineering Volume 111*, pp. 569-581, 2016.
- [25] T. Kawaguchi, K. Nakano, S. Miyajima y T. Arikawa, «A Theory for Wave Energy Conversion by Bottom-Mounted Oscillating Bodies,» 2019.

- [26] Bulgarian Ship Hydrodynamics Centre, «Technical data sheet,» ITTC, Varna, 1976.
- [27] E. V. Lewis, Principles of Naval Architecture Second Revision Volume III, Jersey City: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.
- [28] F. Beer, R. Johnston y P. Cornwell, Mecánica Vectorial para Ingeniero Dinámica, México D.F.: 2010, 2010.
- [29] International Towing Tank Conference, «Predicting of Power Increase in Irregular Waves form Model Test 7.5-02-07-02.2,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [30] International Towing Tank Conference, «Practical Guide for Uncertainty Analysis in Resistance Measurements in Routine Test 7.5-02-02-03,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [31] International Towing Tank Conference, «Ship Models 7.5-01-01-01,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [32] LabOceano, «Technical data sheet,» ITTC, Rio de Janeiro, 2003.
- [33] SVA, «Technical data sheet,» ITTC, Viena, 2016.
- [34] HSVA, «Technical data sheet,» ITTC, Hamburgo, 2016.
- [35] Flanders Hydraulics Research & Ghent University, «Technical data sheet,» ITTC, Gante, 2016.
- [36] KRYLOV, «Technical data sheet,» ITTC, San Petesburgo, 2016.
- [37] International Towing Tank Conference, «Propulsion 7.5-02-03,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [38] International Towing Tank Conference, «Ice Testing 7.5-02-04,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [39] International Towing Tank Conference, «High Speed Marine Vehicles 7.5-02-05,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [40] International Towing Tank Conference, «Manoeuvrability 7.5-02-06,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [41] International Towing Tank Conference, «Seakeeping 7.5-02-07-02,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.

- [42] International Towing Tank Conference, «Ocean Engineering 7.5-02-07-03,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [43] International Towing Tank Conference, «Stability 7.5-02-07-04,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.
- [44] International Towing Tank Conference, «CDF 7.5-03,» de *ITTC Recommended Procedure and Guidelines*, Wuxi, 2017.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Base de datos de Canales de Prueba Hidrodinámicos Certificados por la ITTC

Se presentan el resumen de los datos procesados de los canales de pruebas hidrodinámicos certificados por la ITTC.

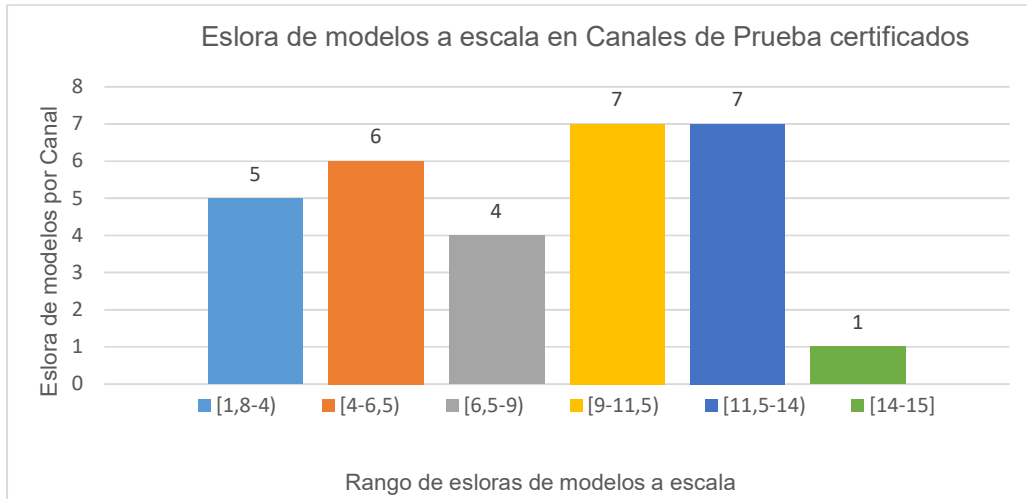


Figura A.1 Histograma de eslora de modelos en canales de prueba certificados.
Fuente: Autoría propia

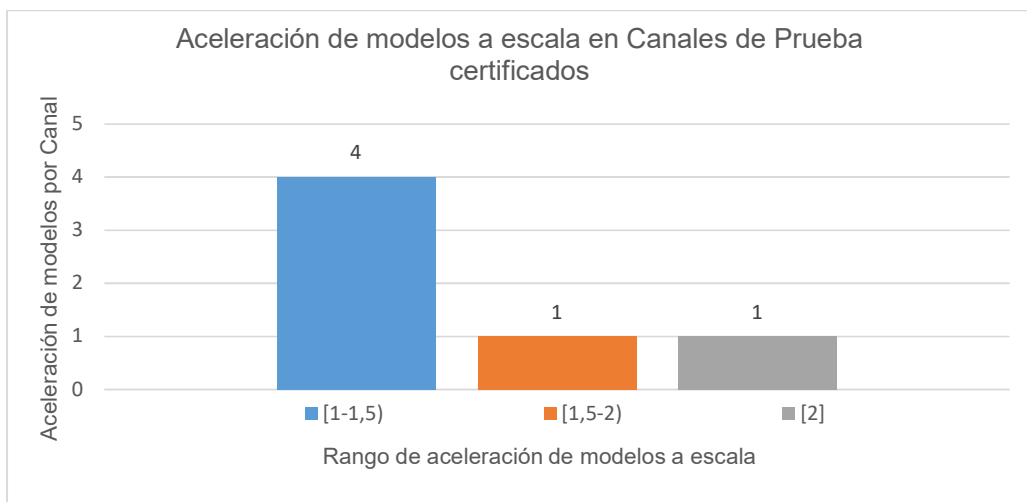


Figura A.2 Histograma de aceleración de modelos en canales de prueba certificados.
Fuente: Autoría propia

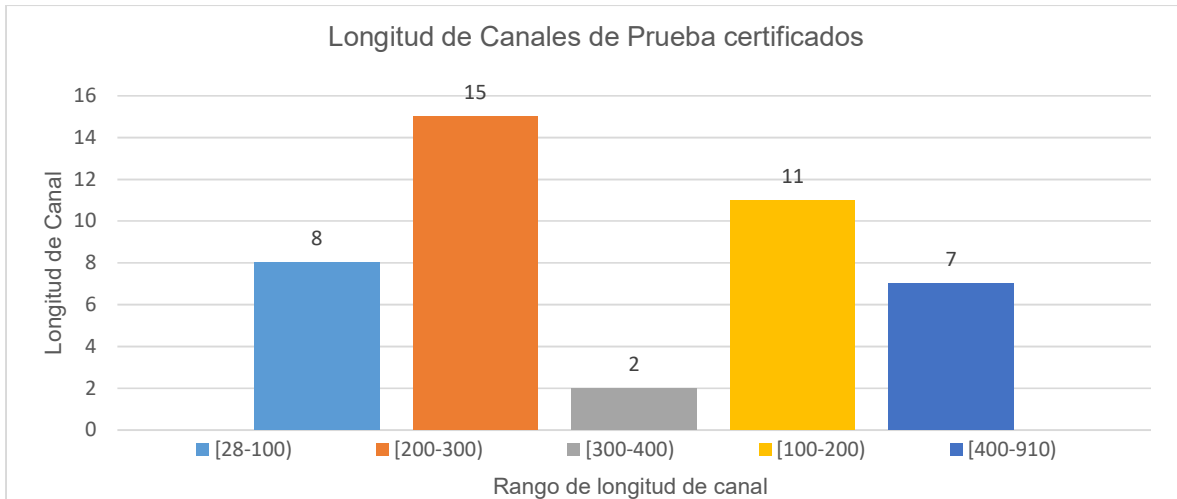


Figura A.3 Histograma de longitud de canales de prueba certificados.
Fuente: Autoría propia

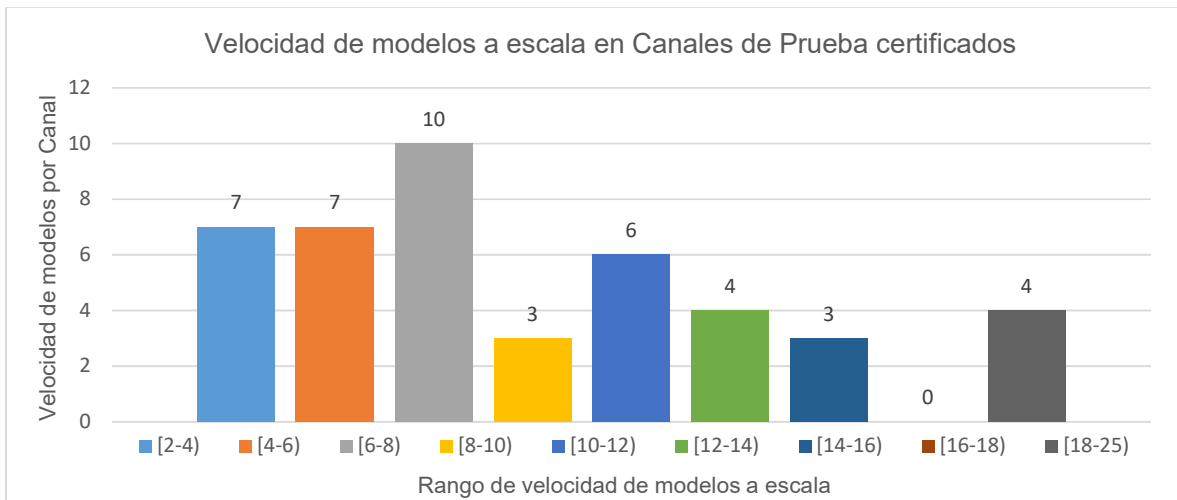


Figura A.4 Histograma de velocidad de modelos en canales de prueba certificados.
Fuente: Autoría propia

Tabla A.1 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (América).

