

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un carro de remolque para medición de fuerzas en un canal hidráulico.

Proyecto Integrador

Previo a la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico.

Presentado por:

Barrera Muñoz Daniel Felipe

Encarnación Laje Angel Bryan

Guayaquil - Ecuador

Año: 2023

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mi madre Olga Laje y a mi padre Angel Encarnación que con esfuerzos y dedicación me han apoyado en este proceso educativo.

A Raisa y Rhay Bustos quienes me han brindado su apoyo y palabras de superación

Angel Bryan Encarnacion Laje

A mi madre Girlesa Muñoz, cuyo amor incondicional ha sido mi motor en cada desafío. A mi padre Gutemberg Barrera, quién con sabiduría me ha enseñado el valor del esfuerzo y perseverancia. A mis hermanos Luis y Gustavo Barrera, quienes con complicidad y ánimo han convertido cada obstáculo en oportunidad.

Daniel Felipe Barrera Muñoz

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento al Ingeniero Jorge Silva y al Ingeniero Daniel Moreira por su apoyo y orientación en cada paso del desarrollo de este proyecto. Su dedicación y conocimiento fueron fundamentales para el éxito del proyecto, extendemos nuestro reconocimiento a la institución educativa y a los docentes de la universidad, cuya invaluable experiencia y generosidad de compartir su sabiduría nos brindaron un cimiento sólido sobre el cual construir este proyecto.

Declaración Expresa

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Barrera Muñoz Daniel Felipe y Encarnacion Laje Angel Bryan y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Barrera Muñoz Daniel.



Encarnación Laje Angel

Evaluadores

Ph.D. Emerita Delgado P.

Profesor de Materia

Ph.D. Jorge Silva.

Tutor de proyecto

Resumen

El diseño de un carro de remolque para medir fuerzas en un canal hidráulico se presenta como requisito en el proceso de graduación de la Materia Integradora de la Unidad Académica. Este proyecto se justifica por la necesidad de habilitar mediciones precisas de fuerzas hidrodinámicas en cuerpos sumergidos en movimiento. El diseño incorpora conocimientos de mecánica de fluidos, mecánica de sólidos e instrumentación. Desarrollar el proyecto incluyó pasos tales como la selección de materiales y motor mediante técnicas de lluvia de ideas y matrices de selección, y el desarrollo de planos de fabricación de piezas selectas. Las fuerzas mecánicas e hidrodinámicas involucradas se analizaron detalladamente. Se diseñó y simuló el prototipo utilizando herramientas como Autodesk Inventor® y Ansys Fluent®. Los resultados obtenidos abarcan mediciones de fuerzas involucradas, deformaciones de elementos principales y simulaciones CFD. El diseño final es factible y capaz de resistir las fuerzas relevantes sin presentar deformaciones relevantes. En conclusión, este proyecto ha resultado en un diseño funcional de carro de remolque para mediciones hidrodinámicas en cuerpos sumergidos en movimiento. Los resultados obtenidos respaldan la eficacia y precisión del diseño. Este trabajo contribuye significativamente a la universidad con una mayor capacidad para realizar experimentos en el ámbito de flujos externos en mecánica de fluidos.

Palabras Clave: carro remolque, mediciones hidrodinámicas, diseño mecánico, simulación.

Abstract

The design of a towing carriage for measuring forces in a hydraulic channel is presented as a requirement in the graduation process of the Capstone Course of the Academic Unit. This project is justified by the need to enable precise measurements of hydrodynamic forces on submerged bodies in motion. The design incorporates knowledge from fluid mechanics, solid mechanics, and instrumentation. Developing the project included steps such as materials and motor selection using brainstorming and selection matrix techniques, and the production of manufacturing plans for select parts. The involved mechanical and hydrodynamic forces were analyzed in detail. The prototype was designed and simulated using tools like Autodesk Inventor® and Ansys Fluent®. The obtained results encompass measurements of involved forces, deformations of main elements, and CFD simulations. The final design is feasible and capable of withstanding relevant forces without exhibiting relevant deformations. In conclusion, this project has resulted in a functional design of a trailer for hydrodynamic measurements on bodies submerged in motion. The obtained results support the effectiveness and accuracy of the design. This work significantly contributes to the university with a higher capacity for conducting experiments in the field of external flows in fluid mechanics.

Keywords: towing carriage, hydrodynamic measurements, mechanical design, simulation.

Índice general

Índice general	I
Abreviaturas	IV
Simbología	V
Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VIII
ÍNDICE DE PLANOS	IX
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	2
1.2 Descripción del problema	2
1.3 Objetivos	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Marco teórico	7
1.4.1 Mecánica de fluidos	7
1.4.2 Coeficientes de Arrastre	9
1.4.3 Motores de inducción	11
1.4.4 Motor paso a paso	12
1.4.5 Drive de motor	13
1.4.6 Eficiencia	13
1.4.7 Instrumentos de medición Galga extensiométrica	14
1.4.8 Celda de carga	15
1.4.9 Dinamómetro	16
Capítulo 2	17
2.1 Metodología	18
2.2 Requerimientos de diseño	20

2.3	Criterios de diseño	21
2.3.1	Ponderación de criterio	22
2.4	Alternativas de diseño	23
2.4.1	Selección de alternativas	28
2.4.2	Selección del Diseño final.	32
2.4.3	Diseño de forma del sistema y sus componentes	33
2.5	Selección de materiales.....	35
2.6	Selección del motor.....	38
2.7	Flujo volumétrico.....	40
2.8	Análisis de fuerzas involucradas en el sistema.....	40
2.8.1	Cálculo de fuerza de arrastre (DRAG)	42
2.8.2	Cálculo de fuerza de sustentación (LIFT)	43
2.9	Metodología de simulación	44
Capítulo 3	47
3.1	Resultados y análisis	48
3.2	Análisis de Fuerzas	49
3.3	Selección del motor.....	62
3.4	Deformación de la Varilla.....	63
3.5	Simulación ANSYS Fluent de dos Modelos	65
3.5.1	Construcción de los CAD	65
3.5.2	Preparación del Mallado.....	66
3.5.3	Configuración de la Física.....	67
3.5.4	Contornos, Líneas de Corriente y Fuerzas Obtenidas	68
3.6	Análisis de Costos.....	71
3.6.1	Cotización y Proforma	71
Capítulo 4	75

4.1	Conclusiones y recomendaciones.....	76
4.1.1	Conclusiones.....	76
4.1.2	Recomendaciones.....	79
	Bibliografía.....	82
	Apéndice.....	83

Abreviaturas

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

CFD Computational Fluids Dynamics

CAD Computer Assisted Design

ZV Zona de Visualización

Simbología

Pa	Pascal
m	Metro
cm	Centrimetro
mm	milímetro
s	segundo
h	hora
Kg	kilogramo
HP	Horsepower
kW	Kilovatios
RPM	Revoluciones por minuto
N	Newton
%	Porcentaje
K	Kilo

Índice de figuras

Figura 1 Fuerzas y momentos en cuerpos sumergidos.....	7
Figura 2 Esfuerzos sobre Cuerpo Sumergido en Flujo	8
Figura 3 Arrastre y Sustentación en un Ala con una Solapa.....	10
Figura 4 Tipo de máquinas asíncronas o de inducciones	11
Figura 5 Diagrama de flujo	19
Figura 6 Método de sujeción de varilla roscada.....	24
Figura 7 Método de sujeción mediante varilla roscada doblada	24
Figura 8 Medición de velocidad por sensores ópticos	25
Figura 9 Medición de velocidad usando tacómetro	25
Figura 10 Medición de fuerza utilizando galgas extensiométricas	26
Figura 11 Medición de fuerza utilizando sensor de fuerza	26
Figura 12 Método de fuerza utilizando celdas de carga.....	27
Figura 13 Método de tracción ubicación del motor vertical	27
Figura 14 Método de tracción utilizando poleas	28
Figura 15 Método de tracción utilizando engranaje.....	28
Figura 16 Diseño de forma del sistema carro remolque.....	34
Figura 17 Vista lateral del diseño de forma	35
Figura 18 Diagrama del torque aplicado al eje del motor.	39
Figura 19 Diagrama de cuerpo libre de la varilla.....	41
Figura 20 Diagrama de cuerpo libre del carro de remolque.....	41
Figura 21 Canal Hidráulico	44
Figura 22 Carro de remolque	44
Figura 23 Sensor IR FC51.....	45
Figura 24 Rollo de Cuerda	45
Figura 25 Guía de Cuerda	45
Figura 26 Soporte Inferior de Varilla.....	45
Figura 27 Plataforma de Motor	45
Figura 28 Soporte de Sensor	45
Figura 29 Motor de Paso	46
Figura 30 Soporte Superior de Varilla	46
Figura 31 Sujeción de Modelo	46

Figura 32 Varilla	46
Figura 33 Anillo De Sujeción De Cuerda	46
Figura 34 Ensamble de los elementos para el carro de remolque	48
Figura 35 Vista proyectada del cono	50
Figura 36 Fuerzas que actúan sobre el cono	52
Figura 37 Vista proyectada del medio tubo	54
Figura 38 Diagrama de cuerpo libre medio tubo.....	55
Figura 39 Dimensiones del elemento de sujeción del modelo.....	57
Figura 40 Diagrama de cuerpo libre del modelo.....	59
Figura 41 Diagrama de cuerpo libre de la varilla.....	61
Figura 42 Diagrama de corte de la Varilla	64
Figura 43 CAD para el Modelo del Cono	66
Figura 44 CAD para el Modelo del Medio Tubo	66
Figura 45 Mallado del Cono.....	67
Figura 46 Mallado del Medio Tubo	67
Figura 47 Distribución de Presión sobre el Cono	68
Figura 48 Distribución de Presión Sobre el Medio Tubo.....	69
Figura 49 Líneas de Corriente del Agua Alrededor del Cono.....	70
Figura 50 Líneas de Corriente del Agua Alrededor del Medio Tubo	70

Índice de tablas

Tabla 1 Coeficientes de Arrastre para Varias Geometrías	10
Tabla 2 Rango y criterios para la comparación de pares.....	22
Tabla 3 Comparación por pares para el sistema de carro de remolque.....	23
Tabla 4 Rango de criterios para la matriz de decisión	29
Tabla 5 Matriz de decisión para el método de sujeción.	29
Tabla 6 Matriz de decisión para el método de medición de velocidad.	30
Tabla 7 Matriz de decisión para el método de medición de fuerza.....	31
Tabla 8 Matriz de decisión para el método de tracción.....	32
Tabla 9 Materiales de Piezas Principales	37
Tabla 10 Elementos propuestos para el carro de remolque.....	49
Tabla 11 Especificaciones del motor paso MP3-42H060	63
Tabla 12 Costos de Equipos y Materiales	72
Tabla 13 Costos de Servicios	73
Tabla 14 Costos Totales	74

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Anillo de Tracción.....	101
Plano 2 Rollo.....	102
Plano 3 Varilla Superior.....	103
Plano 4 Varilla Inferior	104
Plano 5 Guía.....	105
Plano 6 Base de Guías.....	106
Plano 7 Plataforma de Motor	107
Plano 8 Plataforma de FC51.....	108
Plano 9 Soporte Inferior de Varilla	109
Plano 10 Soporte Superior de Varilla.....	110
Plano 11 Sujeción de Modelo.....	¡Error! Marcador no definido.

Capítulo 1

1.1 Introducción

En los laboratorios de diferentes universidades de ingeniería, se utilizan carros de remolque para llevar a cabo pruebas experimentales y mediciones de las fuerzas hidrodinámicas a las que se exponen los cuerpos cuando se encuentran en un flujo. En el laboratorio de hidráulica de la FIMCP, donde hay un canal hidráulico, se busca diseñar un carro de remolque.

En el proceso de diseño, se considerarán elementos fundamentales como la compatibilidad estructural y funcional con el canal hidráulico, la disponibilidad de potencia, la incorporación de instrumentación y un sistema de adquisición de datos. Se aplicarán conocimientos de ingeniería mecánica y se llevarán a cabo pruebas y análisis con simulación en CFD para asegurar que el sistema propuesto cumpla con los requisitos y sea efectivo en su funcionamiento.

Mediante este enfoque integral, se espera lograr un diseño óptimo del carro de remolque, mejorando así la capacidad del laboratorio para llevar a cabo experimentos en el campo de la hidráulica. Con estos avances, se contribuirá al progreso de la investigación y desarrollo en el ámbito de la ingeniería mecánica, permitiendo un mejor entendimiento de las fuerzas hidrodinámicas y su impacto en los cuerpos en movimiento expuestos a un flujo estático.

1.2 Descripción del problema

En el laboratorio de hidráulica de la FIMCP, actualmente existe una necesidad de medir las fuerzas que actúan sobre modelos en movimiento dentro de un fluido estático en un canal hidráulico. Para llevar a cabo estudios y experimentos relevantes, se requiere utilizar un carro de remolque, el cual arrastra el modelo a través del fluido bajo condiciones controladas. Sin embargo, en la situación actual, el laboratorio carece de un carro de remolque adecuado, lo que limita significativamente su capacidad para realizar mediciones precisas y seguras.

Como consecuencia directa de esta carencia, resulta indispensable diseñar un sistema de carro de remolque compatible con el canal hidráulico existente, que cumpla con los requisitos necesarios para llevar a cabo pruebas experimentales de manera segura y precisa. Este sistema deberá ser capaz de soportar las condiciones específicas como resistir los esfuerzos que se presentan durante su uso, requiere resistir las vibraciones y garantizar mediciones confiables de fuerzas y otros parámetros de interés.

Para resolver este problema, se deben considerar diversos aspectos clave en el diseño del carro de remolque. Entre ellos se incluyen: la compatibilidad estructural y funcional con el canal hidráulico existente, la potencia disponible para el carro, la incorporación de la instrumentación y el sistema de adquisición de datos necesarios para las mediciones, así como la seguridad tanto del equipo como de los investigadores que operarán el sistema.

1.3 Justificación del problema

En el artículo de noticias de la Universidad de Virginia Tech titulado “With instrumentation upgrades and modernization, Virginia Tech’s towing tank facility is primed for engineering research” (Green, With instrumentation upgrades and modernization, Virginia Tech’s towing tank facility is primed for engineering research, 2022), se destaca la implementación exitosa de un carro de remolque rediseñado en su laboratorio. Este nuevo diseño, equipado con sensores y un mecanismo de movimiento controlado, permite realizar experimentos más precisos. Además, estos avances respaldan la validación de modelos analíticos y computacionales de dinámica de fluidos en áreas de investigación relacionadas con la navegación y el comportamiento de embarcaciones. Gracias a estas mejoras, se obtienen datos más exactos, se simulan diversos movimientos y se amplía la comprensión del rendimiento de las embarcaciones.

En Latinoamérica, donde la norma es evaluar la viabilidad de instalación de un túnel de agua para este tipo de experimentos (Ibarra & Palacios, 2013), existe poca consideración por equipos que permitan desplazar un cuerpo sumergido en fluido estático bajo condiciones de estudio. Esto a su vez resulta en una pobre documentación sobre prácticas y diseños viables para la construcción de este tipo de equipos, y esta debe partir desde los fundamentos teóricos y usando los criterios de construcción de los túneles de agua, como los sugeridos por Ibarra y Palacios.

En el laboratorio de hidráulica de la FIMCP existe la necesidad de realizar pruebas experimentales de investigación científica en el área de hidráulica. Estas pruebas permiten validar modelos teóricos y mejorar la comprensión de los fenómenos físicos. Además, la experimentación en entornos controlados es una herramienta crucial para el diseño y optimización de sistemas y procesos hidráulicos. Aquello puede tener aplicaciones en diversas áreas como ingeniería civil, ambiental, naval, etc.

Para poder realizar pruebas experimentales en un canal hidráulico es necesario contar con un sistema de carro de remolque. Este permite trasladar el modelo dentro del agua a las condiciones de velocidad y aceleración requeridas para llevar a cabo las mediciones. Al no contar con este equipo en el laboratorio, resulta necesario diseñar y construir un sistema que permita realizar las pruebas experimentales de manera segura y precisa. Por lo tanto, este proyecto es esencial para poder llevar a cabo investigaciones y avances en el campo de la hidráulica y sus aplicaciones prácticas.

La problemática se centra en la falta de un sistema de carro de remolque en el laboratorio de hidráulica de la FIMCP, lo cual limita la capacidad de realizar pruebas experimentales de mediciones de fuerzas sobre modelos en movimiento en un fluido estático dentro de un canal

hidráulico. Sin este equipo, no es posible trasladar modelos dentro del agua a las condiciones de velocidad y aceleración necesarias para llevar a cabo mediciones y análisis relevantes.

Los limitantes o restricciones incluyen la falta de recursos y equipos adecuados para realizar las pruebas experimentales, lo que impide el avance en la investigación científica en el área de hidráulica. Además, la ausencia de un sistema de carro de remolque dificulta el diseño y la optimización de sistemas y procesos hidráulicos, lo cual tiene implicaciones en diversas áreas de la ingeniería.

La solución propuesta consiste en diseñar y construir un sistema de carro de remolque compatible con el canal hidráulico existente en el laboratorio de hidráulica de la FIMCP. Este sistema permitirá realizar pruebas experimentales de manera segura y precisa, posibilitando la validación de modelos teóricos, mejorando la comprensión de fenómenos físicos y facilitando el diseño y optimización de sistemas hidráulicos.