Fuente: Autoría propia

Instalaciones	Lugar	L _c [m]	B _c [m]	H _c [m]	Olas	V _m [m/s]	L _m [m]	P [kW]	Año de última remodelación	a [m/s ²]	Absorbedor [m]
Instituto de Investigaciones Sao Paulo	Brasil	220	6,6	3,5	N/A	3,5	3,5	14(4)	1956	N/A	N/A
Universidad de Michigan	EEUU	109,7	6,7	3,05	N/A	6,1	N/A	5(4)	2015	N/A	N/A
Universidad Austral de Chile	Chile	45	3	2	N/A	5	2,5	0,75(4)	2016	N/A	N/A
Centro de guerra área naval	EEUU	904	6,4	4,9	N/A	25	6,1	123(6)	1947	N/A	N/A
Centro de guerra área naval	EEUU	575	15,5	6,7	N/A	10,3	12,2	75(2)	1947	N/A	N/A
Consejo Nacional de Investigación de Canadá	Canadá	200	12	7	N/A	10	12	94(8)	1985	N/A	N/A

Tabla A.2 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Europa & Oceanía).

Fuente: Autoría propia

Instalaciones	Lugar	L _c [m]	B _c [m]	H _c [m]	Olas	V _m [m/s]	L _m [m]	P [kW]	Año de última remodelación	a [m/s ²]	Absorbedor [m]
Australian Maritime College	Australia	104,5	3,5	1,5	Single Flap	4,6	2,5	15,6	1982	N/A	4
Bulgarian Ship Hydrodynamics	Bulgaria	200	16	6,5	N/A	6	6,5	N/A	1976	1	8,4
CEHIPAR	España	320	12,5	6,5	N/A	10	15	70	N/A	1,5	N/A
ETSIN	España	86,46	3,8	2,24	Single Flap	3,5	N/A	N/A	1970	N/A	8,5
FORCE	Dinamarca	240	12	5,5	Double Flap	14	N/A	74	1959	N/A	N/A
GDANSK Univertsity	Poland	40	4	3	Piston	2,5	N/A	17,84	N/A	1	N/A
HSVA	Alemania	300	18	5,6	Double Flap	10	12	N/A	1965	N/A	N/A
HSVA	Alemania	80	5	3	N/A	3,6	6	N/A	1952	N/A	N/A
MARIN	Holanda	252	10,5	5,5	N/A	9	12	80	1932	N/A	N/A

Tabla A.3 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Europa & Oceanía).

Fuente: Autoría propia

Instalaciones	Lugar	L _c [m]	B _c [m]	H _c [m]	Olas	V _m [m/s]	L _m [m]	P [kW]	Año de última remodelación	a [m/s ²]	Absorbedor [m]
VTT	Finlandia	130	11	5,5	N/A	6	N/A	N/A	1970	N/A	N/A
University of Southampton	Inglaterra	138	6	3,5	N/A	12	N/A	N/A	2016	N/A	N/A
SSPA	Sweden	260	10	5	N/A	11	10	N/A	1940	N/A	N/A
Technische Universität Berlin	Alemania	250	8	4,8	N/A	12,5	8	N/A	1993	N/A	N/A
SINTEF Ocean	Noruega	260	10,5	5,6	N/A	10	N/A	N/A	1979	N/A	N/A
Ship Design and Research Centre	Polonia	270	12	6	N/A	12	N/A	N/A	1975	N/A	N/A
Schiffbautechnische Versuchsanstalt in Wien	Austria	180	10	5	N/A	7	12	35	2016	N/A	N/A
Schiffbau Versuchsanstalt Potsdam GmbH	Alemania	280	9	4,5	N/A	7,5	11,5	N/A	2013	N/A	N/A
QinetiQ	Inglaterra	270	12,2	5,4	N/A	12,25	N/A	N/A	1930	1,1	N/A
National Technical University of Athens	Grecia	100	4,6	3	Single Flap	5,5	6	N/A	1978	N/A	N/A

Tabla A.4 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Asia).

Fuente: Autoría propia

Instalaciones	Lugar	L _c [m]	B _c [m]	H _c [m]	Olas	V _m [m/s]	L _m [m]	P [kW]	Año de última remodelación	a [m/s ²]	Absorbedor [m]
Samsung Ship Model Basin	Korea	400	14	7	Plunge	18	11	180	1996	2	N/A
Samsung Ship Model Basin	Korea	400	14	7	Plunge	5	11	43	1996	1	N/A
Sharif University of Technology Marine Engineering Research	Iran	28	2,5	1,2	Single Flap	2	1,8	N/A	2009	N/A	N/A
National Iranian Marine Laboratory	Iran	400	6	4	N/A	19	7,6	N/A	2013	N/A	N/A

Tabla A.4 Canales de Prueba Certificados por la ITTC (Asia).

Fuente: Autoría propia

Instalaciones	Lugar	L _c [m]	B _c [m]	H _c [m]	Olas	V _m [m/s]	L _m [m]	P [kW]	Año de última remodelación	a [m/s ²]	Absorbedor [m]
Seoul University	Korea	110	8	3,5	Single Flap	5	5	N/A	N/A	N/A	N/A
Hyundai	Korea	N/A	14	6	Single Flap	7	10	55	N/A	N/A	8,5
KRISO	Korea	221	16	7	Single Flap	6	N/A	65	2014	N/A	8,9
Zhejiang Ocean University	China	130	6	4,1	N/A	6,5	N/A	N/A	2006	N/A	N/A
China Ship Scientific Research Centre (CSSRC)	China	474	14	7	Single Flap	20	10	75	1999	N/A	N/A
China Ship Scientific Research Centre (CSSRC)	China	N/A	N/A	N/A	Single Flap	15	10	40	N/A	N/A	N/A
Marine Design and Research Institute of China (MARIC)	China	280	10	5	N/A	9	N/A	N/A	2009	N/A	N/A
Shanghai Ship and Shipping Research Institute	China	192	10,8	4,2	N/A	9	N/A	N/A	1980	N/A	N/A
Kyushu University	Japón	65	5	7	N/A	N/A	N/A	N/A	1994	N/A	N/A
Mitsubishi Heavy Industries	Japón	285	12,5	N/A	N/A	5	10	75	1943	N/A	N/A
Osaka University	Japón	100	7,8	4,35	N/A	3,5	5	15	1970	N/A	6
Osaka Prefecture University	Japón	70	3	1,6	Single Flap	2,5	N/A	7,5	N/A	N/A	N/A
Japan Marine United Corporation	Japón	240	18	8	Single Flap	7	12	N/A	1977	N/A	N/A
National Maritime Research Institute	Japón	150	7,5	3,5	Plunge	6	6	120	1972	N/A	6,5
National Maritime Research Institute	Japón	400	18	8	Plunge	15	8	840	1966	N/A	9,5
University of Tokyo	Japón	85	3,5	2,4	Single Flap	4	3	12	1937	N/A	N/A

APÉNDICE B

Memoria de cálculo del carro remolcador

Se presenta el esquema del carro remolcador:

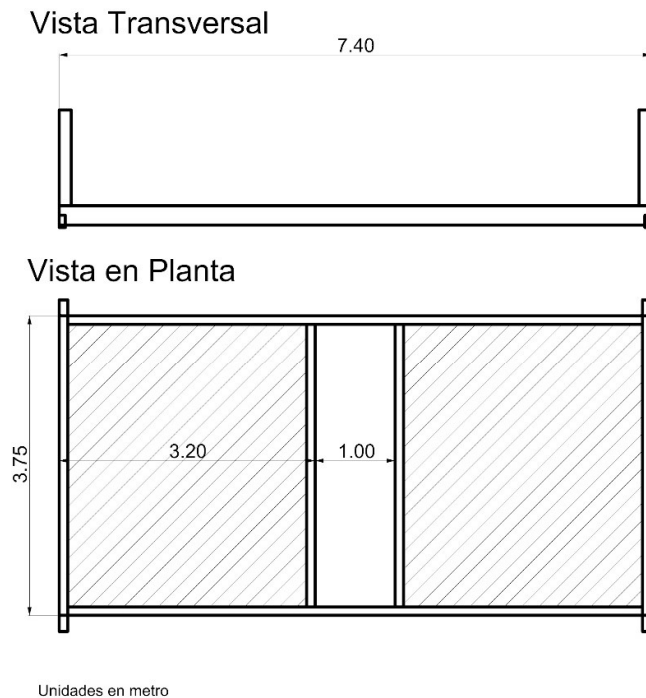


Figura B.1 Esquema de carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

La longitud se define sumando la longitud del modelo, 2,5 m, a 60 cm en cada extremo, con el fin de dar espacio para circulación y espacio para realizar la instalación del modelo. El ancho se obtiene sumando el ancho del canal ,6,3 m, con el espesor del muro de 35 cm de cada lado y un volado donde se ubica el riel de 20 cm de cada lado.

Se utiliza la ecuación 1.13 para definir la deflexión máxima en las vigas:

$$v = \frac{L}{800}$$

$$v = \frac{7.4m}{800}$$

$$v = \frac{7.4 \text{ m}}{800} * \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}}$$

$$v_{max} = 9.25 \text{ mm}$$

Las vigas del carro se encuentran soldadas entre sí, y simplemente soportadas en los extremos, en las ruedas. Para el cálculo se asumió la viga como simplemente soportada, ya que esta es la condición donde se presenta mayor deflexión, y se buscó hacer el cálculo con un margen de seguridad, para luego ser comprobado mediante análisis de elementos finitos.

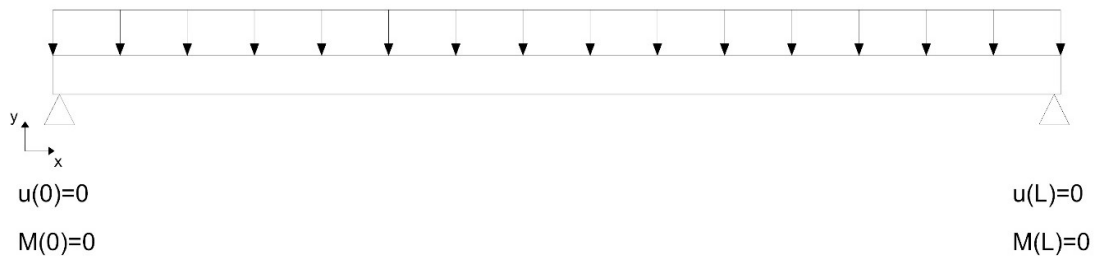


Figura B.3 Diagrama de cuerpo libre viga.

Fuente: Autoría propia

Utilizando teoría de vigas se define la formulación para la deflexión:

$$p(x) = -w$$

Integrando:

$$V(x) = -wx + A$$

$$M(x) = -\frac{wx^2}{2} + Ax + B$$

Reemplazando las condiciones de frontera se tiene:

$$A = \frac{wL}{2}$$

$$B = 0$$

Llegando a la fórmula del Momento flector:

$$M(x) = -\frac{wx^2}{2} + \frac{wLx}{2}$$

Integrando:

$$EIv(x)_x = -\frac{wx^3}{6} + \frac{wLx^2}{4} + C$$

$$EIv(x) = -\frac{wx^4}{24} + \frac{wLx^3}{12} + Cx + D$$

Reemplazando las condiciones de frontera se tiene:

$$C = -\frac{wL^3}{24}$$

$$D = 0$$

Llegando a la fórmula de la deflexión:

$$EIv(x) = -\frac{wx^4}{24} + \frac{wLx^3}{12} - \frac{wL^3}{24}$$

Despejando la Inercia y reemplazando para L/2, ya que es la posición donde se experimentará la mayor deflexión:

$$I = -\frac{5w^4}{384Ev_{max}}$$

$$I = -\frac{5w^4}{384Ev_{max}}$$

Se utilizaron datos de vigas en el mercado para estimar el módulo de Inercia necesario:

PROPIEDADES MECÁNICAS							
RESISTENCIA MECÁNICA				PUNTO FLUENCIA			
Kg/mm ²		Mpa		Kg/mm ²		Mpa	
37 - 52		370 - 520		24		235	

DENOMINACIÓN	DIMENSIONES						PROPIEDADES					
	h mm	b mm	t mm	e mm	R mm	R1 mm	ÁREA SECCIÓN cm ²	PESOS kg/mt	INERCIA (cm ⁴)		MÓDULO DE RESISTENCIA (cm ³)	
									Eje x-x	Eje y-y	Eje x-x	Eje y-y
IPN 80	80	42	3.90	5.90	30.90	2.30	7.58	5.95	77	6.29	19.50	3.00
IPN 100	100	50	4.50	6.80	4.50	2.70	10.60	8.32	171	12.20	34.20	4.88
IPN 120	120	64	4.40	6.30	4.50	3.00	13.20	10.40	318	27.70	53.00	8.65
IPN 140	140	66	5.70	8.60	5.70	3.40	18.30	14.40	573	35.20	81.90	10.70
IPN 160	160	74	6.30	9.50	6.30	3.80	22.80	17.90	935	54.70	117.00	14.80
IPN 200	200	90	7.50	11.30	7.50	4.50	33.50	26.30	2140	117.00	214.00	26.00
IPN 240	240	106	8.70	13.10	8.70	5.20	46.10	36.20	4250	221.00	354.00	41.70
IPN 300	300	125	10.80	16.20	10.80	6.50	69.10	54.20	9800	451.00	653.00	72.20
IPN 400	400	155	14.40	21.60	14.40	8.60	118.00	92.60	29210	1160.00	1460.00	149.00
IPN 450	450	170	16.20	24.30	16.20	9.70	147.00	115.00	45850	1730.00	2040.00	203.00

Figura B.1 Ficha técnica vigas IPN.

Fuente: [16]

El peso que soporta la viga se lo estimó, obteniendo el peso de la viga más larga de 7,4 m, ya que mientras mayor es la longitud no soportada mayor es la deflexión, agregando el peso de 6 personas, ya que el carro remolcador está diseñado para transportar hasta esta cantidad.

La masa de la viga se obtiene multiplicado la longitud total por el peso por metro lineal:

$$w[kg] = 7.4[m] * w\left[\frac{kg}{m}\right]$$

La masa de las personas:

$$w_{personas} = 75[kg] * 6$$

Se realizaron los cálculos para 2 tipos de viga, IPN 200 e IPN 240:

$$w_{IPN200} = (7.4 * 26.3 + 75 * 6)/7.4$$

$$w_{IPN200} \approx 88 \text{ kg/m}$$

$$w_{IPN240} = (7.4 * 36.2 + 75 * 6)/7.4$$

$$w_{IPN240} \approx 100 \text{ kg/m}$$

Se calcula la Inercia necesaria para ambos casos y se compara con la inercia dada en la ficha técnica:

$$I_{IPN200} \approx 1800 \text{ cm}^4 < I_{IPN200 \text{ ficha}} = 2140 \text{ cm}^4$$

$$I_{IPN240} \approx 2100 \text{ cm}^4 < I_{IPN240 \text{ ficha}} = 4250 \text{ cm}^4$$

Con lo cual se concluye que ambos casos cumplen con la restricción de la deflexión.