En términos culturales y sociales, esta solución contribuirá al avance científico en el campo de la hidráulica y sus aplicaciones prácticas. Además, fomentará la colaboración y el intercambio de conocimientos entre investigadores y estudiantes, promoviendo el crecimiento y desarrollo de la comunidad académica.

El proyecto tendrá un impacto positivo desde una perspectiva económica, ya que permitirá la reutilización y adquisición de equipos y tecnología. Esto, a su vez, mejorará la capacidad de investigación y formación del laboratorio.

En términos técnicos, la implementación de un sistema de carro de remolque brindará la capacidad necesaria para realizar mediciones de fuerzas hidrodinámicas en modelos en movimiento. Esto permitirá validar modelos teóricos, mejorar la comprensión de fenómenos físicos y avanzar en el diseño y la optimización de sistemas hidráulicos.

El diseño y construcción de un sistema de carro de remolque en el laboratorio de hidráulica de la FIMCP resolverá la problemática de la falta de capacidad para realizar pruebas experimentales. Esta solución beneficiará aspectos culturales, sociales, económicos y técnicos al promover el avance científico, facilitar el diseño eficiente de sistemas hidráulicos y contribuir al desarrollo de la comunidad académica y las industrias relacionadas

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un carro de remolque para un canal hidráulico aplicando conocimientos de mecánica de sólidos y fluidos que garantice aislamiento de vibraciones y permita el desarrollo de mediciones confiables de fuerzas hidrodinámicas.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Analizar las fuerzas mecánicas e hidrodinámicas que se encuentran implicadas en el sistema del carro de remolque.
2. Realizar el análisis de cálculos teórico y simulado del sistema del carro de remolque para predecir el comportamiento del diseño.
3. Realizar una discriminación tecnológica entre alternativas de diseños de forma uno que nos garantice que las fuerzas de arrastre aplicadas a los instrumentos acoplados al carro de remolque no generen vibraciones excesivas.
4. Realizar un análisis de costos con cotizaciones de materiales, equipos, instrumentos y mano de obra, preferentemente del medio local.

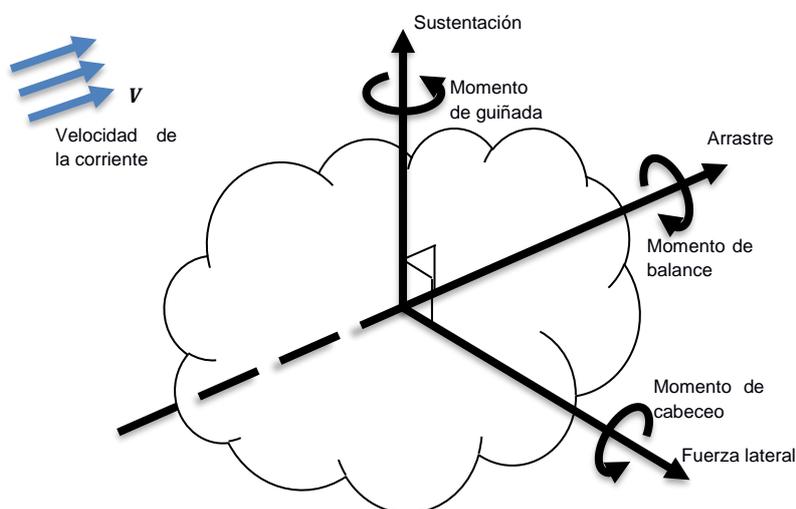
1.4 Marco teórico

1.4.1 Mecánica de fluidos

White (2016) declara que cuando un fluido pasa por un objeto, o un objeto se mueve a través de un fluido estacionario, el fluido ejerce una fuerza sobre el objeto. Podemos dividir la fuerza en componentes: uno que actúa en la misma dirección que el flujo del fluido, que se llama arrastre o resistencia, y otras que actúan perpendicular a la dirección del flujo, que se llaman sustentación y fuerza lateral dependiendo del marco de referencia. Si el fluido es un gas las llamamos fuerzas aerodinámicas, y si es un líquido las llamamos fuerzas hidrodinámicas. Se representan las direcciones de estas fuerzas y de los momentos producidos en la figura 1.

Figura 1

Fuerzas y momentos en cuerpos sumergidos



En la misma obra White sigue explicando que las fuerzas son causadas por dos tipos diferentes de esfuerzos que actúan sobre la superficie de un objeto (2016, pág. 246). Primero tenemos los esfuerzos cortantes de la pared. Estos esfuerzos actúan tangencialmente a la superficie del objeto y son causadas por fuerzas de fricción que surgen debido a la viscosidad de

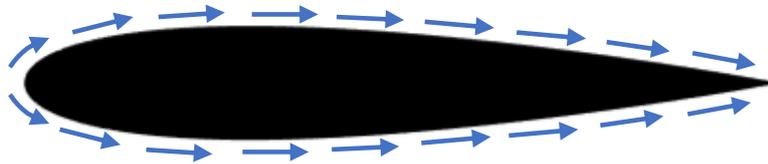
un fluido. Luego tenemos los esfuerzos de presión. Actúan perpendicularmente a la superficie del objeto y son causados por cómo se distribuye la presión alrededor del objeto. Estos esfuerzos se muestran en la figura 2.

Figura 2

Esfuerzos sobre Cuerpo Sumergido en Flujo

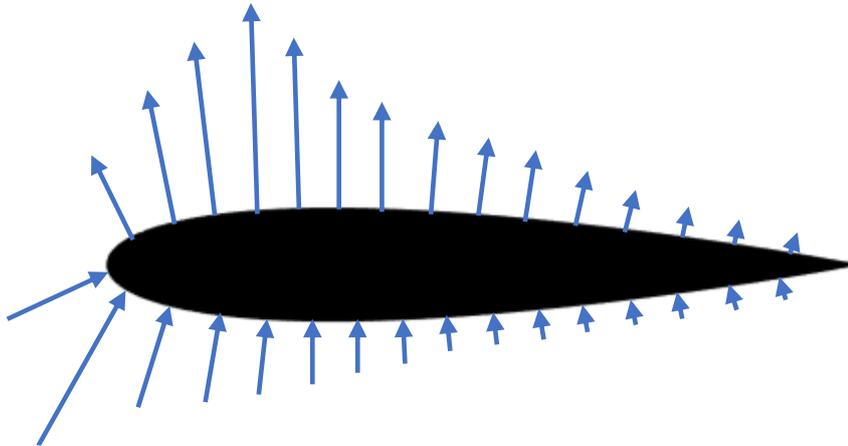
Esfuerzo cortante

(causado por fuerzas de fricción)



Esfuerzo de presión

(causado por distribución de presión)



Çengel (2018) indica que la mayoría de las veces las fuerzas de arrastre son indeseables. Pueden tener un efecto enorme en el consumo de combustible y el rendimiento de los vehículos, por ejemplo. En contraparte, lo cual alguna vez se pensó imposible, el vuelo más pesado que el aire es solo una realidad debido a la sustentación generada por las alas de los aviones. Pero la sustentación es un tema complicado, e incluso hasta el día de hoy los ingenieros tienen largos debates sobre cómo se genera exactamente. Y así,

los ingenieros hacen todo lo posible por diseñar cuerpos que produzcan mucha sustentación minimizando el arrastre.

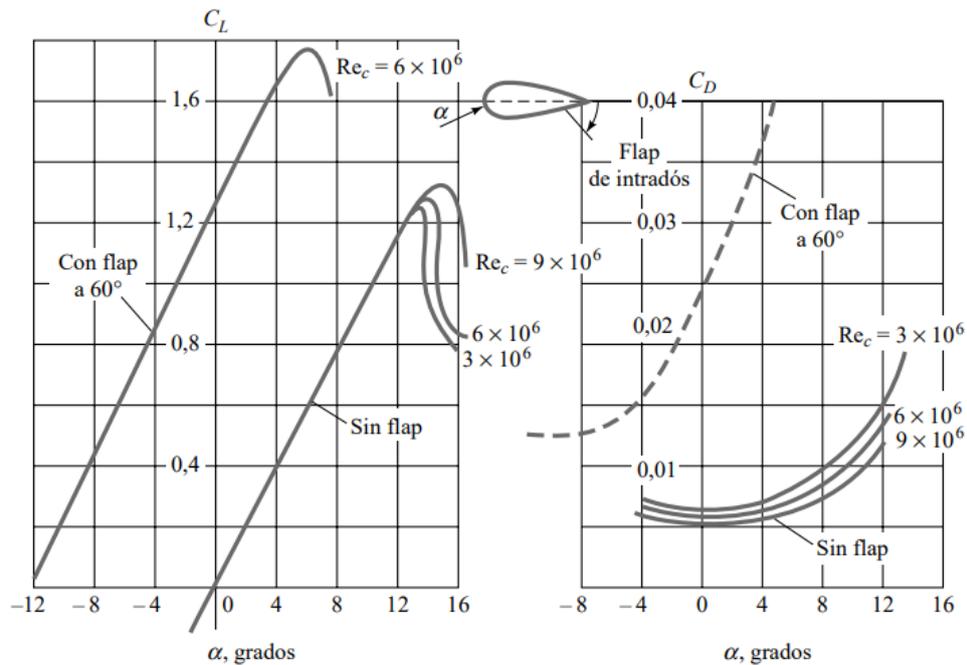
1.4.2 Coeficientes de Arrastre

De acuerdo con White (2016), podemos integrar los esfuerzos de presión y los esfuerzos cortantes de la pared para obtener la fuerza total. El problema es que en la gran mayoría de los casos es prácticamente imposible conocer la distribución detallada de estas tensiones. Por lo tanto, generalmente representamos la fuerza de arrastre total utilizando la ecuación de arrastre. El término C_D es el coeficiente de arrastre. Captura todos los parámetros difíciles de medir, como el efecto de la geometría del objeto o el efecto del régimen de flujo, y puede determinarse experimentalmente, usando un canal hidráulico, por ejemplo, o ejecutando simulaciones numéricas.

Los valores conocidos para varias geometrías se entregan en tablas y gráficas declarando el número de Reynolds y otros parámetros relevantes del caso, tales como la figura 3 y la tabla 1. La gráfica detalla los coeficientes para un ala dado el ángulo de ataque del ala, la orientación de su solapa, y el número de Reynolds del fluido. La tabla lista coeficientes de arrastre para varios cuerpos bidimensionales a un mismo número de Reynolds.

Figura 3

Arrastre y Sustentación en un Ala con una Solapa



Nota: Figura obtenida de (White, 2016)

Tabla 1

Coeficientes de Arrastre para Varias Geometrías

Forma	C_D basado en el área frontal	Forma	C_D basado en el área frontal	Forma	C_D basado en el área frontal
Cilindro cuadrado: →	2.1	Medio cilindro: →	1.2	Placa: →	2.0
→	1.6	→	1.7	Placa plana perpendicular a la pared: →	1.4
Medio tubo: →	1.2	Triángulo equilátero: →	1.6	Hexágono: →	1.0
→	2.3	→	2.0		

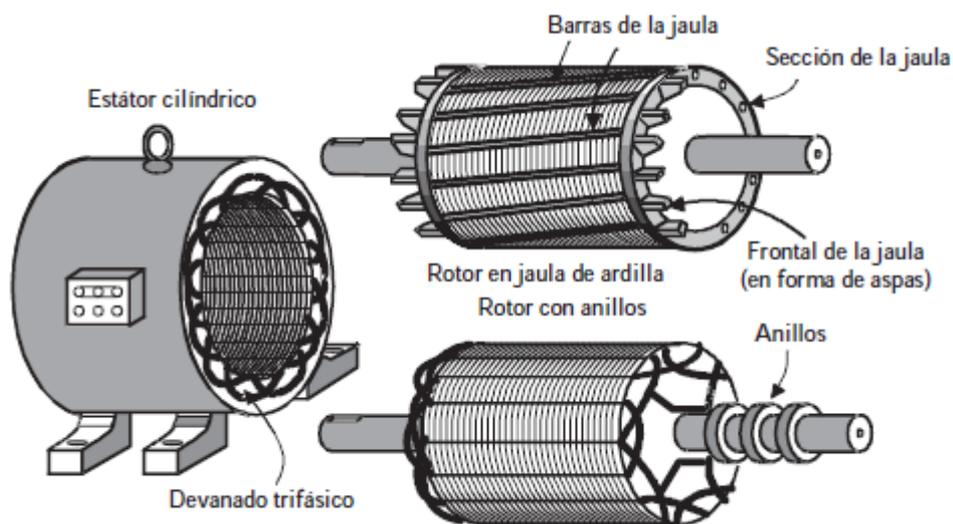
1.4.3 Motores de inducción

Los motores son dispositivos fundamentales en diversas industrias y aplicaciones. Aquellos permiten la conversión de energía eléctrica en energía mecánica, los motores pueden ser clasificados según su corriente utilizada en su funcionamiento, en motores de corriente continua (CC) y motores de corriente alterna (CA), siendo el último el llamado motor de inducción. (Mora, 2008, pág. 96)

El motor de inducción son máquinas de corriente alterna, este tipo de motor consta de un estator donde se encuentran los devanados de alimentación, y un rotor que puede ser tipo jaula de ardilla o devanado como se observa en la figura 4, al suministrar corriente a la máquina, esta interactúa con el estator del motor, generando un campo magnético rotativo, la velocidad de giro de este campo magnético en revoluciones por minuto se expresa en la ecuación 1. (BUN-CA Fundación Red de Energía, 2018)

Figura 4

Tipo de máquinas asíncronas o de inducciones



Nota: Figura obtenida de (Mora, 2008)

$$n_s = \frac{120xf}{p} \quad (1.2)$$

Dónde:

f = frecuencia de alimentación.

p = Número de polos del devanado del estator.

n_s = Velocidad de giro, en revoluciones por minuto.

Fitzgerald (Motores de inducción o asíncrono, 2015) nos indica que el campo magnético induce una fuerza electromagnética que actúa en sentido opuesto a la corriente eléctrica. En otras palabras, el motor necesita una entrada de energía eléctrica para generar energía mecánica.

La potencia del motor a partir del torque se calcula como se muestra en la ecuación 1.3:

$$Potencia = \frac{Torque (Nm o pie - libra) \times RPM}{K} \quad (1.3)$$

Dónde:

Potencia: potencia mecánica del motor expresada en [Hp] o [Kw]

$K = 7.124$ para Torque unidades [Nm] y 5.250 para Torque unidades [ft * lb]

1.4.4 Motor paso a paso

Los motores paso a paso son parte de los motores de inducción y se caracterizan porque generan numerosos pasos por revolución, son compatibles con sistemas electrónicos digitales generando diversas aplicaciones entre las cuales podemos destacar que en sistemas de control digital el motor recibe comandos de bucle abierto en forma de pulsos para hacer girar un eje. Estos motores se emplean en aplicaciones como posicionadores de cabeza de impresión, se puede controlar la posición mediante el conteo de pulsos enviados al motor, sin necesidad de utilizar un instrumento de medición de posición. (Fitzgerald, Kingsley, & Umans, 2015)

1.4.5 Drive de motor

El control de motores paso a paso se realiza a través de un circuito llamado controlador o driver. Este dispositivo recibe las señales de control y suministra la corriente necesaria para activar las bobinas del motor en la secuencia correcta. Los dos tipos más comunes de drivers son los bipolares y los unipolares. En los drivers bipolares, se controla la corriente mediante transistores bipolares, los cuales se activan y desactivan según la secuencia de pulsos requerida. Esto permite que la corriente fluya en la dirección adecuada y genere el campo magnético necesario para el movimiento del rotor. Los drivers pueden incluir diodos de protección, resistencias limitadoras de corriente y circuitos de control lógico para recibir las señales de entrada y generar las secuencias de pulsos requeridas. (BUN-CA Fundación Red de Energía, 2018)

1.4.6 Eficiencia

La eficiencia de un motor es un concepto fundamental para comprender el consumo de energía y el costo de operación de un motor eléctrico. Se define como la relación entre la potencia mecánica de salida y la potencia eléctrica de entrada como se indica en la ecuación 1.4 y 1.5. En otras palabras, la eficiencia de un motor eléctrico representa qué tan efectivamente utiliza la energía eléctrica suministrada para generar potencia mecánica útil y puede expresarse como

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ Mecánica\ de\ salida}{Potencia\ Eléctrica\ que\ entra} \quad (1.4)$$

$$Eficiencia = \frac{Potencia\ Eléctrica\ que\ entra - Pérdidas}{Potencia\ Eléctrica\ que\ entra} \quad (1.5)$$

Cuando un motor opera con alta eficiencia, significa que está maximizando la conversión de energía eléctrica en energía mecánica sin desperdiciar energía en forma de calor u otras

pérdidas. Idealmente, en un escenario perfecto sin pérdidas, la eficiencia alcanzaría el valor de 1, lo que indica que toda la energía eléctrica de entrada se convertiría en potencia mecánica de salida. Sin embargo, en la práctica, siempre existen pérdidas debido a diversos factores como la resistencia eléctrica, la fricción y las corrientes parásitas. (BUN-CA Fundación Red de Energía, 2018)

1.4.7 Instrumentos de medición Galga extensiométrica

La galga extensiométrica es un tipo de sensor utilizado para medir deformaciones mecánicas en materiales. Funciona adhiriéndose a la superficie del material y midiendo la deformación promedio debajo de esta. La deformación mecánica en el material provoca cambios en la resistencia eléctrica de la galga. Esta variación puede ser causada por cambios en la longitud, área de la sección transversal o resistividad del sensor. La magnitud que representa la deformación mecánica se designa como ε , es adimensional y expresa como se relaciona la variación de la longitud con la longitud inicial como se expresa en la ecuación 1.6. (Rodríguez Rodríguez, Hernández González, López Llanusa, & Ramírez Beltrán, 2016).