Para poder decidir cuál de las dos opciones es la más factible se realiza un análisis de elementos finitos:

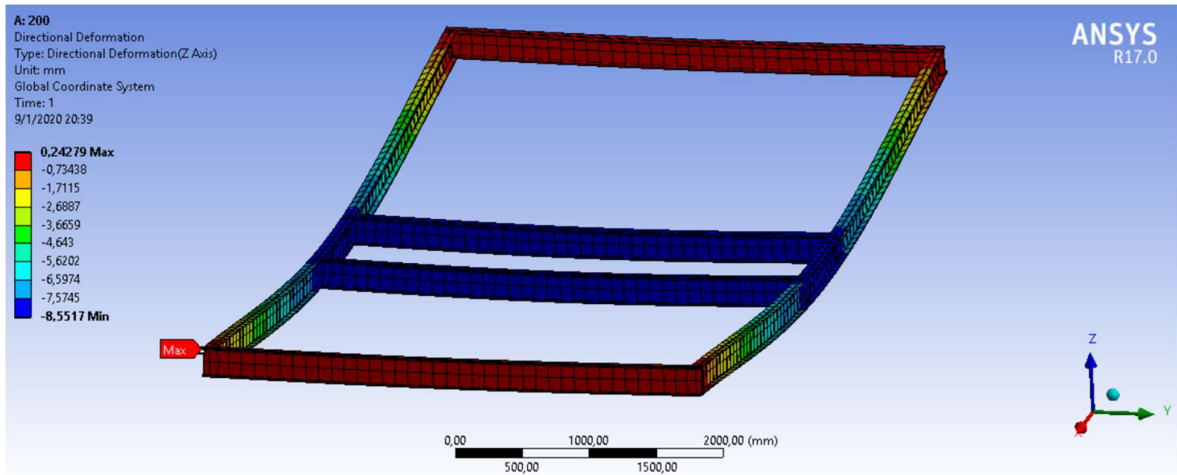


Figura B.4 Deflexión en viga IPN200 (Vista Isométrica).
 Fuente: Autoría propia

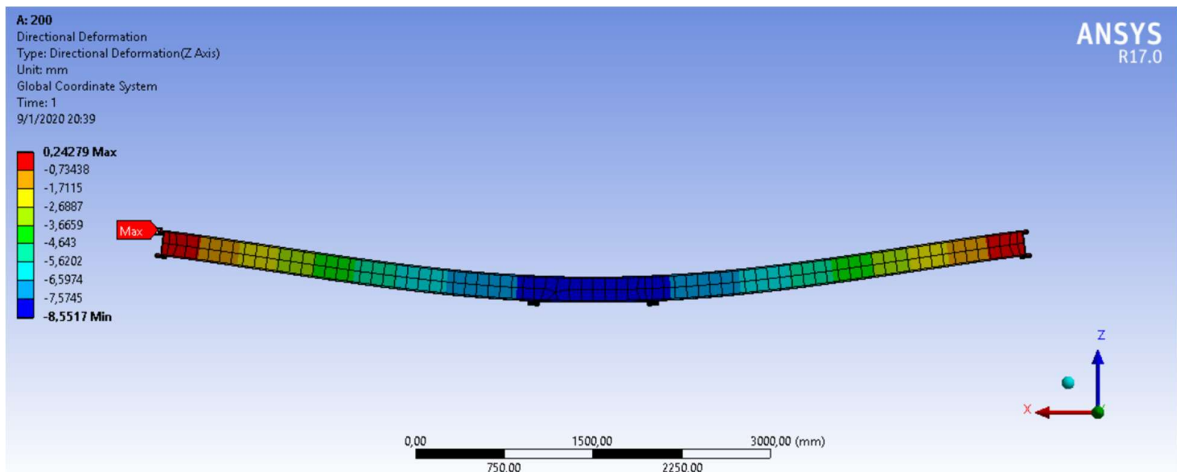


Figura B.5 Deflexión en viga IPN200 (Vista Transversal).
 Fuente: Autoría propia

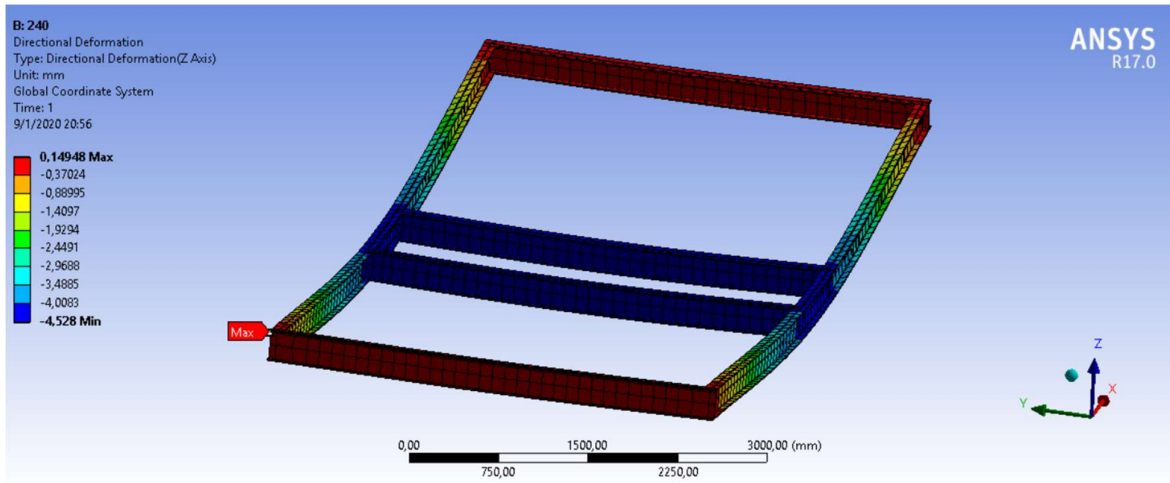


Figura B.6 Deflexión en viga IPN240 (Vista Isométrica).
 Fuente: Autoría propia

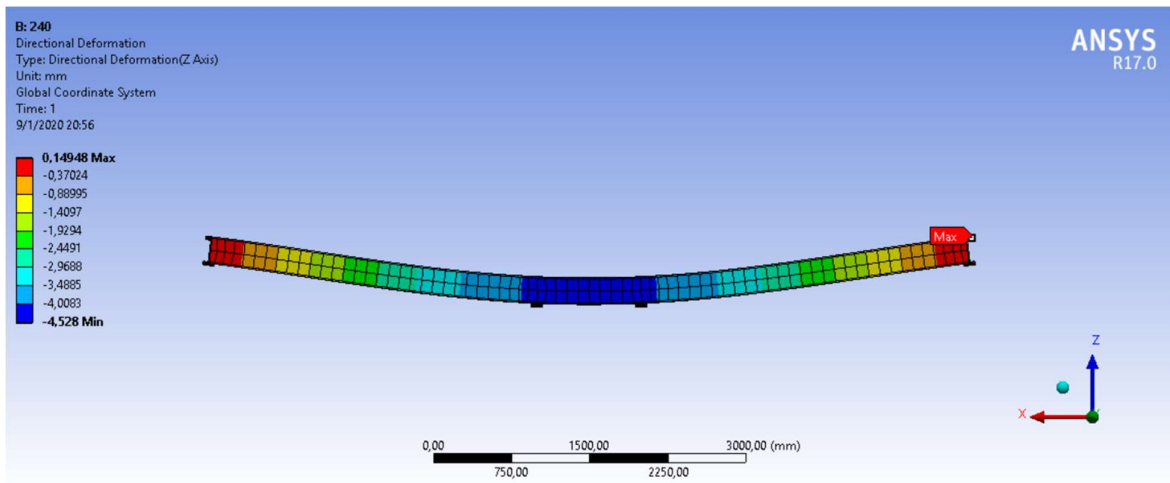


Figura B.7 Deflexión en viga IPN240 (Vista Transversal).
 Fuente: Autoría propia

Como se observa en las figuras B.4-B.7, ambos casos cumplen la restricción, pero como la viga IPN200 se encuentra muy cerca del límite, se decidió utilizar la viga IPN240 por factor de seguridad.

Una vez definido el diseño del carro remolcador se obtuvo la masa total del sistema:

La masa del carro remolcador se obtiene multiplicado la longitud total de sus vigas por el peso por metro lineal:

$$w[kg] = 29.8[m] * w\left[\frac{kg}{m}\right]$$

$$w_{carro} = 29.8 * 36.2$$

$$w_{carro} = 1078.76 \text{ kg}$$

El carro remolcador se diseñó con la capacidad de transportar 6 personas, 4 motores y 1 dinamómetro.

Se tienen las siguientes masas:

$$w_{motores} = 68[kg] * 4$$

$$w_{motores} = 272 \text{ kg}$$

$$w_{personas} = 75[kg] * 6$$

$$w_{personas} = 450 \text{ kg}$$

$$w_{dinamometro} = 110 \text{ kg}$$

Sumando las masas puntuales para la masa del carro remolcador, y agregando un factor de seguridad del 20% se obtiene:

$$w_{IPN240} \approx 2300 \text{ kg}$$

El siguiente paso fue definir las fuerzas que actúan en el movimiento del carro remolcador, estas son: las fuerzas inerciales, fuerzas de fricción y resistencia al avance del modelo a escala.