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_o}{L_o} = \frac{\Delta l}{L_o} \quad (1.6)$$

Dónde:

$\varepsilon =$ magnitud de deformación

$L_o =$ Longitud inicial

$L_f =$ Longitud final

$\Delta l =$ variación de la longitud

La galga extensiométrica se relaciona estrechamente con la ley de Hooke, puesto que esta establece una relación lineal entre las fuerzas externas aplicadas a un material y la deformación resultante. La ley de Hooke es fundamental para comprender cómo la deformación mecánica se

traduce en cambios de resistencia en la galga extensiométrica. La expresión teórica de este sensor se representa en la ecuación 1.7.

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R_0} \quad (1.7)$$

Dónde:

$\varepsilon =$ *magnitud de deformación*

$K =$ *factor de galga*

$\Delta R =$ *variación de relativa de la resistencia del sensor [Ohm].*

$R_0 =$ *Resistencia del sensor suministrado por el fabricante [Ohm].*

Debido a su precisión y versatilidad, las galgas extensiométricas se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como pruebas de materiales, control de calidad, monitoreo estructural, análisis de tensiones y deformaciones en componentes mecánicos, entre otros. Su capacidad para medir y cuantificar las deformaciones las convierte en una herramienta invaluable en numerosos campos de la ingeniería y la ciencia.

1.4.8 Celda de carga

De acuerdo con Raghavendra (2013), una celda de carga es un dispositivo que emplea uno o varios elementos mecánicos elásticos como transductores de fuerza a deformación. La aplicación de una fuerza en esta combinación de elementos genera una deflexión potencialmente lineal en la mayoría de los casos. Un transductor secundario convierte esta deflexión en una señal eléctrica. El transductor secundario más popular es la galga extensiométrica. Una galga extensiométrica necesita estar adherida a un elemento mecánico. Cuando el elemento mecánico se deforma, es estirado, comprimido, etc., la galga cambia sus dimensiones en la misma proporción que el punto donde está adherida, y como resultado cambia su resistencia eléctrica. Este cambio de resistencia permite medir la fuerza que causa la deformación.

1.4.9 Dinamómetro

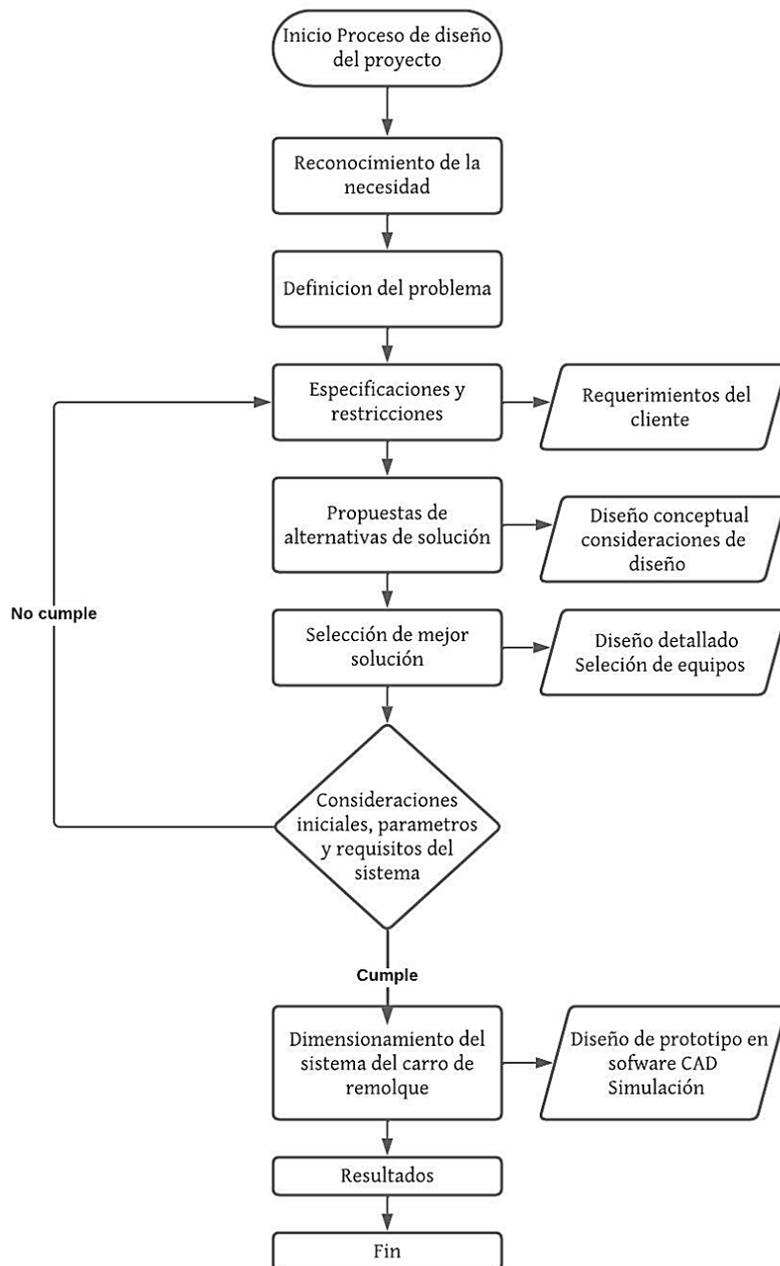
Estos dispositivos son esenciales para determinar con precisión la tensión y fuerza aplicada a diferentes objetos y materiales y se basan en el principio de la elasticidad de un resorte. Su funcionamiento se fundamenta en la relación directa entre la fuerza ejercida sobre el resorte y su elongación. Es decir, cuando se aplica una fuerza a un dinamómetro mecánico, el resorte se estira y la fuerza ejercida es proporcional a la constante de elasticidad del resorte multiplicada por la elongación experimentada. Esta relación lineal entre la fuerza aplicada y la deformación del resorte permite obtener una medida precisa de la fuerza ejercida. (Raghavendra & Krishnamurthy, 2013)

Raghavendra también nos indica que los dinamómetros desempeñan un papel importante en la evaluación de la deformación de materiales sometidos a esfuerzos. permiten determinar cuánto se deforman los materiales cuando se les aplica una carga o tensión. Esta aplicación es esencial en muchas áreas, como la ingeniería civil, la fabricación de productos y la investigación de materiales, donde se requiere conocer las propiedades mecánicas de los materiales y su comportamiento frente a distintas fuerzas.

Capítulo 2

2.1 Metodología.

Para esta parte del proyecto se elaboró un análisis de los requerimientos del diseño y se procedió a realizar cálculos teóricos para seleccionar el motor adecuado del sistema que cumpla con la potencia necesaria, se desarrollaron un análisis de las fuerzas involucradas en el sistema de carro de remolque y con base a estos análisis se generaron tres opciones de diseño del carro de remolque en la figura 5 se detalla el proceso que se realizó.

Figura 5*Diagrama de flujo*

2.2 Requerimientos de diseño

El proyecto se basó en los requerimientos propuestos por el cliente, los cuales fueron cuidadosamente considerados en el proceso de diseño. Estos requerimientos incluyeron:

- Resistencia a los esfuerzos de arrastre durante el arranque y uso del equipo: El cliente solicitó que el diseño del carro de remolque fuera capaz de resistir eficientemente las fuerzas de arrastre generadas durante el arranque y el uso del equipo en el canal hidráulico.
- Cumplimiento del presupuesto establecido por el cliente: El cliente estableció un presupuesto para el proyecto y solicitó que el diseño del carro de remolque se ajustara a dicho presupuesto. Se tuvo en cuenta esta limitación económica durante todo el proceso de diseño además de que los equipos y partes necesarias para el montaje se compren en el medio local.
- Adecuación a las dimensiones del canal hidráulico del laboratorio: El cliente requirió que el diseño se ajustara a las dimensiones del canal hidráulico existente en el laboratorio. Se tuvo en cuenta el espacio disponible y se diseñó el carro de remolque considerando estas restricciones espaciales.
- Potencia suficiente del motor para mover el carro de remolque: El cliente solicitó que la potencia disponible del motor fuera la necesaria para mover el carro de remolque de manera eficiente en el canal hidráulico. Se realizó un análisis cuidadoso para seleccionar un motor que cumpliera con este requerimiento.

Estos requerimientos fueron propuestos por el cliente y se convirtieron en elementos clave para la elaboración del diseño del carro de remolque, garantizando que el resultado final cumpliera con las expectativas y necesidades del cliente.

2.3 Criterios de diseño

A continuación, se presenta un listado de los criterios de diseño considerados y una breve explicación de por qué es importante tenerlos en cuenta para el diseño:

1. **Estabilidad estructural:** La estabilidad estructural del carro de remolque, se refiere a que el diseño pueda resistir las fuerzas y cargas aplicadas durante su funcionamiento. Un diseño robusto y bien estructurado proporcionará la base necesaria para mantener la estabilidad del sistema en todo momento.
2. **Precisión:** La precisión en el movimiento del carro de remolque es crucial para lograr una velocidad constante del cuerpo en estudio y obtener mediciones precisas. Un diseño que minimice las vibraciones, el deslizamiento y otros factores que puedan afectar la precisión del movimiento permitirá resultados más confiables y consistentes.
3. **Presupuesto:** el diseño se debe ajustarse al presupuesto disponible por el cliente. Es importante buscar soluciones eficientes y rentables sin comprometer la calidad y funcionalidad del sistema.
4. **instalación:** Considerar la facilidad de instalación del diseño es crucial para agilizar los procesos de montaje y desmontaje. Un diseño que permita una instalación sencilla y rápida garantiza una mayor eficiencia en la realización de experimentos y reduce el tiempo de inactividad del equipo.YY
5. **Operatividad:** La operatividad se refiere a la facilidad de uso del carro de remolque. Un diseño que sea intuitivo y de fácil manejo permite que el personal involucrado en el experimento pueda utilizar el sistema de manera eficiente y minimiza la posibilidad de errores operativos. Además, se debe considerar la accesibilidad para realizar tareas de mantenimiento y reparación de forma eficaz.

Estos criterios de diseño son fundamentales para garantizar un carro de remolque eficiente y confiable en el contexto del experimento, proporcionando estabilidad estructural, precisión en el movimiento, una solución económica, facilidad de instalación y una operatividad óptima.

2.3.1 Ponderación de criterio

En la tabla 2 se estableció el rango de 0-2 que ayuda a la comparación por pares para el sistema para obtener el peso de cada uno de los criterios de diseño. En la tabla 3 se muestra la ponderación de cada criterio.

Tabla 2

Rango y criterios para la comparación de pares

Rango	0-2
Criterio	0: Menos importante 1: Medianamente importante 2: Mas importante

Tabla 3*Comparación por pares para el sistema de carro de remolque*

Criterios de selección	Estabilidad	Precisión	Presupuesto	Instalación	Operatividad	Calificación	Peso
Estabilidad	-----	1	0	1	1	3	0.16
Precisión	1	-----	1	2	1	5	0.26
Presupuesto	1	0	-----	2	1	4	0.21
Instalación	0	0	1	-----	1	2	0.11
Operatividad	2	1	1	1	-----	5	0.26
Total						19	1

Según la evaluación de los criterios y su ponderación que se muestran en la tabla 3, los resultados indican que los criterios de mayor peso para el diseño del carro de remolque son la precisión y la operatividad, ambos con un peso del 0.26 del total. Estos criterios resaltan la importancia de obtener mediciones precisas y garantizar un sistema de fácil uso y buena adquisición de datos. El criterio de presupuesto también es significativo, con un peso del 0.21, mientras que la estabilidad tiene un peso del 0.16. El criterio de instalación, con un peso del 0.11, es el de menor peso relativo. Estos resultados guiarán el diseño hacia la precisión, operatividad eficiente y cumplimiento del presupuesto asignado.

2.4 Alternativas de diseño

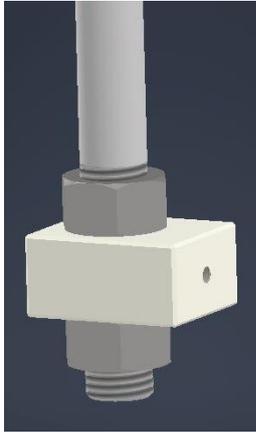
En este proyecto de diseño se exploraron diferentes alternativas con el objetivo de encontrar la solución más eficiente y funcional para el diseño del carro de remolque.

Método de sujeción:

- Alternativa A: Acople mediante una varilla con rosca y pernos para sostener el modelo como se muestra en la figura 6.

Figura 6

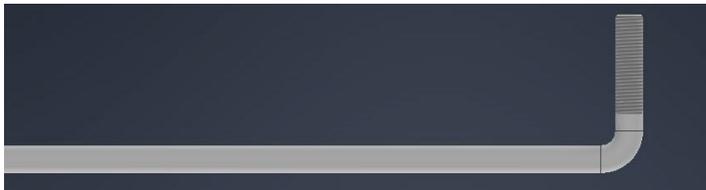
Método de sujeción de varilla roscada



- Alternativa B: Acople mediante una varilla con rosca doblada para sostener el modelo como se muestra en la figura 7.

Figura 7

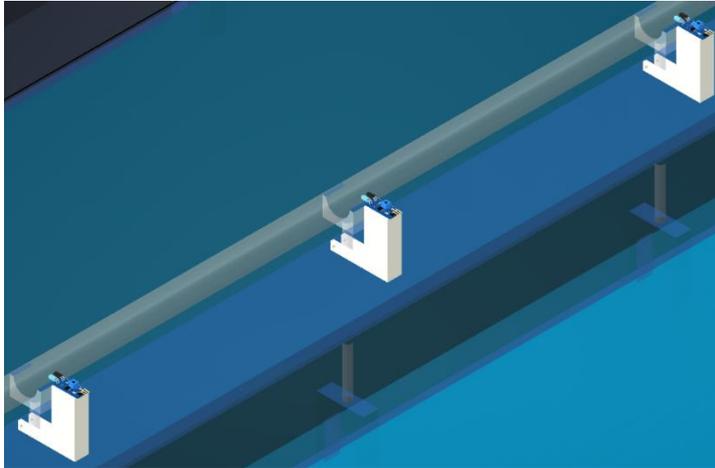
Método de sujeción mediante varilla roscada doblada

**Medición de velocidad:**

- Alternativa A: Uso de 3 sensores ópticos separados 40 cm entre ellos, se muestra el ejemplo en la figura 8.

Figura 8

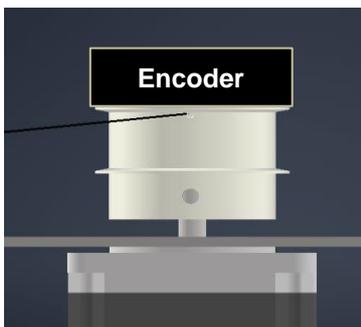
Medición de velocidad por sensores ópticos



- Alternativa B: Uso de un tacómetro o encoder, como indica la figura 9, conectado al eje del motor para medir la velocidad de rotación.

Figura 9

Medición de velocidad usando tacómetro

**Medición de fuerza**

- Alternativa A: Se utilizará galgas extensiométricas acopladas a la varilla como se observa en la figura 10, se conecta el modelo para medir la deformación y a partir de la ley de hooke calcular los esfuerzos y fuerzas presentes.

Figura 10

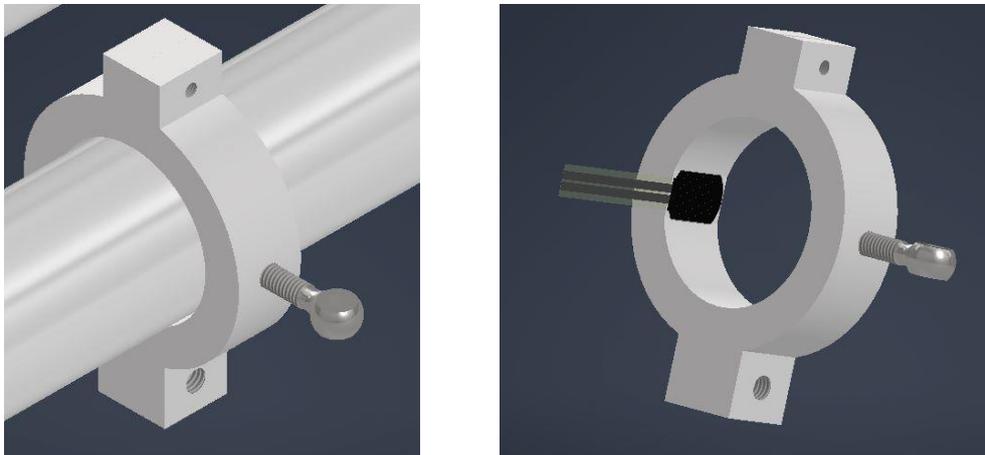
Medición de fuerza utilizando galgas extensiométricas



- Alternativa B: Como se muestra en la figura 11, se utilizará un sensor de fuerza interpuesto entre el carrito y la cuerda que mida la fuerza de tracción.

Figura 11

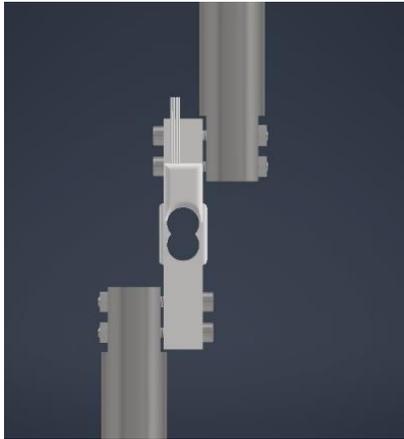
Medición de fuerza utilizando sensor de fuerza



- Alternativa C: Como se muestra en la figura 12, se utilizará celdas de carga en medio de la varilla roscada para el cálculo de la fuerza de sustentación.

Figura 12

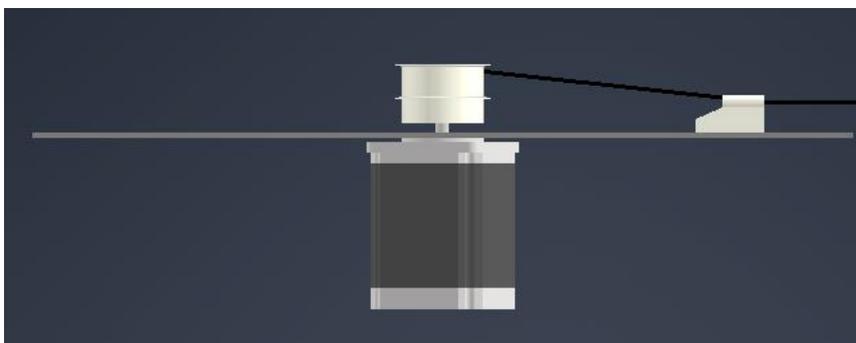
Método de fuerza utilizando celdas de carga

**Método de tracción:**

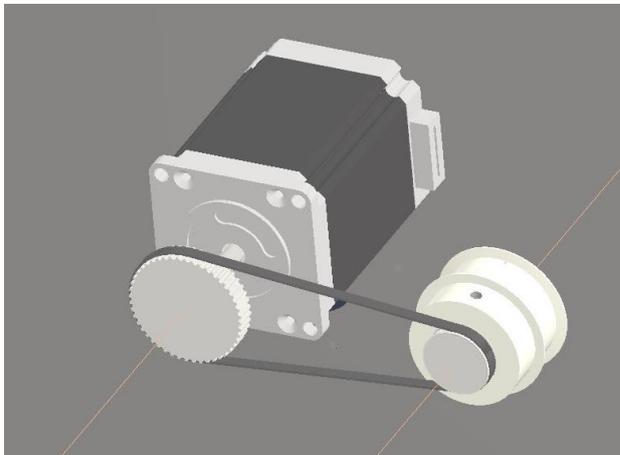
- Alternativa A: El método se muestra en la figura 12, el motor estará ubicado debajo de una placa de metal fija acoplada a una pieza circular tipo polea, para el arrastre de la cuerda en conjunto con el carro de remolque.

Figura 13

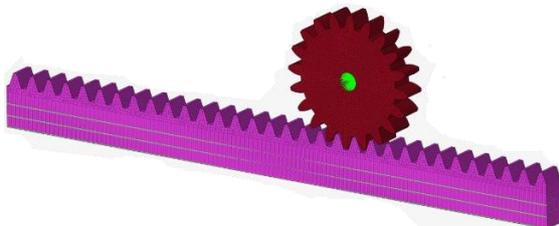
Método de tracción ubicación del motor vertical



- Alternativa B: El motor estará ubicado encima de una placa de metal fija, acoplado a una polea para el arrastre de la cuerda en conjunto con el carro de remolque como se muestra en la figura 13.

Figura 14*Método de tracción utilizando poleas*

- Alternativa C: El motor estará ubicado encima de una placa de metal fija acoplado a un engrane que permitirá el movimiento del carro de remolque

Figura 15*Método de tracción utilizando engranaje*

Cada alternativa presenta diferentes enfoques en cuanto al método de sujeción, adquisición de datos y método de tracción, ofreciendo distintas opciones para la medición de las variables requeridas en el proyecto.

2.4.1 Selección de alternativas

En el contexto de nuestro proyecto de diseño de un carro de remolque, hemos tomado la decisión estratégica de incorporar matrices de decisiones como una herramienta en nuestro proceso de selección de la alternativa de diseño óptima. Esta elección se basa en la necesidad de abordar de manera sistemática y objetiva los diversos aspectos críticos de nuestro proyecto,

tales como el método de sujeción, el método de tracción y la adquisición de datos de velocidad y fuerza. Para lograr una evaluación completa y precisa de estas opciones, hemos implementado un rango de ponderación que asigna valores relativos a cada criterio en la Tabla 4. Este rango de ponderación desempeña un papel fundamental al proporcionar un marco claro y cuantitativo para comparar y contrastar las alternativas, permitiéndonos así seleccionar la mejor alternativa.

Tabla 4

Rango de criterios para la matriz de decisión

Rango	1-3
Criterio	1: Menos importante 2: Medianamente importante 3: Mas importante

Método de sujeción

Tabla 5

Matriz de decisión para el método de sujeción.

Criterio	Peso	Alternativas del diseño de carro de remolque			
		A		B	
		Calificación	Total	Calificación	Total
Estabilidad	0.16	3	0.48	1	0.16
Precisión	0.26	2	0.52	1	0.26
Presupuesto	0.21	3	0.63	2	0.42
Instalación	0.11	2	0.22	3	0.33
Operatividad	0.26	1	0.26	1	0.26
Total	1		2.11		1.43

La matriz de decisión se observa en la tabla 5 para el método de sujeción donde se seleccionó la mejor alternativa la A.

Medición de velocidad

Tabla 6

Matriz de decisión para el método de medición de velocidad.

Criterio	Peso	Alternativas del diseño de carro de remolque			
		A		B	
		Calificación	Total	Calificación	Total
Estabilidad	0.16	1	0.16	1	0.16
Precisión	0.26	3	0.78	1	0.26
Presupuesto	0.21	2	0.42	3	0.63
Instalación	0.11	2	0.22	3	0.33
Operatividad	0.26	3	0.78	1	0.78
Total	1		2.36		2.16

La matriz de decisión se observa en la tabla 6 para el método de medición de velocidad donde se seleccionó la mejor alternativa la A.

Medición de fuerza

Tabla 7

Matriz de decisión para el método de medición de fuerza.

Criterio	Peso	Alternativas del diseño de carro de remolque					
		A		B		C	
		Calificación	Total	Calificación	Total	Calificación	Total
Estabilidad	0.16	2	0.32	1	0.16	2	0.32
Precisión	0.26	1	0.26	2	0.52	3	0.78
Presupuesto	0.21	2	0.42	2	0.42	3	0.63
Instalación	0.11	2	0.22	1	0.11	1	0.11
Operatividad	0.26	2	0.52	2	0.52	3	0.78
Total	1		1.74		1.73		2.62

La matriz de decisión se observa en la tabla 7 para el método de medición de fuerza donde se seleccionó la mejor alternativa la C .

Método de tracción.

Tabla 8

Matriz de decisión para el método de tracción.

Criterio	Peso	Alternativas del diseño de carro de remolque					
		A		B		C	
		Calificación	Total	Calificación	Total	Calificación	Total
Estabilidad	0.16	3	0.48	1	0.16	2	0.32
Precisión	0.26	2	0.52	2	0.52	2	0.52
Presupuesto	0.21	3	0.63	1	0.21	1	0.21
Instalación	0.11	2	0.22	2	0.22	1	0.11
Operatividad	0.26	2	0.52	2	0.52	1	0.26
Total	1		2.37		1.63		1.42

La matriz de decisión se observa en la tabla 8 para el método de tracción donde se seleccionó la mejor alternativa la A.

2.4.2 Selección del Diseño final.

Después de evaluar cuidadosamente las diferentes alternativas de diseño, se ha seleccionado la siguiente opción para el proyecto del carro de remolque. Se utilizará un método de sujeción que consiste en un acople mediante una varilla con rosca y pernos para sostener el modelo, lo cual proporciona una sujeción segura y estable. Para la medición de velocidad, se emplearán 3 sensores ópticos separados a una distancia de 40 cm entre ellos, lo que permitirá obtener mediciones precisas. Además, se utilizarán celdas de cargas acopladas a la varilla donde se conecta el modelo para medir las fuerzas presentes. El motor estará ubicado debajo de una placa de metal fija acoplada a una pieza circular tipo polea, lo que garantizará un

arrastre eficiente de la cuerda en conjunto con el carro de remolque. Esta selección se basó en la capacidad de esta alternativa para cumplir con los requisitos del proyecto.

2.4.3 Diseño de forma del sistema y sus componentes

A partir de la matriz de decisión se obtuvo la alternativa de diseño final y se concluyó que, para el sistema de medición, se deben considerar los siguientes equipos y objetos:

- Canal hidráulico
- Carro
- Sensor de fuerza (Celda de carga)
- Sensor óptico
- Motor
- Carrete o rollo
- Cuerda que servirá como unión entre el motor y el carro remolque.

Para elaborar el diseño, se procedió a realizar un bosquejo de los objetos necesarios utilizando el software Inventor, con el objetivo de ensamblarlos de manera precisa. Una vez completado el diseño en 3D véase la figura 18 como referencia del montaje, se llevó a cabo el montaje teniendo en cuenta los siguientes puntos. En primer lugar, se decidió contar con un carro en el túnel hidráulico y una plataforma de metal fija que funcionó como bancada para el motor, y el carro de remolque móvil que se desplazaba según la velocidad proporcionada por el motor de paso, en los carriles del motor se ubicaron 3 sensores ópticos. El carro móvil se utilizó para acoplar una varilla y a esta el modelo a ser estudiado. Estos pasos fueron seguidos cuidadosamente para garantizar un diseño preciso y funcional que cumpliera con los objetivos del proyecto.

Figura 16

Diseño de forma del sistema carro remolque.

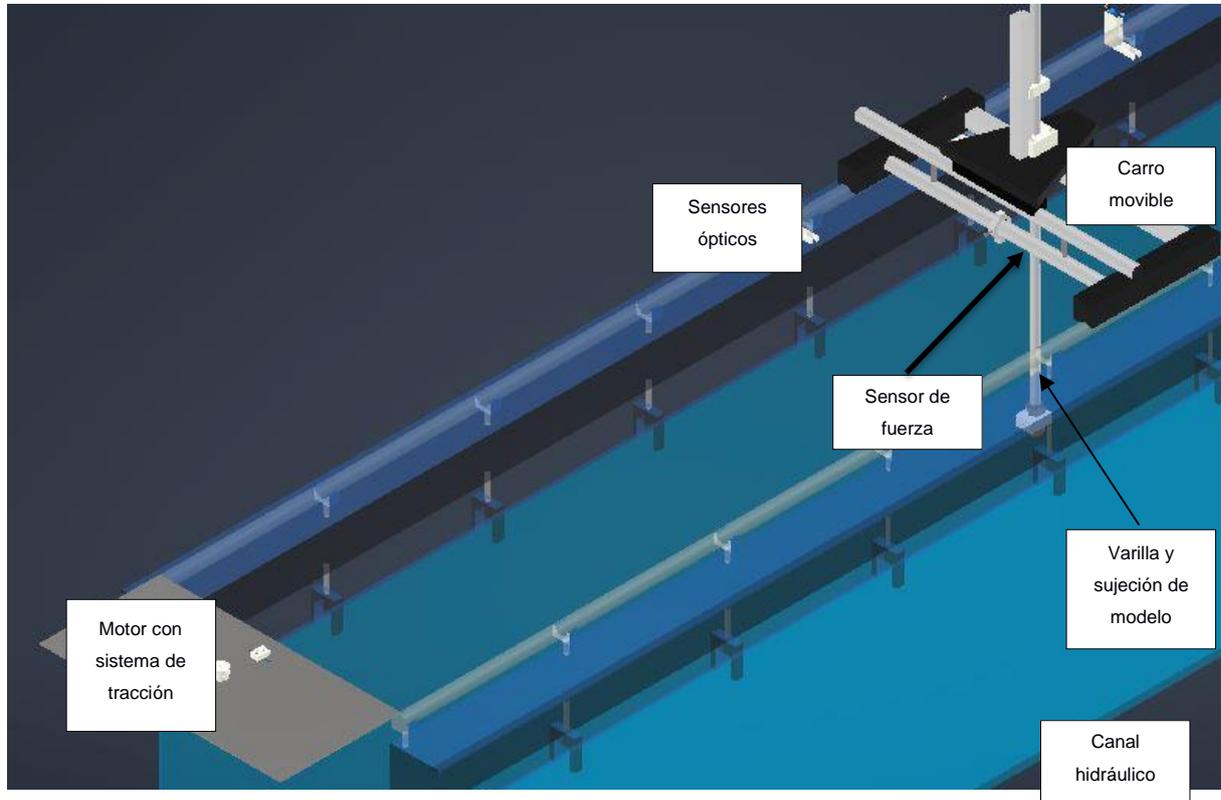
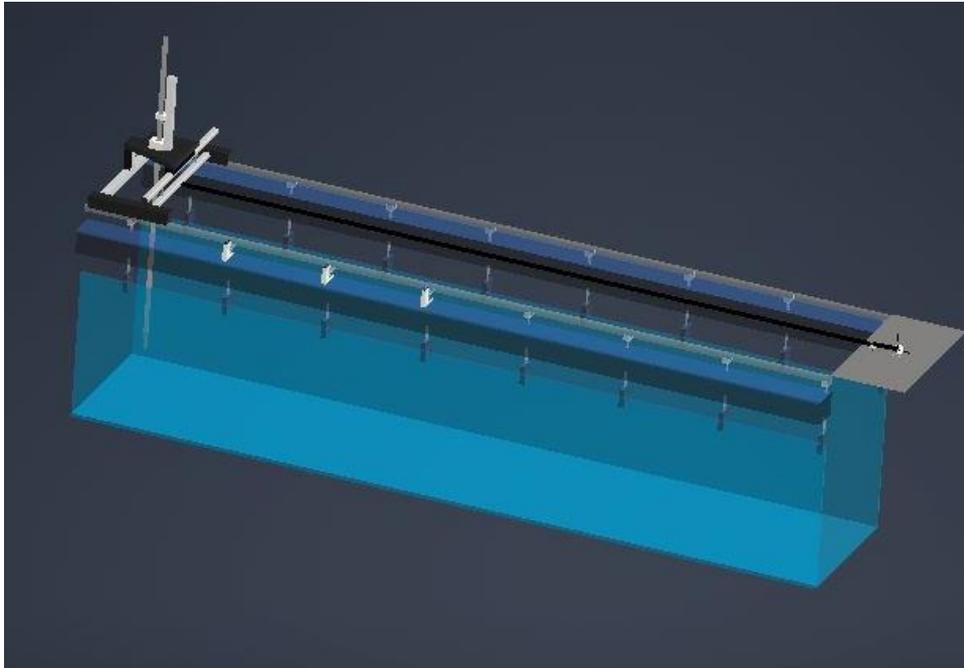


Figura 17

Vista lateral del diseño de forma



2.5 Selección de materiales

Para seleccionar los materiales se han considerado varios criterios para garantizar que los materiales elegidos cumplan con los requisitos del proyecto. Aquí están los criterios más influyentes:

- **Propiedades mecánicas:** las propiedades mecánicas específicas requeridas para las piezas, como resistencia, dureza, tenacidad, elasticidad y durabilidad deben satisfacer la capacidad de carga, aunque esta sea mínima.
- **Compatibilidad química:** las piezas estarán expuestas a un ambiente con agua. Si bien esta estará confinada al canal hidráulico, no se puede eliminar la presencia de salpicaduras y humedad. Los materiales deben ser elegidos considerando resistencia al agua y a la corrosión.

- Estabilidad dimensional: se tuvo en cuenta los requisitos de estabilidad dimensional, como la fluencia y la precisión dimensional a lo largo del tiempo. Algunos materiales pueden ser más propensos a cambios dimensionales bajo ciertas condiciones. La deformación de la varilla se mide con precisión y el modelo debe mantener una orientación con bajo margen de error. La deformación de las otras piezas no debe afectar estos resultados.
- Costo: se comparó el costo de los materiales, incluida su disponibilidad, los costos de producción y cualquier requisito adicional de procesamiento o acabado.
- Proceso de fabricación: algunos materiales pueden ser más adecuados para técnicas de fabricación específicas como el mecanizado.
- Cumplimiento normativo: se aseguró de que los materiales seleccionados cumplan con los estándares, regulaciones y requisitos de seguridad relevantes de la industria.

El material de algunas piezas junto con un percibido del razonamiento de su elección se lista en la tabla 9.