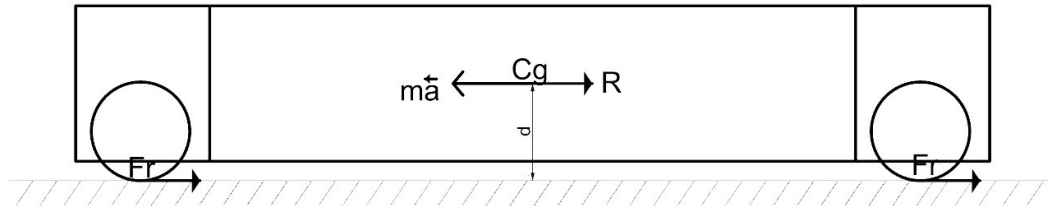


Figura B.8 Diagrama de cuerpo libre carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

$$F = ma + Fr + R$$

Las fuerzas inerciales se calculan con la restricción de diseño para la aceleración de 1.5 m/s²:

$$ma = (2300)(kg) * (1.5) \left(\frac{m}{s^2}\right) = 3450 N$$

La fuerza de fricción se calcula utilizando la masa del sistema y el coeficiente de fricción para ruedas de metal guiadas, [8]:

$$Fr = cmg = 0.0015 * 2300(kg) * 9.8 \left(\frac{m}{s^2}\right) = 33.81N$$

La resistencia del modelo se estimó utilizando el método de holtrop, ya que el tipo de embarcación que más resistencia produce es del tipo tanquero:

$$R = 40 N$$

La resistencia máxima a medir con el dinamómetro seleccionado es de:

$$R = 300 N$$

Por lo cual para el cálculo se utilizó una fuerza de 300 N

Agregando un factor de seguridad del 20%, se obtiene un valor de fuerza total de:

$$F \approx 4540 N$$

Se procede a estimar el torque requerido para los motores, para el cual se necesita la fuerza total del sistema y la distancia r que se observa en la figura B.8. Esta distancia se estimó con el 20% del radio de la rueda más la mitad de la altura de la viga.

La rueda fue seleccionada según catálogo, tomando en consideración que esta sea para rieles y sea capaz de soportar el peso del sistema. Se seleccionó una rueda de radio de 6 plg, la cual se muestra en la figura B.9:

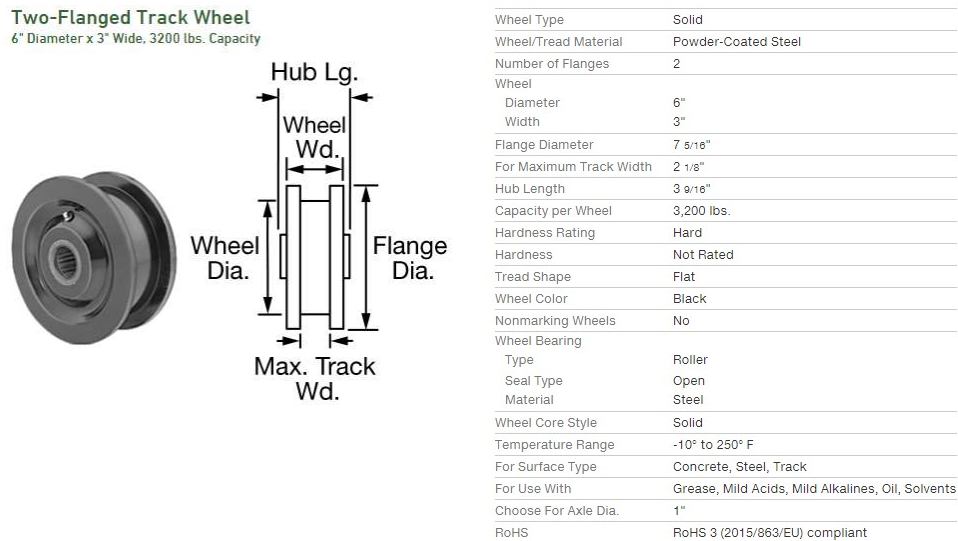


Figura B.8 Ficha Técnica de rueda para carro remolcador.
Fuente: [17]

$$\tau = F * d = 4540 (N) * 0.135(m) \approx 613 Nm$$

Finalmente se obtiene la potencia requerida, con un factor de seguridad del 20%, para mover el sistema a una velocidad de 5 m/s

$$P = \frac{\tau v}{r} = \frac{613 (Nm) * 5 \left(\frac{m}{s}\right)}{0.075 m} \approx 40.9 kW$$

Para la selección del motor se debe tomar en consideración, que esta es la potencia necesaria para mover el carro remolcador a una velocidad de 5 m/s, es decir la potencia necesaria para rotar las ruedas de 6 plg a 650 rpm.

Para este proyecto se seleccionaron motores marca Siemens. En la figura B.9 podemos observar las curvas típicas de comportamiento de los motores:

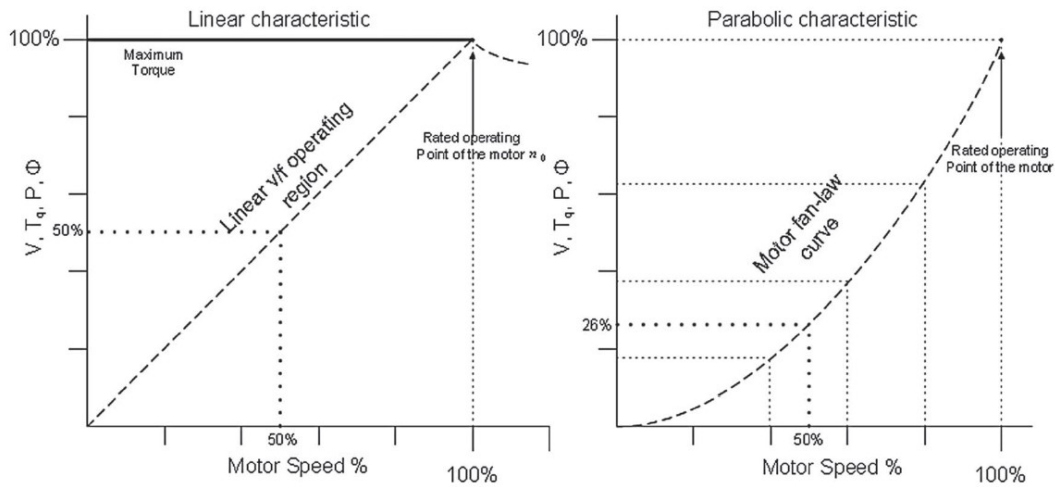


Figura B.9 Curvas típicas de motores siemens.
Fuente: [18]

Como se puede observar, la curva típica del motor es una relación lineal con pendiente igual a uno. Por esta razón, utilizando motores Siemens SIMOTICS IE2 6 polos, que trabajan a 1200 rpm, se necesita un motor de potencia:

$$P_{necesaria} = \frac{P_{calculada}}{0.55} = \frac{40.9 (kW)}{0.55} \approx 74.4 kW$$

Dándonos una potencia necesaria de 18.6 kW para cada uno de los 4 motores.

APÉNDICE C

Presupuestos y Análisis de viabilidad

Tabla C.1 Rubros del presupuesto de la obra civil.

Fuente: Autoría propia

1.0 PRELIMINARES
2.0 MOVIMIENTO DE TIERRAS
3.0 ESTRUCTURAS EN HORMIGON Y METAL
4.0 PAREDES Y REVESTIMIENTOS
5.0 TUMBADOS
6.0 PUERTAS
7.0 CANAL
8.0 INSTALACIONES SANITARIAS
9.0 INSTALACIONES ELECTRICAS

Tabla C.2 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Preliminares).

Fuente: Autoría propia

1.0 PRELIMINARES		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
1.1 Limpieza y desbroce de terreno con empleo de maquinaria(incluye desalojo)	M2	\$ 1,00
1.2 Replanteo y nivelación	M2	\$ 1,20
1.3 Instalación provisional de luz	GBL	\$ 200,00
1.4 Instalación provisional de agua	GBL	\$ 100,00
1.5 caseta para bodega y guardianía	M2	\$ 50,00
1.6 Cerramiento perimetral provisional	MI	\$ 30,00

Tabla C.3 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Movimiento de Tierras).

Fuente: Autoría propia

2.0 MOVIMIENTO DE TIERRAS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
2.1 Excavación y desalojo con maquinaria	M3	\$ 6,45
2.2 Relleno con sub-base clase 3	M3	\$ 19,55
2.3 Mejoramiento tipo MTOP	M3	\$ 9,80
2.4 Relleno con piedra bola	M3	\$ 16,14

**Tabla C.4 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil
(Estructuras en Hormigón y Metal).**

Fuente: Autoría propia

3.0 ESTRUCTURAS EN HORMIGÓN Y METAL		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
3.1 Replanto de HoSo	M3	\$ 195,00
3.2 Contra piso de hormigón premezclado de 210Kg/m2	M2	\$ 25,59
3.2 Malla electro soldada de contra piso 20x20x8mm	M2	\$ 9,46
3.3 Hormigón de 210kg/m2 en plintos	M3	\$ 266,00
3.4 Hormigón simple en zapatas	M2	\$ 39,00
3.5 Montaje de estructura metálica en cubierta	M2	\$ 53,00
3.6 cubierta Kubiloc pre pintado 0.40/Galvalume con poliuretano 38mm	M2	\$ 53,00
3.7 Hormigón de 210 kg./m2 en muros de contención	M3	\$ 286,00
3.8 Acero de refuerzo en muros, plintos y zapatas	Kg	\$ 2,35
3.9 Cisterna de hormigón armado cap. 15 m3	Kg.	\$ 5.000,00
3.10 Escalera de hormigón armado y metal	GBL	\$ 800,00
3.10 Columnas metálicas 20x20x5mm	MI	\$ 66,44
3.11 Columnas metálicas 20x20x6mm	MI	\$ 78,94
3.12 Montaje de Estructura metálica para losa de entrepiso	M2	\$ 158,00
3.13 Losa con placa colaborante	M2	\$ 39,00
3.14 Hormigón armado en riostras	M3	\$ 373,00
3.15 Hormigón armado en viguetas	MI	\$ 3,98
3.16 Muros de Hormigón simple	M3	\$ 244,30

**Tabla C.5 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil
(Paredes y Revestimientos).**

Fuente: Autoría propia

4.0 PAREDES Y REVESTIMIENTOS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
4.1 Mampostería de bloque e= 0.10	M2	\$ 18,23
4.2 Enlucido vertical planta baja y planta alta	M2	\$ 12,21
4.3 Enlucido vertical subsuelo	M2	\$ 12,21
4.4 Empaste interior - exterior	M2	\$ 6,00
4.5 Pintura interior - exterior	M2	\$ 7,00
4.6 Paneles de aluminio compuesto	M2	\$ 90,00
4.7 Aluminio y vidrio en ventanas	M2	\$ 60,00
4.8 Estructura metálica en cubierta	M2	\$ 30,00
4.9 Porcelanato en pisos	M2	\$ 30,00
4.10 Cerámica nacional en baños	M2	\$ 24,00
4.11 Vidrio Templado en fachada flotante	M2	\$ 70,00

Tabla C.6 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Tumbados).

Fuente: Autoría propia

5.0 TUMBADOS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
5.1 Gypsum	M2	\$ 16,80

Tabla C.7 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Puertas).

Fuente: Autoría propia

6.0 PUERTAS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
6.1 Puertas interiores	GBL	\$ 155,00
6.2 Puerta ingreso	GBL	\$ 800,00
6.3 Puertas de enrollable	U	\$ 300,00

Tabla C.8 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Canal).

Fuente: Autoría propia

7.0 CANAL		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
7.1 Hormigón de 210KG/CM2 en pisos y muros (incluye encofrado)	M3	\$ 286,00
7.2 acero de refuerzo	Kg.	\$ 2,35
7.3 Enlucido	M2	\$ 12,21
7.4 Revestimiento de cerámica	M2	\$ 25,00
7.5 Relleno con sub-base clase 3	M3	\$ 19,55
7.6 Vidrio panorámico	M2	\$ 65,00
7.07 Replantillo de HoSo	M3	\$ 195,00

Tabla C.9 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Instalaciones Sanitarias).

Fuente: Autoría propia

8.0 INSTALACIONES SANITARIAS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
8.1 Puntos de aguas servidas Ø 50 mm.	Pto	\$ 39,42
8.2 Puntos de agua fría Ø 1/2"	Pto	\$ 31,40
8.3 Tubería de distribución de PVC 1/2" (420 PSI)	M	\$ 4,37
8.4 Tubería de PVC Ø 50 mm. para descargas	M	\$ 8,78
8.5 Tubería de PVC Ø 110 mm	M	\$ 12,17
8.6 Puntos de aguas servidas Ø 110 mm.	pto	\$ 53,74
8.7 Cajas de revisión c. / tapa 0.60x0.60x0,60	U	\$ 179,20
8.8 Provisión e instalación de inodoro (incluye accesorios)	U	\$ 125,19
8.9 Provisión e instalación de lavamanos	U	\$ 80,00

Tabla C.10 Detalle de rubros del presupuesto de la obra civil (Instalaciones Eléctricas).

Fuente: Autoría propia

9.0 INSTALACIONES ELÉCTRICAS		
DESCRIPCION	UNIDAD	PREC.UNITARIO
9.1 Punto de luz con luminarias	pto	\$ 49,00
9.2 Tomacorriente 110 V.	pto	\$ 35,84
9.3 Punto de AA 220 V.	pto	\$ 67,20
9.4 Punto internet	pto	\$ 35,84
9.5 Punto teléfono	pto	\$ 35,84
9.6 Varilla a tierra	U	\$ 40,00
9.7 Caja de Breaker de 8/16	U	\$ 112,00
9.8 Breaker 40 amp. 1 P	U	\$ 12,00
9.9 Tubo de 1 1/4	MI	\$ 3,36
9.10 Breaker de 50AMP 2P	U	\$ 20,00
9.11 Acometida poste a medidor	M	\$ 22,00
9.12 Acometida a cajas de Breakes	M	\$ 16,80

Tabla C.11 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 110 m).

Fuente: Autoría propia

1.0 PRELIMINARES	\$ 14.472,90
2.0 MOVIMIENTO DE TIERRAS	\$ 174.504,90
3.0 ESTRUCTURAS EN HORMIGON Y METAL	\$ 366.628,29
4.0 PAREDES Y REVESTIMIENTOS	\$ 214.169,97
5.0 TUMBADOS	\$ 6.384,00
6.0 PUERTAS	\$ 1.255,00
7.0 CANAL	\$ 274.455,59
8.0 INSTALACIONES SANITARIAS	\$ 2.880,81
9.0 INSTALACIONES ELECTRICAS	\$ 8.382,52
VALOR TOTAL	\$1.063.133,98

Tabla C.12 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 90 m).

Fuente: Autoría propia

1.0 PRELIMINARES	\$ 12.689,90
2.0 MOVIMIENTO DE TIERRAS	\$139.470,85
3.0 ESTRUCTURAS EN HORMIGON Y METAL	\$323.518,86
4.0 PAREDES Y REVESTIMIENTOS	\$189.400,72
5.0 TUMBADOS	\$ 6.384,00
6.0 PUERTAS	\$ 1.255,00
7.0 PISCINA	\$221.596,71
7.0 INSTALACIONES SANITARIAS	\$ 2.880,81
8.0 INSTALACIONES ELECTRICAS	\$ 7.990,52
VALOR TOTAL	\$905.187,37

Tabla C.13 Resumen presupuesto de obra civil (Canal 70 m).

Fuente: Autoría propia

1.0 PRELIMINARES	\$ 14.472,90
2.0 MOVIMIENTO DE TIERRAS	\$108.499,05
3.0 ESTRUCTURAS EN HORMIGON Y METAL	\$280.434,78
4.0 PAREDES Y REVESTIMIENTOS	\$164.631,47
5.0 TUMBADOS	\$ 6.384,00
6.0 PUERTAS	\$ 1.255,00
7.0 PISCINA	\$168.714,52
7.0 INSTALACIONES SANITARIAS	\$ 2.880,81
8.0 INSTALACIONES ELECTRICAS	\$ 7.598,52
VALOR TOTAL	\$754.871,05

Tabla C.14 Resumen de presupuesto del personal.

Fuente: Autoría propia

Personal	Cantidad	Pago Mensual	P. M. Percibido 1 año	P.M. Percibido
Director	1	\$ 2.000,00	\$ 2.321,44	\$ 2.431,17
Técnico de modelado	1	\$ 1.200,00	\$ 1.392,87	\$ 1.458,70
Técnico de experimentación	1	\$ 1.200,00	\$ 1.392,87	\$ 1.458,70
Ayudantes de investigación	4	\$ 125,00	\$ 500,00	\$ 500,00
Conserje (+ Limpieza piscina)	1	\$ 600,00	\$ 696,43	\$ 729,35
Asistente Administrativo	1	\$ 800,00	\$ 928,58	\$ 972,47
Total mensual			\$ 7.232,19	\$ 7.550,39
Total anual			\$ 86.786,24	\$ 90.604,63

Tabla C.15 Ejemplo de cálculo del costo de mantenimiento del canal.

Fuente: Autoría propia

Mantenimiento Canal 90 m			
Descripción	Unidades (mensuales)	Costo Unitario	Costo total
m3 referencia	100		
Pastillas (x filtro)	12	\$ 1,00	\$ 84,00
Sulfato Aluminio	3	\$ 0,72	\$ 2,16
Sulfato de Cobre	1	\$ 4,02	\$ 4,02
Kilo de cloro granulado	2	\$ 2,41	\$ 4,82
m3 canal	2340	Total mensual	\$ 341,40
Factor	23,4	Total anual	\$ 4.096,80

Tabla C.16 Ejemplo de cálculo del costo del uso del carro remolcador en el canal de 90 m.