Tabla 9*Materiales de Piezas Principales*

Pieza	Material	Observaciones
Placa plataforma de motor	Acero inoxidable 201	Debido a su alta inercia tendría un efecto atenuante de las vibraciones esperadas en comparación con otros materiales.
Piezas de soporte: <ul style="list-style-type: none"> • Soportes de varilla • Plataformas de sensores • Rollo de cuerda • Guía de cuerda • Rollo de cuerda • Sujeción de modelo 	Poliamida	Se seleccionó a favor del teflón por ser más rígido. El teflón, siendo más suave, podría afectar las mediciones. La poliamida es además más económica de mecanizar en el mercado que el teflón.
Varilla	Acero inoxidable 201	Se requirió que sea inoxidable dado que estaría insertada en el agua. El acero tendría una deformación mínima, lo que mantendría el modelo en su lugar permitiendo aún medir su deformación con la galga.
Cuerda	Principalmente nylon	Las cuerdas de cañas de pescar cumplen con los requisitos de tener dimensión pequeña y no ser afectadas por el agua, además de soportar las cargas estimadas. Están generalmente compuestas de nylon y otros compuestos que le dan ciertas propiedades.
Modelos	Plástico ABS	Se harán usando impresión 3D debido a la facilidad de producir la diversidad de piezas que se desearán estudiar con el proyecto.

2.6 Selección del motor

Se llevó a cabo un proceso de dimensionamiento y selección del motor adecuado. El objetivo principal era proporcionar una velocidad constante al cuerpo en estudio y garantizar condiciones óptimas para la realización del experimento. Para lograr esto, se consideraron distintos factores, como el diseño de los cuerpos, el análisis de fuerzas externas y la determinación de la velocidad máxima requerida. A continuación, se presenta un listado del procedimiento utilizado para dimensionar y seleccionar el motor.

Procedimiento:

1. Diseño de los cuerpos:

- Se seleccionaron dos formas específicas, un cono de 60° de inclinación y un medio tubo.
- Se escogieron estos cuerpos ya que son poco aerodinámicos y tienen un coeficiente de arrastre alto, lo que nos permite probar el diseño en las condiciones más desfavorables y obtener una mejor medición de la fuerza de arrastre.
- Los cuerpos fueron modelados utilizando Autodesk Inventor Professional.

2. Análisis de fuerzas externas:

- Se realizó un análisis detallado de las fuerzas externas que actuaban sobre el sistema.
- Se determinó el par torsor necesario que el motor debía proporcionar para contrarrestar las fuerzas externas como se muestra en la figura 18.

3. Velocidad máxima requerida:

- Se realizaron mediciones del flujo en el túnel hidráulico.
- Se obtuvieron velocidades promedio a partir de las mediciones.

- Se determinó la velocidad máxima que el motor debía alcanzar para garantizar una velocidad constante al cuerpo.
4. Dimensionamiento y selección del motor:
- Con base en el par torsor necesario de la figura 18 y la velocidad máxima requerida utilizando la ecuación 2.1, se logró obtener la potencia necesaria del sistema con un factor de diseño de 2, se seleccionó un motor que cumplía con los requisitos.

$$P = FV \quad (2.1)$$

Donde:

P: Potencia del motor requerida [hp]

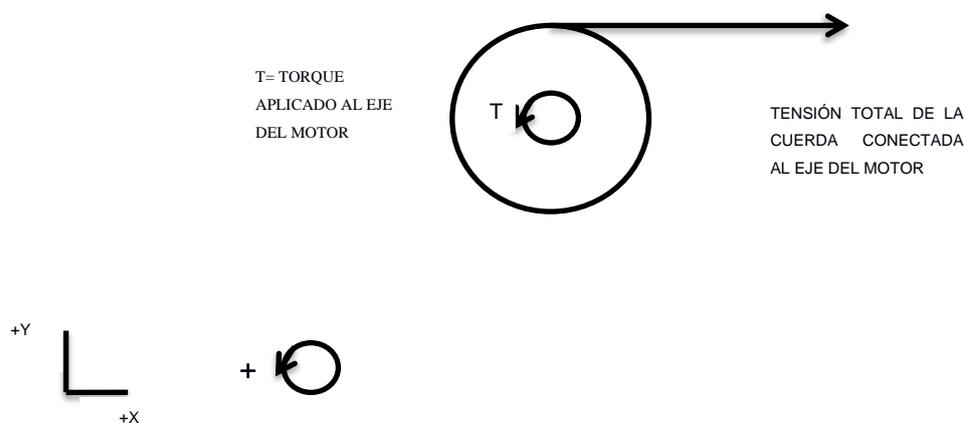
F: Fuerza aplicada a la cuerda [N]

V: velocidad a la que se mueve el sistema del carro remolque $\left[\frac{m}{s}\right]$

- Se tuvieron en cuenta las especificaciones técnicas del motor, como potencia, torque y eficiencia.

Figura 18

Diagrama del torque aplicado al eje del motor.



Se realizó este análisis para todos los cuerpos diseñados y se estimó el torque mínimo necesario que debía ejercer el motor. Con base en esta estimación, se buscó un motor que

ofreciera un par torsor mayor al estimado y se procedió a considerar todas las especificaciones necesarias.

2.7 Flujo volumétrico

Para determinar la velocidad máxima requerida por el motor, basándose en el flujo volumétrico del canal hidráulico, se utilizó la ecuación 2.2

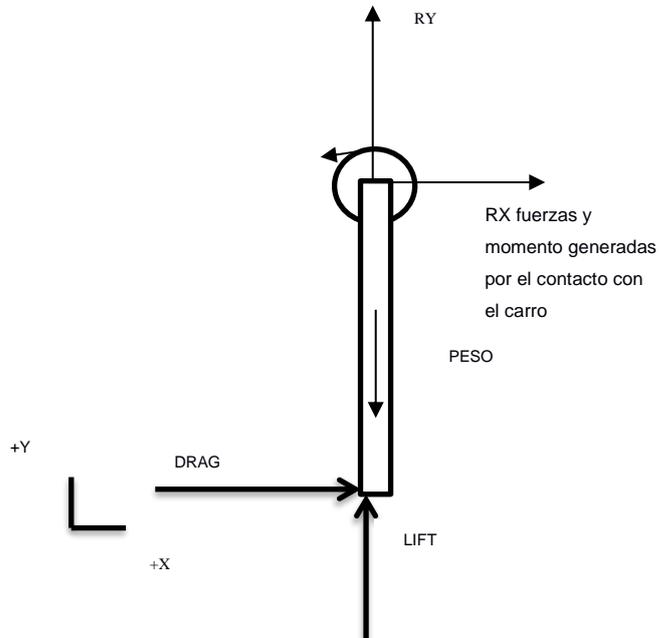
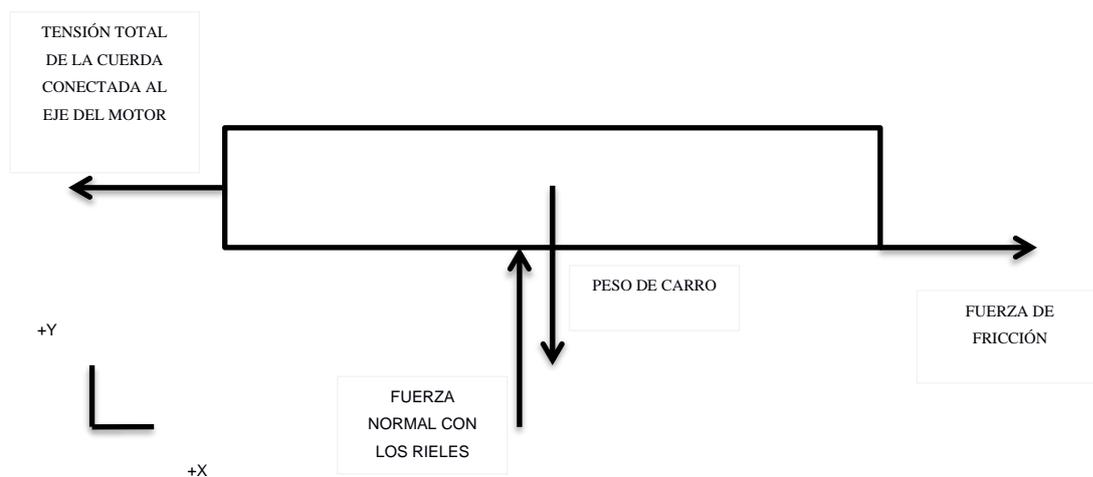
$$Q = AV \quad (2.2)$$

Donde $Q = 80 \left[\frac{m^3}{h} \right]$ es el caudal del canal, $V \left[\frac{m}{s} \right]$ representa la velocidad del flujo y $A[m^2]$ el área transversal del canal (0.3×0.25) m se tabularon las velocidades ($V \leq 0.3 \frac{m}{s}$).

Se realizaron pruebas preliminares para validar el dimensionamiento del motor seleccionado y se analiza que el motor proporcionara las velocidades deseadas al cuerpo en movimiento.

2.8 Análisis de fuerzas involucradas en el sistema

Se llevó a cabo un proceso de análisis de fuerzas del sistema para investigar el comportamiento de cuerpos en movimiento a velocidad constante en un fluido estacionario. El objetivo principal era proporcionar una velocidad constante al cuerpo en estudio y asegurar condiciones óptimas para la realización del experimento. Para lograr esto, se consideraron diferentes aspectos, como el diagrama de cuerpo libre, el torque aplicado al eje del motor y la determinación de la velocidad máxima requerida.

Figura 19*Diagrama de cuerpo libre de la varilla***Figura 20***Diagrama de cuerpo libre del carro de remolque.*

- Por medio de Análisis de Fuerzas se realizó el cálculo de la fuerza de sustentación

LIFT

- Debido a que se espera a que el sistema se mueva a velocidad constante entonces se asumió que la sumatoria de fuerzas en el *eje x* y *y* es 0 el cuerpo se encuentra en equilibrio como se plantea en la ecuación 2.3.
- En el eje *x* solo se encuentra presentes la fuerza de arrastre que se calcula con la ecuación 2.1 y esta es igual a la reacción de la varilla que se genera con el contacto con el carro de remolque.

$$\sum F_x = 0$$

$$R_x = DRAG = Dm [N] \quad (2.3)$$

- En el eje *y* se encuentran presentes la fuerza de reacción de la varilla con el carro *R_y* que es igual al peso menos la fuerza de sustentación (LIFT), como se observa en la ecuación 2.4.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_y = mg - LIFT [N] \quad (2.4)$$

2.8.1 Cálculo de fuerza de arrastre (DRAG)

Se elabora el diagrama de cuerpo libre en la varilla indicando todas las fuerzas que se encuentran involucradas en la varilla como se observa en la figura 15.

A partir de la ecuación 2.5 y 2.6 se despeja para encontrar la fuerza de arrastre en el modelo y en la varilla (DRAG) *D*[N].

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_p} \quad (2.5)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V^2 A_p} \quad (2.6)$$

Dónde:

C_D = Coeficiente de arrastre

D = Arrastre [N]

C_L = Coeficiente de sustentación

L = Sustentación [N]

ρ = Densidad del fluido [kg/m^3]

V = Velocidad de flujo libre del fluido [m/s]

A_p = Área representativa del cuerpo sumergido [m^2]

El seleccionó el coeficiente C_{Dm} se seleccionó desde la tabla 1 para el modelo y para la varilla y de la figura 3 utilizando el dato del número de Reynolds para los diferentes modelos diseñados el cual se calcula con la ecuación 2.7.

$$Re = \frac{\rho D v}{\mu} \quad (2.7)$$

Donde:

ρ : Densidad del flujo $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

D : Diámetro interno de la tubería [m]

v : Velocidad del fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$

μ : Viscosidad dinámica del fluido. $\left[\frac{kgm}{s}\right]$

2.8.2 Cálculo de fuerza de sustentación (LIFT)

La fuerza de sustentación se calculó de dos maneras, la primera usando las celdas de cargas y la segunda utilizando la ecuación 2.8 que representa la definición del principio de Arquímedes.

tenemos que:

$$LIFT = \rho_f g V_s [N] \quad (2.8)$$

Donde:

ρ_f : densidad del fluido $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g : la aceleración de la gravedad $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

V_s : el volumen del fluido desplazado $[m^3]$.

2.9 Metodología de simulación

Para la simulación se realizaron modelos 3D de las geometrías usando Autodesk Inventor, cuyos elementos principales se muestran en las figuras desde la 20 hasta la 32. El canal hidráulico se simplificó para enfocar la atención en el diseño del carro remolque. Con estas geometrías se creó un ensamblaje preliminar que permitiera observar la disposición de las partes en el diseño final, asegurando de restringir los movimientos entre las piezas a los que tendría el proyecto real. En el proceso se creó una animación del movimiento que se desea usando una presentación en Autodesk Inventor.

Figura 21

Canal Hidráulico

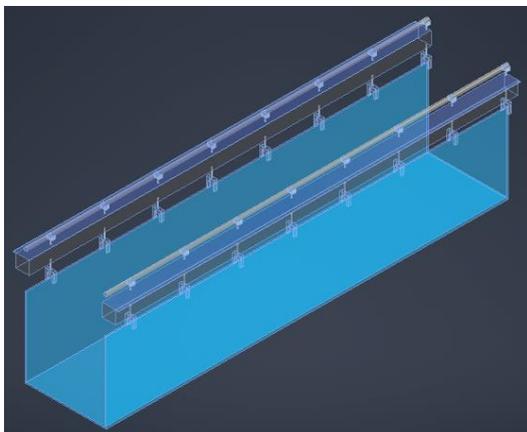


Figura 22

Carro de remolque

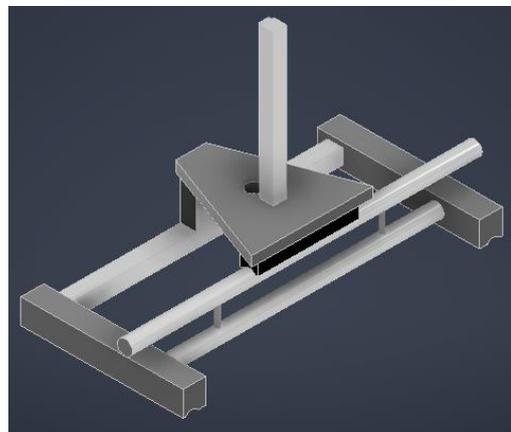


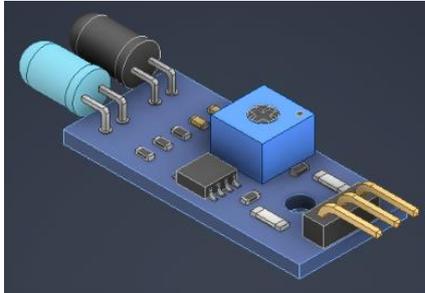
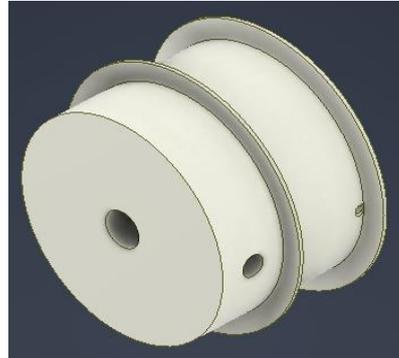
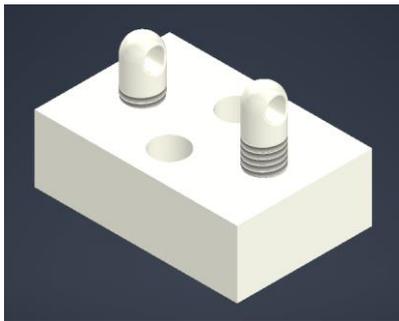
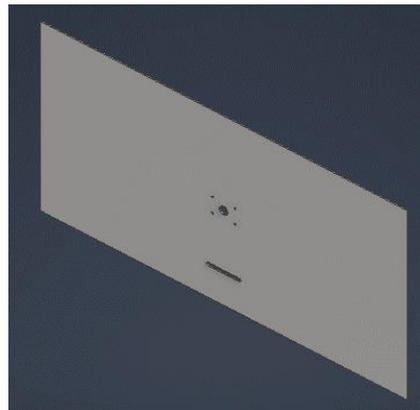
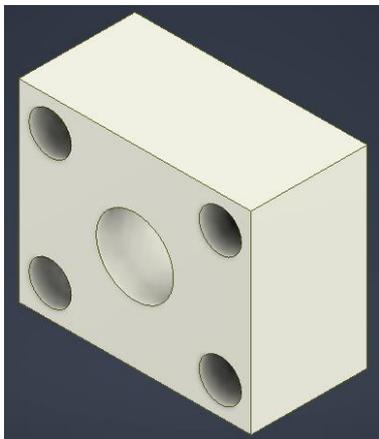
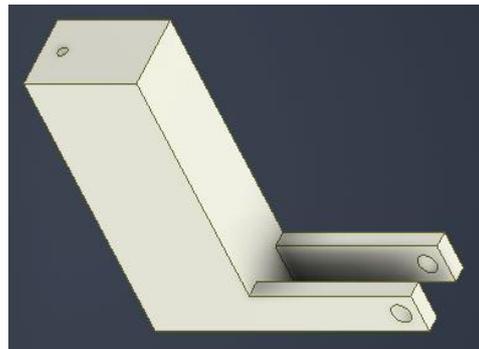
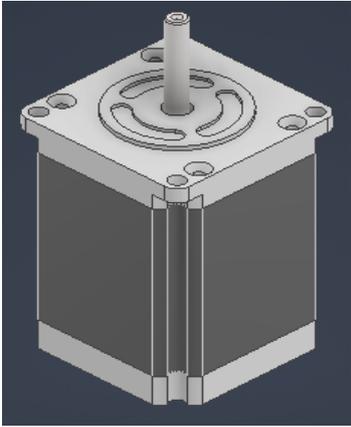
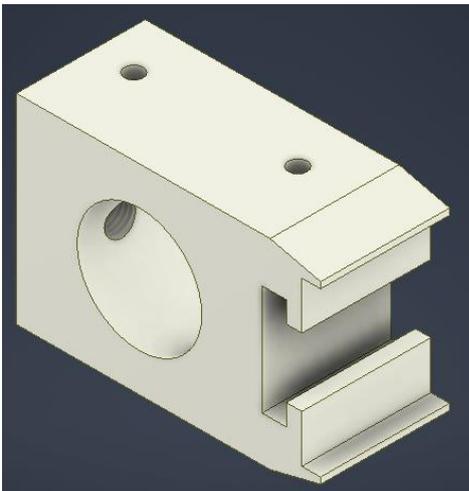
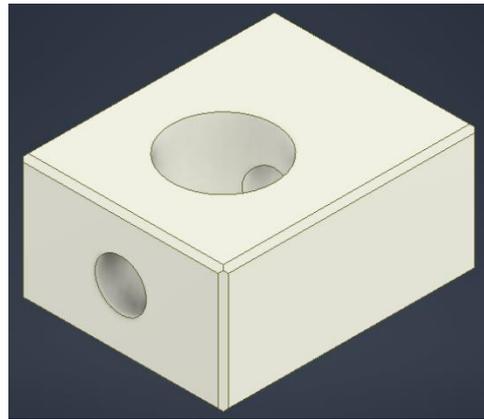
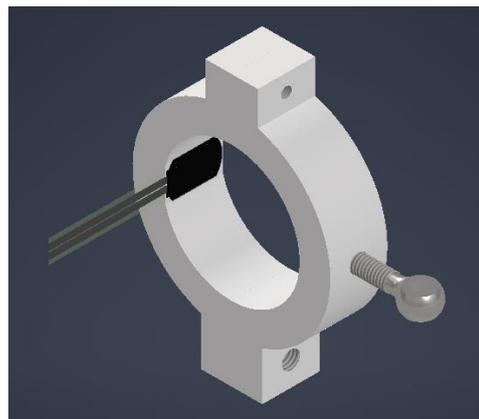
Figura 23*Sensor IR FC51***Figura 24***Rollo de Cuerda***Figura 25***Guía de Cuerda***Figura 27***Plataforma de Motor***Figura 26***Soporte Inferior de Varilla***Figura 28***Soporte de Sensor*

Figura 29*Motor de Paso***Figura 30***Soporte Superior de Varilla***Figura 31***Sujeción de Modelo***Figura 32***Varilla***Figura 33***Anillo De Sujeción De Cuerda*

Capítulo 3

3.1 Resultados y análisis

A continuación, presentarán los resultados obtenidos en el proyecto de diseño del carro de remolque destinado al laboratorio de hidráulica. Se detalla la información recopilada, incluyendo los cálculos, planos de construcción y costos estimados. También se proporciona una proforma del proyecto para una visión financiera más clara. Este capítulo reviste una importancia fundamental, ya que sienta las bases para la implementación exitosa del carro en el laboratorio.

Figura 34

Ensamble de los elementos para el carro de remolque

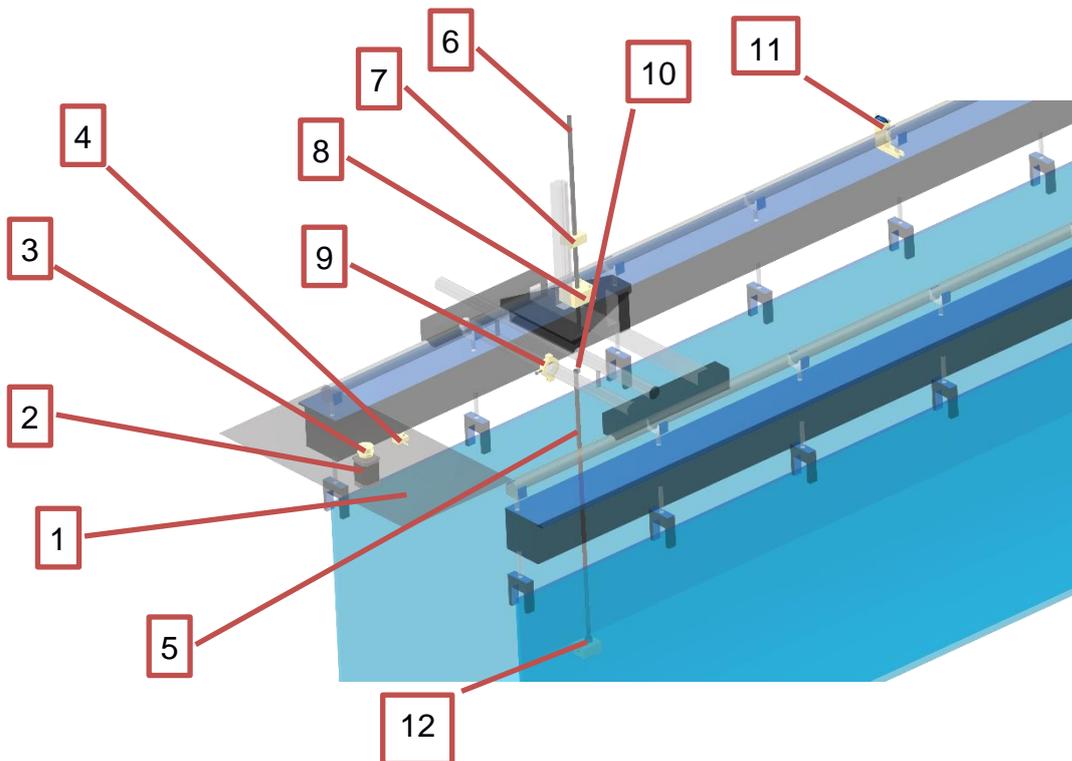
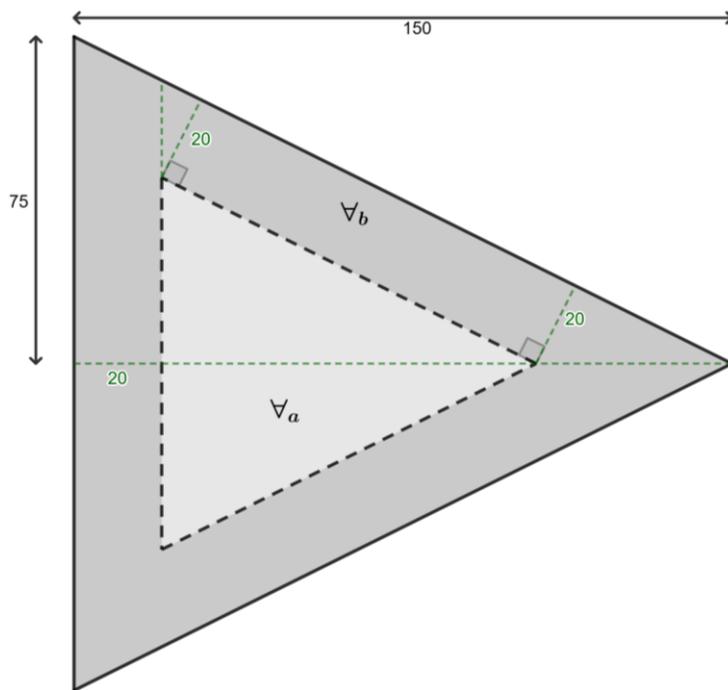


Tabla 10*Elementos propuestos para el carro de remolque*

Número de elemento	Descripción
1	Plataforma del motor
2	Motor de paso
3	Rollo
4	Guías y base de guías
5	Varilla inferior
6	Varilla superior
7	Soporte superior de varilla
8	Soporte inferior de varilla
9	Anillo de tracción
10	Celda de carga
11	Sensor infrarrojo FC51 y su plataforma
12	Elemento de sujeción de modelo

3.2 Análisis de Fuerzas

Se realizó un análisis de fuerzas en el modelo del cono. Para ello, fue necesario calcular los volúmenes detallados en la figura 35 como V_a y V_b .

Figura 35*Vista proyectada del cono*

En esta figura se muestra una vista proyectada del cono anotando las dimensiones elegidas. Todas las mediciones están en milímetros. Teniendo en cuenta que los triángulos delimitados de verde son semejantes a la mitad de esta vista del cono se deduce que

$$\tan^{-1} \frac{75}{150} = 26.56^\circ$$

es el ángulo más agudo de todos los triángulos. La altura de la sección cónica interna es igual entonces a

$$150 - 20 - 20 \csc 26.56 = 85.28 \text{ mm.}$$

Con estos valores se calcula que el radio de la base de este cono interno es

$$85.28 \tan 26.56 = 42.63 \text{ mm.}$$

Los volúmenes son

$$V_a = \frac{\pi(42.63)^2}{3}(85.28) = 162295 \text{ mm}^3 = 1.623 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

y

$$V_b = \frac{\pi(75)^2}{3}(150) - V_a = 281250\pi - 162295 = 721278 \text{ mm}^3$$

$$V_b = 7.213 \times 10^{-4} \text{ m}^3.$$

Otros elementos geométricos por discernir son los centroides de las formas donde actúan las fuerzas. Para un cono, el centroide se encuentra en la recta que une el ápice con el centro de la cara opuesta. Se ubica a un cuarto de la distancia que recorre esta recta desde la cara, para el modelo global esto es $150/4 = 37.5 \text{ mm}$. En este punto actúa la fuerza de flotación. De la misma forma, se ubica el centroide del cono interior a $20 + 85.28/4 = 41.32 \text{ mm}$ desde la cara del modelo. En este actúa el peso del fluido interior. Para identificar el centroide de las paredes del cono, separándolas del hueco interno, es necesario extraer el dato del cálculo del centroide global.

$$37.5 = \frac{41.32V_a + x_c V_b}{V_a + V_b}$$

$$37.5(V_a + V_b) - 41.32V_a = x_c V_b$$

$$x_c = 37.5 - 3.82 \frac{V_a}{V_b} = 37.5 - 3.82 \frac{1.623}{7.213}$$

$$x_c = 36.54 \text{ mm} = 0.03654 \text{ m}.$$

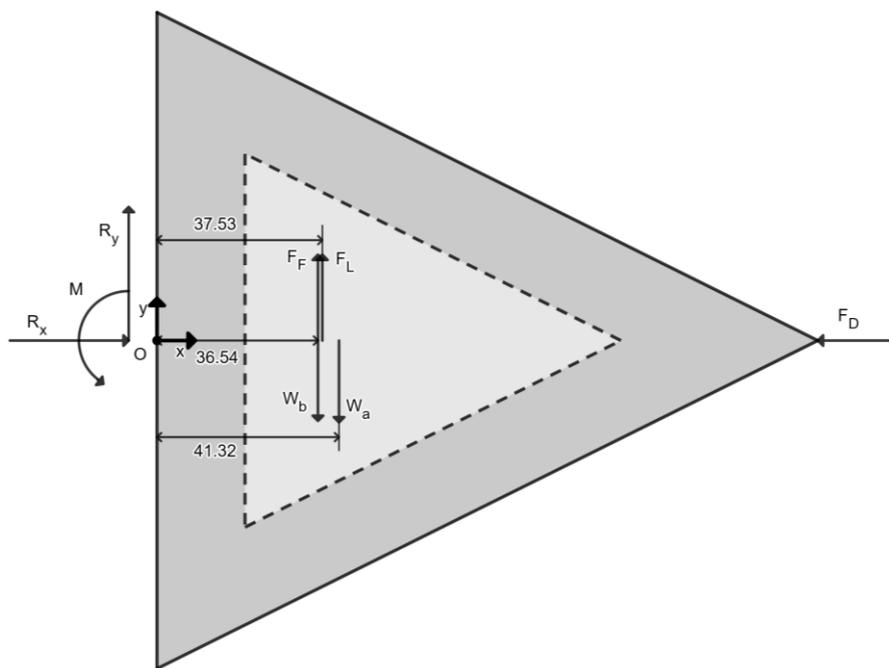
En este último centroide actúa el peso del material del que están fabricados las paredes del cono.

La figura 36 identifica las fuerzas actuando sobre el modelo. Algunos datos que considerar son los siguientes:

- De la tabla 1, el coeficiente de arrastre F_D para un cono con ángulo de 60° es de 0.80,
- La densidad del agua a $25^\circ C$ ρ_a es de $997 \frac{kg}{m^3}$,
- Se estimo que la densidad del material de las paredes del cono (plástico ABS) rondaría los $1000 \frac{kg}{m^3}$,
- La forma es simétrica horizontalmente, dejando $F_L = 0$,
- La forma es simétrica verticalmente, de modo que las fuerzas laterales se cancelan,
- La aceleración de la gravedad $g = 9.807 \frac{m}{s^2}$, y
- El área frontal A_f del cono es $\pi R^2 = \pi(0.075)^2 = 0.01767 m^2$

Figura 36

Fuerzas que actúan sobre el cono



Los datos son suficiente para calcular todas las fuerzas a continuación:

$$F_D = \frac{C_D A_f \rho_a V^2}{2}$$

$$F_D = \frac{(0.8)(0.01767)(997)(0.3)^2}{2}$$

$$F_D = 0.6342 \text{ N},$$

$$F_F = (\forall_a + \forall_b) \rho_a g$$

$$F_F = (1.623 + 7.213) \times 10^{-4} (997)(9.807)$$

$$F_F = 8.639 \text{ N},$$

$$W_a = \forall_a \rho_a g = (1.623 \times 10^{-4})(997)(9.807)$$

$$W_a = 1.587 \text{ N},$$

$$W_b = \forall_b \rho_b g = (7.213 \times 10^{-4})(1000)(9.807)$$

$$W_b = 7.073 \text{ N}.$$

Las reacciones en la base del cono se calculan sabiendo que las sumatorias de fuerzas y de momentos deben ser 0.

$$R_x - F_D = 0$$

$$R_x = F_D = 0.6342 \text{ N},$$

$$R_y + F_F - W_a - W_b = 0$$

$$R_y = 1.587 + 7.073 - 8.639$$

$$R_y = 0.021 \text{ N},$$

$$M + 0.03654(F_F - W_b) + 0.04132(-W_a) = 0$$

$$M = 0.04132W_a + 0.03654(W_b - F_F)$$

$$M = 0.04132(1.587) + 0.03654(7.073 - 8.639)$$

$$M = 0.008353 \text{ N} \cdot \text{m}.$$

A continuación, se realiza un análisis similar para el modelo del medio tubo. La figura 37 detalla las propiedades geométricas pertinentes mientras que la figura 38 es el diagrama de cuerpo libre del modelo.