Fuente: Autoría propia

Carro remolcador en canal de 90 m	
kW por corrida	75
Número de corridas por día	7,5
Tiempo x corrida (s)	20
kW/h	3,125
Días al año	185
kW promedio al año	578,125
Demanda promedio al año	1734,375
Costo kW/h	\$ 0,07
Costo kW promedio	\$ 1.734,58

Tabla C.17 Resumen presupuesto de costos operacionales por longitud de canal.

Fuente: Autoría propia

Longitud del canal de pruebas [m]	110	90	70
Costo Fijo			
Personal año 1	\$ 86.786,24	\$ 86.786,24	\$ 86.786,24
Personal	\$ 90.604,63	\$ 90.604,63	\$ 90.604,63
Mantenimiento	\$ 4.783,20	\$ 4.096,80	\$ 3.410,40
Luz + Agua	\$ 2.400,00	\$ 2.400,00	\$ 2.400,00
Total año 1	\$ 93.969,44	\$ 93.283,04	\$ 92.596,64
Total después de año 1	\$ 97.787,83	\$ 97.101,43	\$ 96.415,03
Costo Variable			
Remolcador	\$ 1.156,39	\$ 1.734,58	\$ 3.469,16

Tabla C.18 Resumen de la estimación de ingresos usando valores referenciales de canales de pruebas operativos.

Fuente: Autoría propia

Duración Proyecto promedio	37
Número de proyectos	5
Número de días	185
Valor IPT	\$ 325.000,00
VALOR CEHINAV	\$ 179.360,00
Promedio	\$ 252.180,00

Tabla C.19 Resumen presupuesto de equipos.

Fuente: Autoría propia

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PREC.UNITARIO	PRECIO TOTAL
Maquinaria Tratamiento Agua			
Filtro Pentair L36	7	\$ 1.659,04	\$ 11.613,28
Bomba 3 HP Wisperflo	7	\$ 1.143,60	\$ 8.005,20
Subtotal			\$ 19.618,48
Maquinaria Generador de Olas			
Motor SIEMES SIMOTICS IE2 6 POLOS 1,12 kW	6	\$ 369,00	\$ 2.214,00
Variador SINAMICS V20	6	\$ 385,00	\$ 2.310,00
Panel operador externo	6	\$ 58,00	\$ 348,00
Interfaz para panel operador	6	\$ 39,00	\$ 234,00
Interfaz para copiar parámetros	6	\$ 127,00	\$ 762,00
Tarjeta de memoria SD	6	\$ 107,00	\$ 642,00
Reactancias de entrada	6	\$ 183,00	\$ 1.098,00
Subtotal			\$ 7.608,00
Maquinaria Remolcador			
Remolcador & Instalación	1	\$ 3.285,41	\$ 3.285,41
Motor SIEMES SIMOTICS IE2 6 POLOS 18,7 kW	4	\$ 2.794,00	\$ 11.176,00
Variador SIEMENS MM440	4	\$ 3.504,00	\$ 14.016,00
Panel operador	1	\$ 264,00	\$ 264,00
Kit programación	1	\$ 66,00	\$ 66,00
Kit para montaje	1	\$ 196,00	\$ 196,00
Modulo para encoder	1	\$ 296,00	\$ 296,00
Módulo de comunicación Profibus	1	\$ 234,00	\$ 234,00
Reactancias trifásicas de entrada	4	\$ 481,00	\$ 1.924,00
Resistencias de frenada	4	\$ 525,00	\$ 2.100,00
Subtotal			\$ 33.557,41
Equipos de Medición			
Dinamómetro	1	\$ 15.000,00	\$ 15.000,00
Termómetro	1	\$ 2.065,00	\$ 2.065,00
Tacómetro	1	\$ 120,00	\$ 120,00
Ultrasonido para agua	2	\$ 1.186,00	\$ 3.439,40
Subtotal			\$ 20.624,40
TOTAL			\$ 81.408,29

APÉNDICE D

Modelos 2D y 3D de la Instalación y carro remolcador

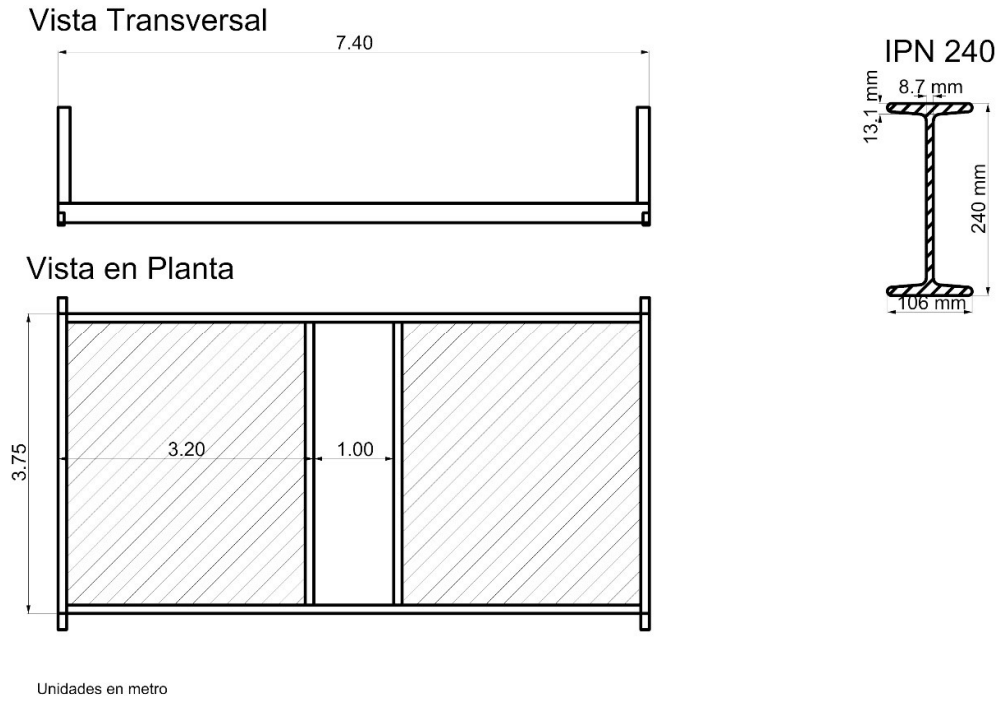


Figura D.1 Esquema 2D de carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