Figura 37

Vista proyectada del medio tubo

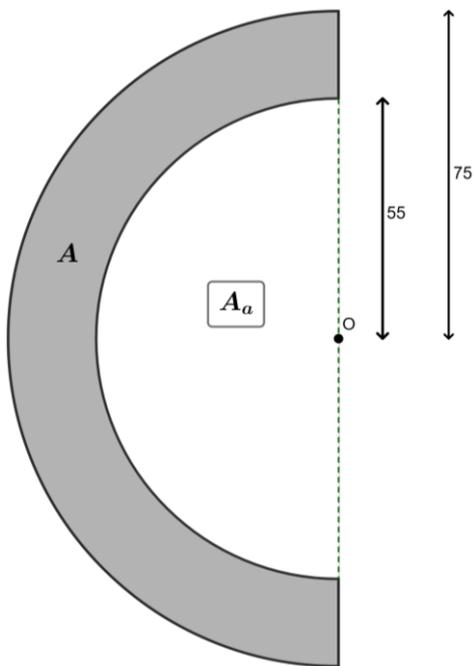
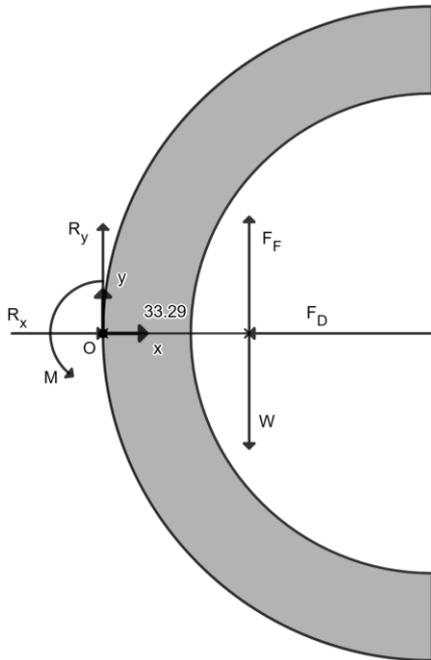


Figura 38*Diagrama de cuerpo libre medio tubo*

El centroide de un semicírculo se encuentra a $4R/3\pi$ desde el centro de la cara plana en dirección perpendicular, donde R es el radio del semicírculo. Para encontrar el centroide del medio tubo se realiza un procedimiento similar al del cono donde se extrajo del cálculo del centroide global. Esta vez se usan las áreas dado que el término de la profundidad se cancela.

$$A_a = \frac{\pi}{2} (55)^2 = 4752 \text{ mm}^2,$$

$$A = \frac{\pi}{2} (75)^2 - A_a$$

$$A = \frac{\pi}{2} (75)^2 - 4752$$

$$A = 4084 \text{ mm}^2,$$

$$\frac{4(75)}{3\pi} = \frac{\frac{4(55)}{3\pi} A_a + x_c A}{A_a + A}$$

$$\frac{100}{\pi} (A_a + A) - \frac{220}{3\pi} A_a = x_c A$$

$$x_c = \frac{80 A_a}{3\pi A} + \frac{100}{\pi} = \frac{80(4752)}{3(4084)\pi} + \frac{100}{\pi}$$

$$x_c = 41.71 \text{ mm.}$$

El coeficiente de arrastre para un medio tubo se da como de 2.3 en la tabla 1. El área frontal es de $(0.15)(0.15) = 0.0225 \text{ m}^2$. Con estos datos y las consideraciones que aplican del modelo del cono a este se calculan todas las fuerzas.

$$F_D = \frac{C_D A_f \rho_a V^2}{2}$$

$$F_D = \frac{(2.3)(0.0225)(997)(0.3)^2}{2}$$

$$F_D = 2.322 \text{ N,}$$

$$F_F = \forall \rho_a g = (0.15) A \rho_a g$$

$$F_F = (0.15)(4.084 \times 10^{-3})(997)(9.807)$$

$$F_F = 5.989 \text{ N,}$$

$$W = \forall \rho_b g$$

$$W = (0.15)(4.084 \times 10^{-3})(1000)(9.807)$$

$$W = 6.007 \text{ N,}$$

$$R_x - F_D = 0$$

$$R_x = F_D = 2.322 \text{ N,}$$

$$R_y + F_F - W = 0$$

$$R_y = W - F_F = 6.007 - 5.989$$

$$R_y = 0.01855 \text{ N,}$$

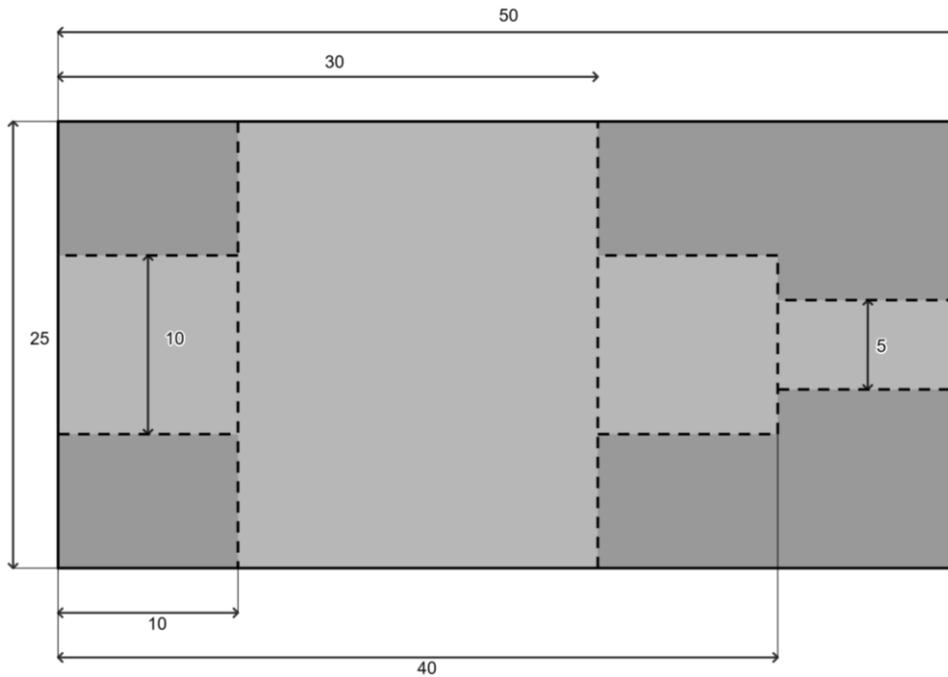
$$M + 0.03329(F_F - W) = 0$$

$$M = 0.03329(6.007 - 5.989)$$

$$M = 5.992 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{m.}$$

Figura 39

Dimensiones del elemento de sujeción del modelo.



Aclarando que la profundidad de la pieza es uniforme y de 40 mm , el sólido se divide en cuatro secciones para las que el cálculo de los volúmenes se reduce a restar el volumen de un cilindro al de un prisma rectangular.

$$(10)(25)(40) - \pi \left(\frac{10}{2}\right)^2 (10) = 9\,215\text{ mm}^3,$$

$$(20)(25)(40) - \pi \left(\frac{20}{2}\right)^2 (25) = 12\,146\text{ mm}^3,$$

$$(10)(25)(40) - \pi \left(\frac{10}{2}\right)^2 (10) = 9\,215\text{ mm}^3,$$

y

$$(10)(25)(40) - \pi \left(\frac{5}{2}\right)^2 (10) = 9\,804 \text{ mm}^3.$$

Con los volúmenes se calcula el centroide de la pieza posicionando el origen en el centro del agujero donde pasa la varilla y con la derecha positiva. Por simetría, el centroide de cada sección se encuentra en su punto medio.

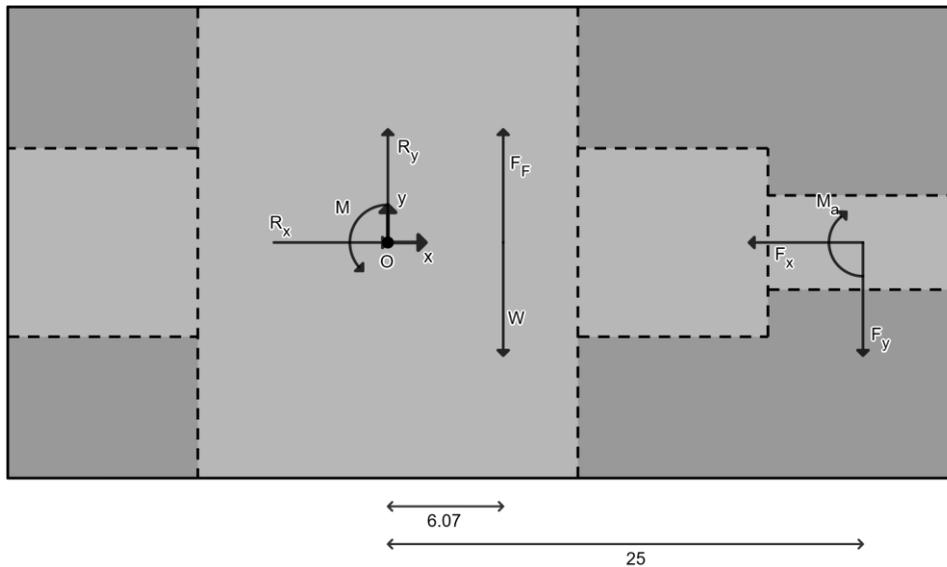
$$x_c = \frac{(-15)(9215) + (0)(12\,146) + (15)(9215) + (25)(9804)}{9215 + 12\,146 + 9215 + 9804}$$

$$x_c = 6.07 \text{ mm}$$

Las fuerzas que actúan en esta pieza son las calculadas como reacciones en los modelos. Las de mayor magnitud corresponden al del medio tubo por lo que se seguirán los cálculos con esas. Las reacciones en esta pieza provienen del método de sujeción compuesto por los dos pernos en la varilla. Ejercen una compresión sobre la pieza que la hace permanecer estática con respecto a la varilla. Eliminando el efecto de la compresión por ahora, la sujeción se asemeja a un punto de sujeción fijo en el centro del agujero donde pasa la varilla, con una sola reacción y momento. El diagrama de cuerpo libre se da en la figura 40. Aunque la pieza se encuentra en el flujo también, se ubica detrás del modelo, lugar en donde se espera que habrá un punto de estancamiento. Y las fuerzas de arrastre y de sustentación deberían ser despreciables en el peor de los casos.

Figura 40

Diagrama de cuerpo libre del modelo



El material es poliamida, con una densidad aproximada de $1140 \frac{kg}{m^3}$. El peso de la pieza resulta ser de

$$W = (1140)(9.215 + 12.15 + 9.215 + 9.804) \times 10^{-6}(9.807)$$

$$W = 0.4514 \text{ N.}$$

La fuerza de flotación es

$$F_F = (997)(9.215 + 12.15 + 9.215 + 9.804) \times 10^{-6}(9.807)$$

$$F_F = 0.3948 \text{ N.}$$

A continuación, se calculan las reacciones en la pieza:

$$R_x - F_x = 0$$

$$R_x = F_x = 2.322 \text{ N,}$$

$$R_y + F_F - W - F_y = 0$$

$$R_y = W + F_y - F_F = 0.4514 + 0.01855 - 0.3948$$

$$R_y = 0.07515 N,$$

$$M - M_a + 0.0067(F_F - W) + 0.025(-F_y) = 0$$

$$M = M_a + 0.0067(W - F_F) + 0.025F_y$$

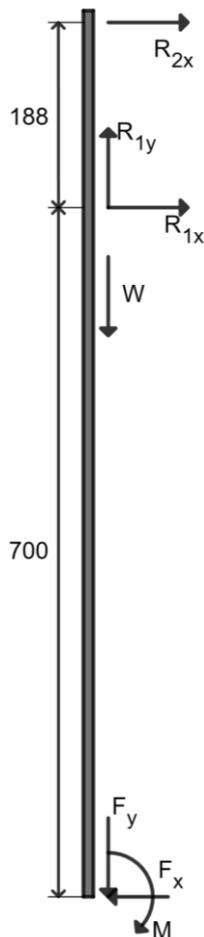
$$M = 5.992 \times 10^{-4} + 0.0067(0.4514 - 0.3948) + 0.025(0.01855)$$

$$M = 1.442 \times 10^{-3} N \cdot m$$

Para el análisis de las varillas se deben realizar unas simplificaciones que facilitan el trato de esa. Primero, a pesar de estar separadas por la celda de carga, se considera una sola varilla de sección uniforme de 10 mm de diámetro. La celda de carga no hace más que medir la fuerza de corte de esta varilla ficticia en un punto. Segundo, si bien la altura a la que se sujeta la varilla en el diseño final se puede regular, para este análisis se toma una distancia desde el modelo hasta el primer punto de soporte de la varilla de 700 mm , como se muestra en la figura 41. Tercero, la interacción entre la varilla y los dos soportes es compleja y la resultante de cada una tiene componentes de fuerzas en dos dimensiones y de momento en una dimensión; un caso de indeterminación estática. Para poder resolver esto, se supone que es un sistema ideal donde la varilla y los soportes no se deforman y se tocan en un solo punto, tal que no exista momento. Luego, también se supone que toda la carga vertical es soportada por el soporte inferior. Dado que la totalidad de la varilla mide aproximadamente 1300 mm , se ubica el centro de masa a 650 mm . El peso de la celda de carga se desprecia. Las fuerzas que actúan en la varilla son aquellas calculadas como reacciones en el elemento de sujeción de los modelos. El diagrama de cuerpo libre resultante es el de la figura 41.

Figura 41

Diagrama de cuerpo libre de la varilla



La varilla es de acero inoxidable, por lo que se puede considerar una densidad de $7750 \frac{kg}{m^3}$.

Su volumen aparente sería

$$V = \pi(5)^2(1300) = 102101 \text{ mm}^3 \approx 1.021 \times 10^{-4} \text{ m}^3.$$

Se estima entonces su peso en

$$W = (7750)(1.021 \times 10^{-4})(9.807)$$

$$W = 7.76 \text{ N}.$$

Las fuerzas y momentos se calculan a continuación como:

$$(188)(R_{1x}) + (888)(-F_x) - M = 0$$

$$R_{1x} = \frac{1}{188} (M + 888F_x)$$

$$R_{1x} = \frac{1}{188} [1.442 \times 10^{-3} + 888(2.322)]$$

$$R_{1x} = 10.97 \text{ N},$$

$$R_{1y} - W - F_y = 0$$

$$R_{1y} = W + F_y$$

$$R_{1y} = 7.76 + 0.07515$$

$$R_{1y} = 7.835 \text{ N},$$

$$R_{1x} + R_{2x} - F_x = 0$$

$$R_{2x} = F_x - R_{1x} = 2.322 - 10.97$$

$$R_{2x} = -8.646 \text{ N}.$$

3.3 Selección del motor

Como se indicó en el capítulo 2 partir de la ecuación 2.2 para el cálculo de la velocidad del flujo a partir de la ecuación del caudal nos da un valor de $0.3 \left[\frac{m}{s} \right]$, se calcula la potencia del motor requerida con la ecuación 2.1

$$P = nFV$$

Tomando como la fuerza 2.32N, teniendo en cuenta el factor de diseño igual a 2 el caso cuando se presenta un modelo de medio tubo ya que como observamos en los cálculos es la fuerza de mayor magnitud debido a su coeficiente de arrastre

$$P = 2(2.32N) \left(0.3 \frac{m}{s} \right)$$

$$P = 1.392 \text{ W}$$

A partir de los resultados obtenidos se selecciona un motor que corresponda a la potencia requerida, se seleccionó un motor paso a paso MP3-42H060 tiene una potencia pico de 68W,

pero como existen pérdidas por la fricción y en el sistema se escoge este motor, las especificaciones del motor son las siguientes:

Tabla 11

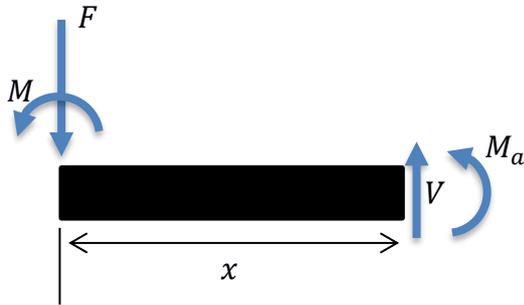
Especificaciones del motor paso MP3-42H060

Dimensiones [m^2]	42x60
Par de retención [Nm]	0.8
Corriente de fase nominal [A]	1.7
Voltaje de trabajo para la velocidad máxima de paso completo [V]	40

3.4 Deformación de la Varilla

La figura 42 es un diagrama de cuerpo libre de corte desde el extremo inferior de la varilla, de manera a poder calcular el momento flector. Con este momento flector se deducen las ecuaciones de deflexión de la varilla. Las condiciones de frontera que debe cumplir son las siguientes:

- $x = 0.7 \rightarrow v = 0$: debido a que el soporte inferior mantiene este punto en posición neutral,
- $x = 0.7 \rightarrow dv/dx = 0$: debido a que el soporte inferior tiene ángulo nulo y mantiene la varilla alineada con él.

Figura 42*Corte de la Varilla*

$$M_a = -xF - M.$$

$$EI \frac{d^2v}{dx^2} = -Fx - M$$

$$EI \frac{dv}{dx} = -\frac{F}{2}x^2 - Mx + C_1$$

$$EIv = -\frac{F}{6}x^3 - \frac{M}{2}x^2 + C_1x + C_2$$

En $x = 0.7$ m:

$$EI(0) = -\frac{F}{2}(0.7)^2 - M(0.7) + C_1$$

$$C_1 = \frac{(2.322)(0.7)^2}{2} + (1.442 \times 10^{-3})(0.7) = 0.5699.$$

$$EI(0) = -\frac{F}{6}(0.7)^3 - \frac{M}{2}(0.7)^2 + 0.5699(0.7) + C_2$$

$$C_2 = \frac{(2.322)(0.7)^3}{6} + \frac{(1.442 \times 10^{-3})(0.7)^2}{2} - (0.5699)(0.7)$$

$$C_2 = -0.2658.$$

Teniendo que cuenta que $\frac{dv}{dx} = \theta$, se puede calcular la pendiente de deformación en el extremo de la varilla. Este determina a su vez la inclinación que adquirirá el modelo frente a la

corriente, la cual es indeseable y debe mantenerse mínima. Se podría considerar un ángulo de 0.5° como el valor extremo que puede tomar el modelo con respecto al flujo sin afectar significativamente los datos.

Los valores del módulo de Young E de la varilla es el del acero inoxidable, con un valor de 180 GPa . El momento de inercia de área I de la sección transversal de la varilla es la de un disco de radio 0.01 m . Esto es,

$$I = \frac{0.01^4 \pi}{4} = 2.5\pi \times 10^{-9} \text{ m}^4.$$

En $x = 0$, punto en que se encuentra el modelo,

$$EI\theta_{x=0} = -\frac{F_D}{2}(0)^2 - M(0) + 0.5699$$

$$\theta_{x=0} = \frac{0.5699}{EI} = \frac{0.5699}{(1.8 \times 10^{11})(2.5\pi \times 10^{-9})}$$

$$\theta_{x=0} = 4.031 \times 10^{-4} \text{ rad} \approx 0.0231^\circ.$$

Se concluye entonces que la pendiente que adquiere la varilla al nivel del modelo es tolerable y no afecta significativamente la posición del modelo.