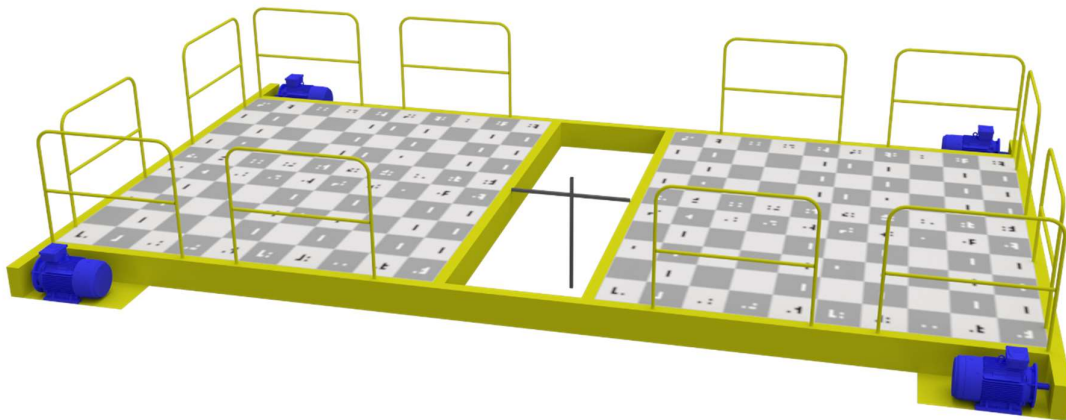


Figura D.2 Esquema 3D de carro remolcador.
Fuente: Autoría propia

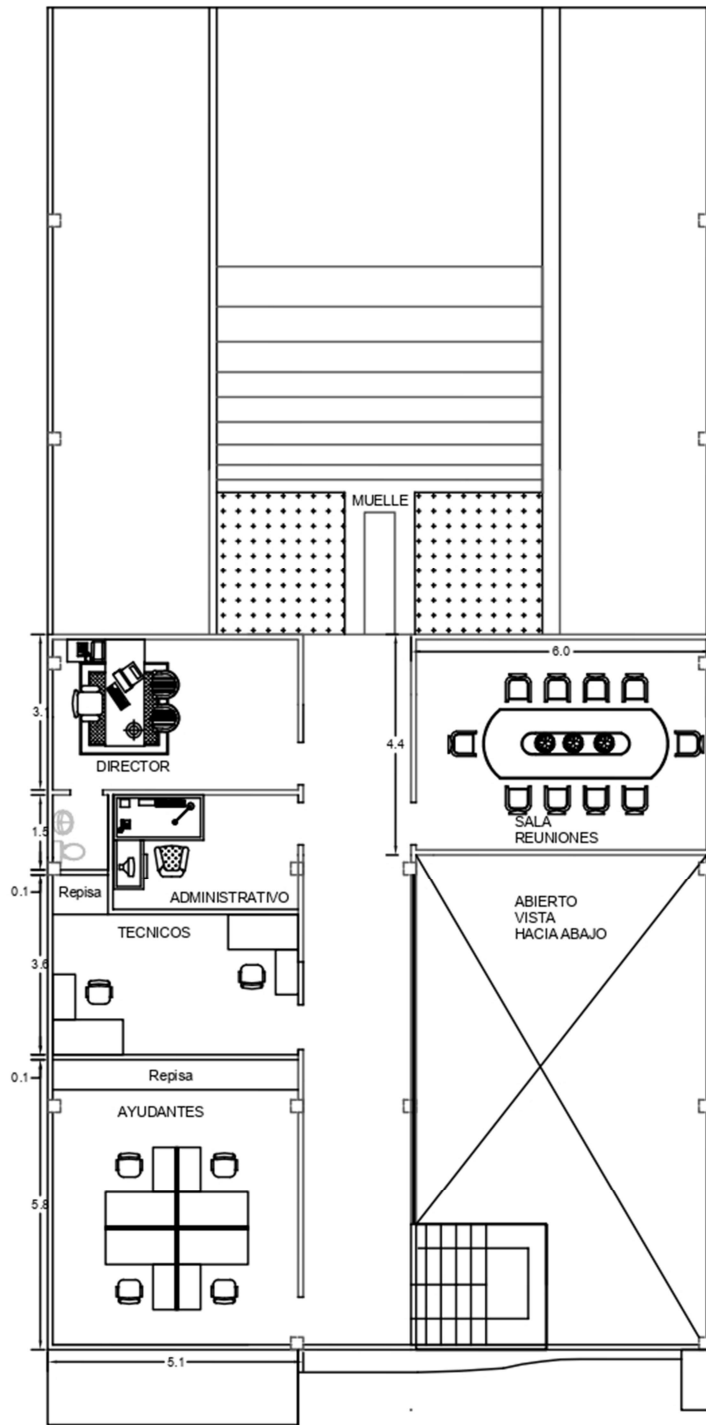


Figura D.3 Distribución Laboratorio Planta Alta.
Fuente: Autoría propia

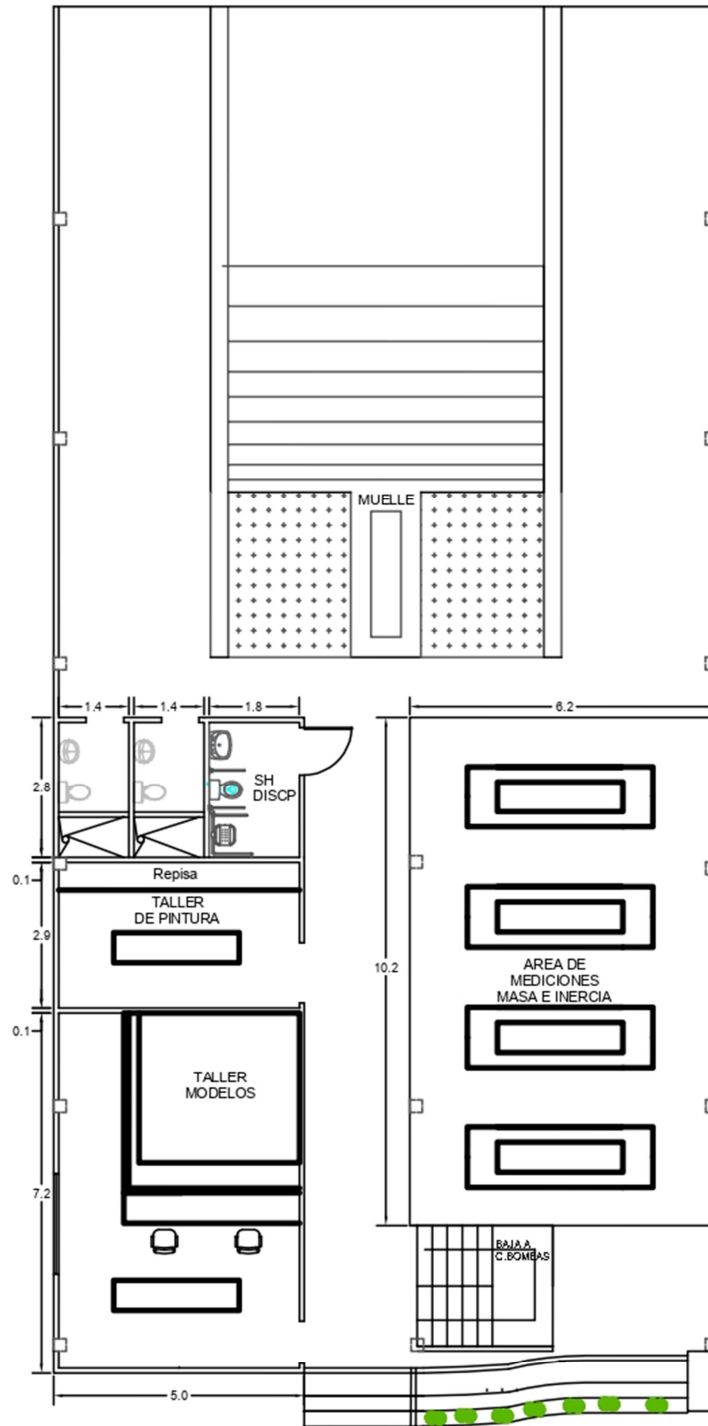


Figura D.4 Distribución Laboratorio Planta Baja.
Fuente: Autoría propia

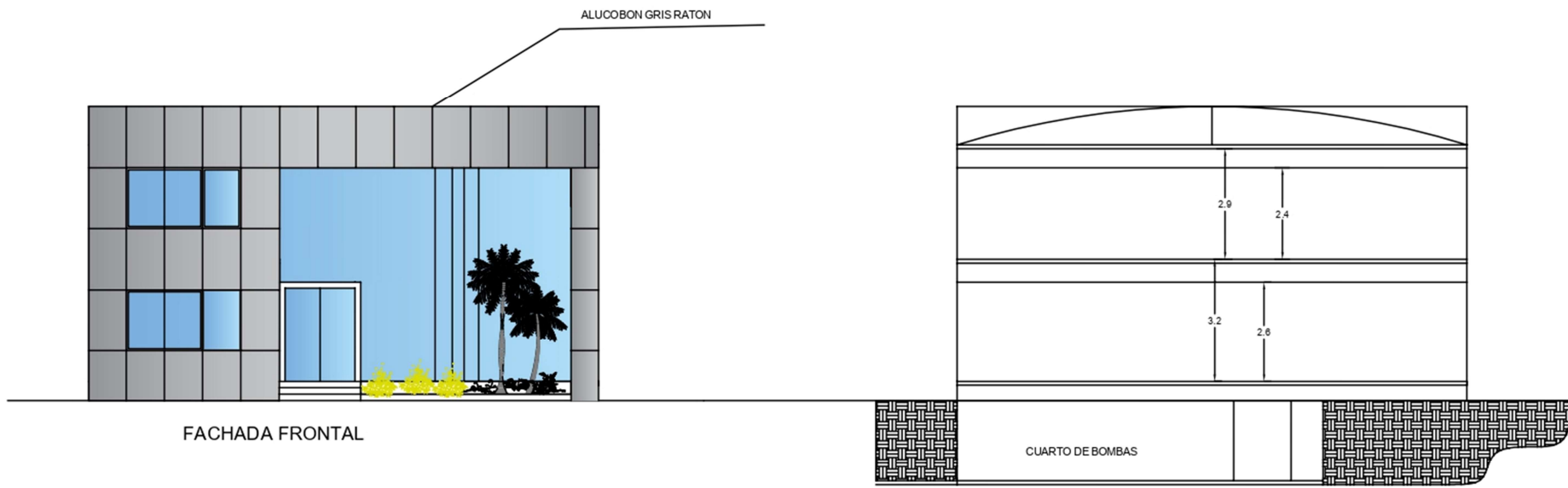


Figura D.5 Fachada 2D Laboratorio
Fuente: Autoría propia



Figura D.6 Fachada 3D Laboratorio (1)
Fuente: Autoría propia



Figura D.7 Fachada 3D Laboratorio (2)
Fuente: Autoría propia



Figura D.8 Ilustración 3D de distribución del Laboratorio (1)
Fuente: Autoría propia



Figura D.9 Ilustración 3D de distribución del Laboratorio (2)
Fuente: Autoría propia



Figura D.10 Ilustración 3D del canal de pruebas hidrodinámicas (1)
Fuente: Autoría propia



Figura D.11 Ilustración 3D del canal de pruebas hidrodinámicas (2)
Fuente: Autoría propia