3.5 Simulación ANSYS Fluent de dos Modelos

3.5.1 Construcción de los CAD

El archivo modelo del cono se construye en Inventor seccionando el canal a una distancia prudente adelante y atrás del modelo, con el objetivo de imitar el espacio que tiene el agua para fluir en el canal real y mitigar el efecto que tendría la recirculación en los extremos del canal. El canal se representa como un bloque tridimensional, en el cual el cono se da como una cavidad con forma de cono. Para aprovechar la simetría vertical del modelo y canal, lo que reduce significativamente el costo computacional de una simulación de fluidos, se eliminó la mitad del canal. El archivo se muestra en la figura 43 desde el punto de vista del corte por simetría.

Figura 43*CAD para el Modelo del Cono*

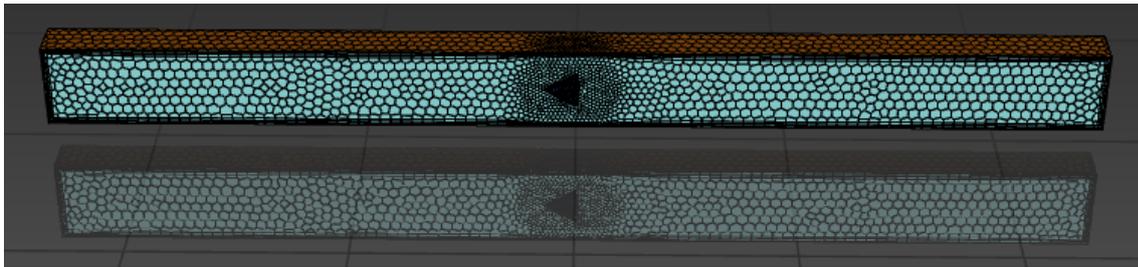
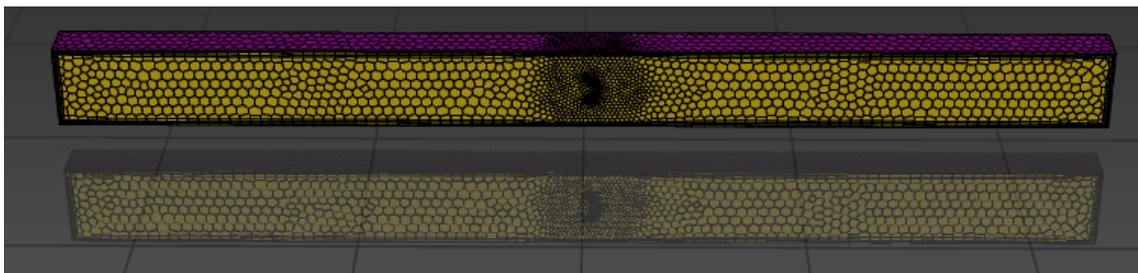
De la misma forma se tiene el modelo del medio tubo que se muestra en la figura 44.

Figura 44*CAD para el Modelo del Medio Tubo*

Para las dimensiones, el cono tiene una base de 150 mm y el ángulo del ápice es de 60°. El medio tubo tiene un radio externo de 75 mm y su espesor es de 20 mm. Su profundidad desde esta vista es de 150 mm (para el medio tubo entero).

3.5.2 Preparación del Mallado

El mallado se realizó con la ayuda del sistema “Watertight Geometry” de ANSYS Fluent, con el cual se aplicó un refinamiento local del mallado alrededor del modelo que permita simular con más detalle el flujo cercano. Las configuraciones exactas del refinamiento y otras etapas del mallado se encuentran en el apéndice B. Este refinamiento se aprecia en las figuras 45 y 46 como un aumento importante del número de celdas en la localidad de los modelos, además de un leve aumento de este en la zona directamente atrás de los modelos que incluye la estela esperada del flujo.

Figura 45*Mallado del Cono***Figura 46***Mallado del Medio Tubo*

El tamaño de las celdas empleadas se limitó a una referencia máxima de 5 cm en las zonas de menor detalle, mientras que las zonas más importantes llegan a una referencia mínima de 1 cm. Desde el mallado se definió la pared frontal de las figuras como una pared de simetría, tal que el programa reconozca que está interactuando con un flujo simétrico a través de esta pared.

3.5.3 Configuración de la Física

Siendo una simulación de un modelo circulando en el fluido, no existe entradas ni salidas del fluido. Es más, la inclusión de estos induciría el programa a “pretender” que existe circulación a través de estos debido a que, por la forma en que realiza los cálculos de la conservación de la masa, el programa solo concierne que la resultante del flujo de masa a través de las entradas y salidas se acerque a cero. Esto lo interpreta como una libertad del flujo de

pasar a través de las fronteras mientras el cambio de masa dentro del sistema permanece casi igual, a un margen de error menor con cada iteración. Por lo tanto, el fluido está encerrado por paredes más la pared de simetría. El modelo también cuenta como una pared a la que se le otorgó una velocidad de 3 m/s. Esta velocidad es la velocidad seleccionada para los cálculos en la sección 2. El fluido se estableció como agua líquida y la simulación se realizó en estado estable.

3.5.4 Contornos, Líneas de Corriente y Fuerzas Obtenidas

Realizando iteraciones hasta que los residuales sean despreciables, se tienen los contornos de las figuras 47 y 48 sobre los modelos, que identifica las zonas donde existe mayor presión en los modelos.

Figura 47

Distribución de Presión sobre el Cono

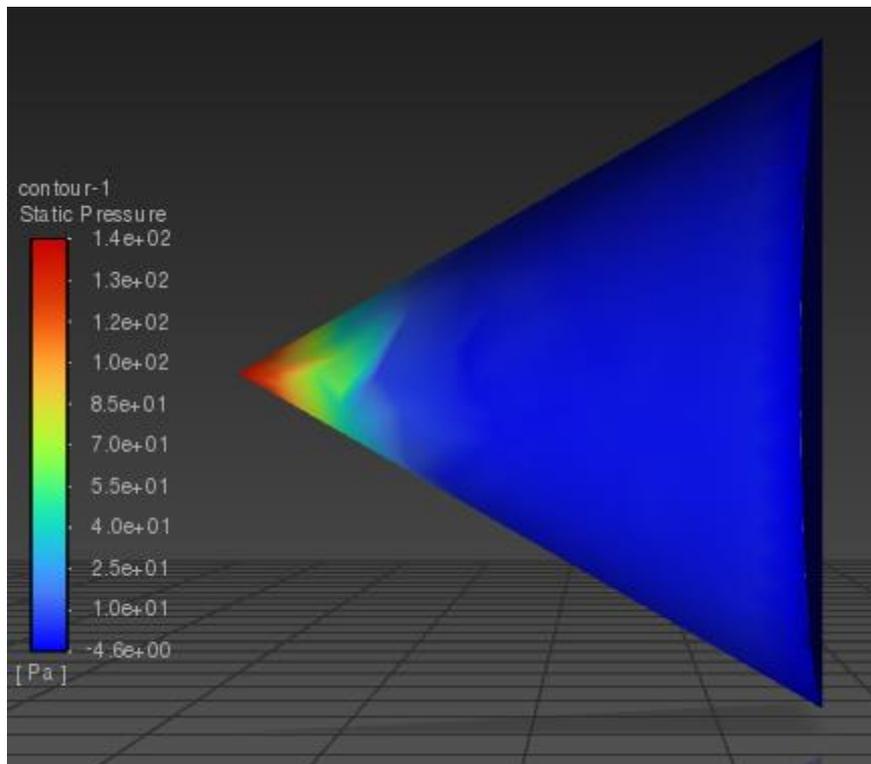
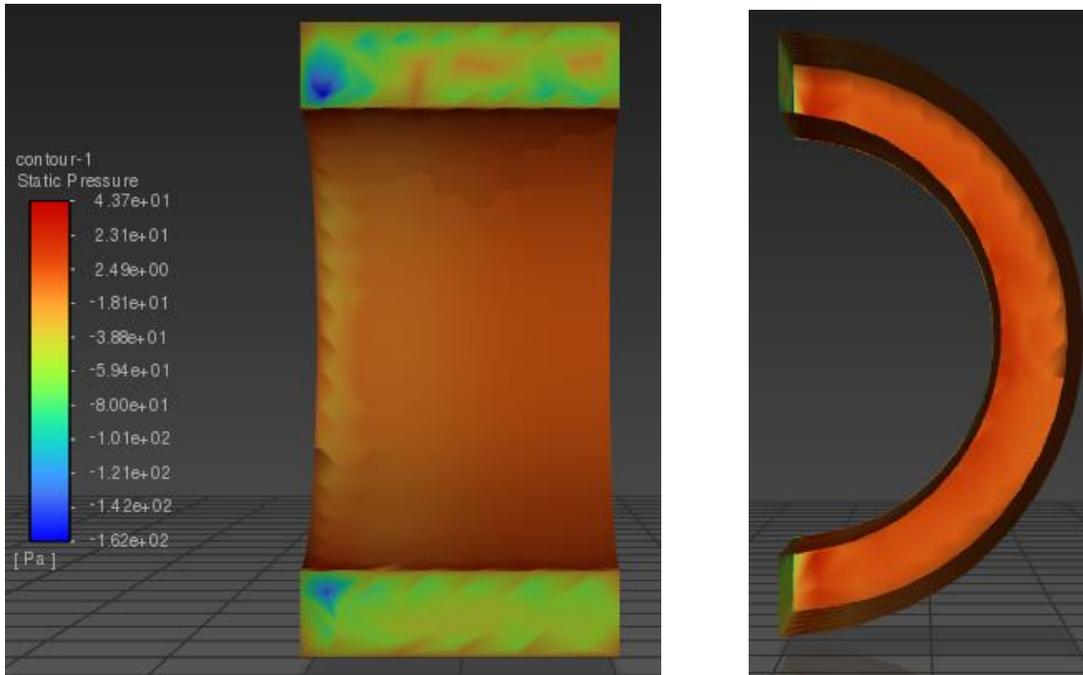
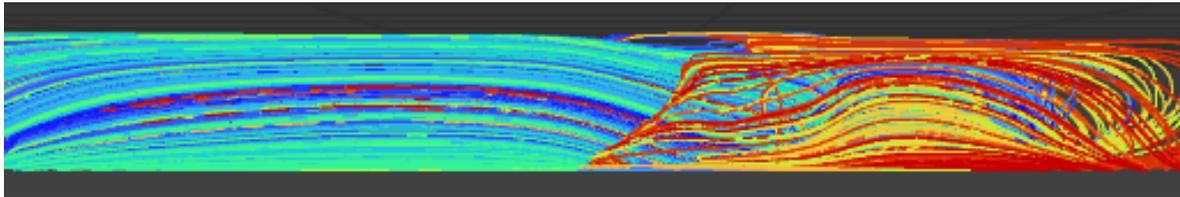
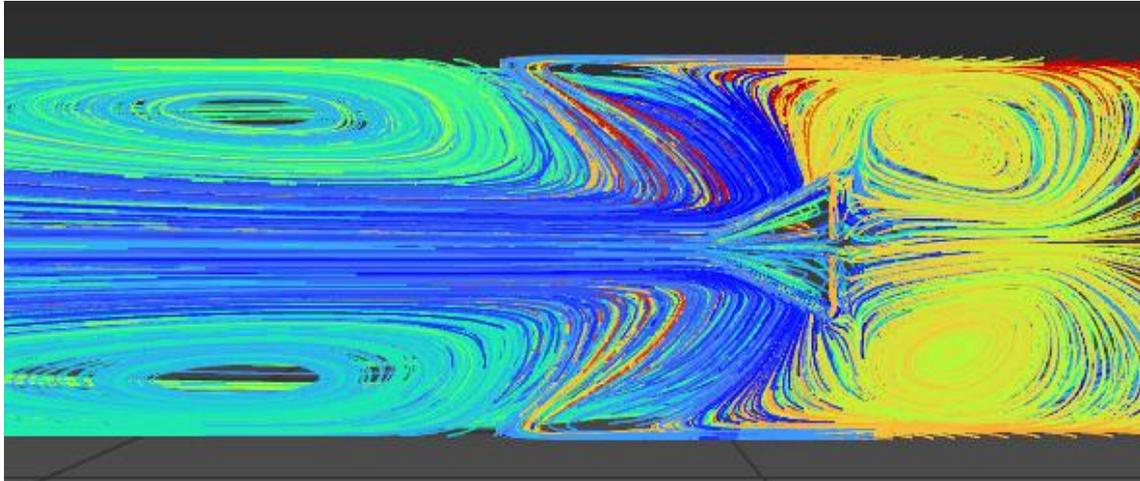


Figura 48*Distribución de Presión Sobre el Medio Tubo*

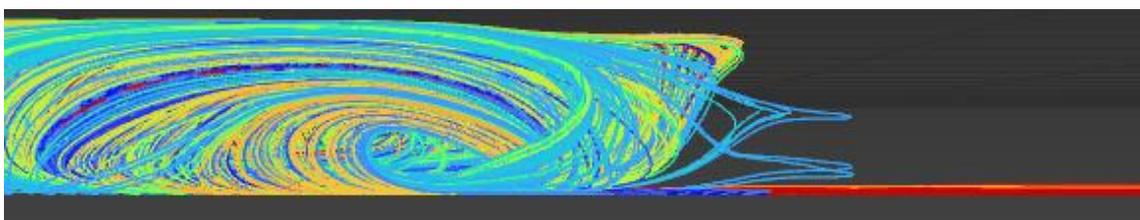
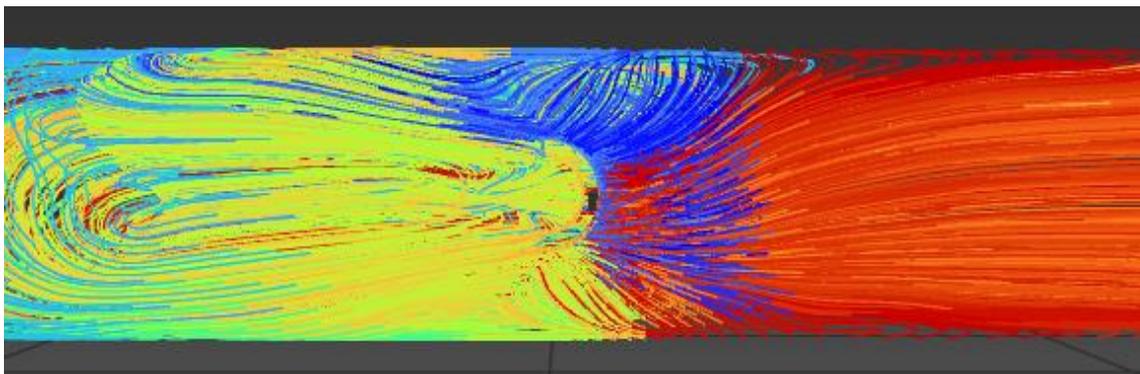
Las figuras 49 y 50 muestran líneas de corriente del agua del canal en la proximidad de los modelos. Los colores identifican las líneas de corriente una de otra. Es una instantánea de la dirección de la velocidad de varios puntos del canal, más no sugieren la magnitud de esta velocidad. Las líneas de corriente mostradas son las que conectan con el plano de simetría en algún punto. Las líneas de corriente que nunca se acercan al plano de simetría no se muestran.

Figura 49

Líneas de Corriente del Agua Alrededor del Cono

**Figura 50**

Líneas de Corriente del Agua Alrededor del Medio Tubo



La fuerza de arrastre calculada sobre la mitad del cono es de 0.03220 N por presión y de 0.2255 N por viscosidad, para un total de 0.2577 N. Sobre la mitad del medio tubo estas son 0.1962, 0.3829 y 0.5791, respectivamente.

Debido a las prestaciones realizadas para aprovechar la simetría, queda claro que las figuras obtenidas se reflejan del otro lado del plano de simetría. Una consecuencia es que la fuerza calculada sobre el modelo por el simulador es la mitad de la que sería con el modelo completo. Por lo tanto, se reportan el doble de estas fuerzas como resultados que serían 0.5154 N para el cono y 1.1582 N para el medio tubo.

3.6 Análisis de Costos

3.6.1 Cotización y Proforma

En la tabla 12 se detallan los costos de los materiales de venta en el mercado ecuatoriano requeridos para la construcción del diseño, cada artículo con su precio y proveedor. Estos elementos se usarán directamente en el diseño en la forma que viene, o deberán ser trabajados para darles la forma requerida.

Tabla 12*Costos de Equipos y Materiales*

EQUIPOS Y MATERIALES						
N°	ARTÍCULO	PROVEEDOR	CANT.	UdM	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	MOTOR PASO A PASO XINJE MP3-42H060 TORQUE: 0.80Nm	INSERVO QUITO	1	u.	\$83,00	\$83,00
2	DRIVER XINJE DP3L-224 20-40VDC	INSERVO QUITO	1	u.	\$83,00	\$83,00
3	SENSOR ÓPTICO FC-51	ELECTRONICA CASTRO GUAYAQUIL	4	u.	\$1,15	\$4,60
4	FUENTE VARIABLE 3-24V	MEGATRONICA GUAYAQUIL	1	u.	\$20,09	\$20,09
5	MODULO GALGAS EXTENSIOMETRICAS	MEGATRONICA GUAYAQUIL	2	u.	\$7,05	\$14,10
6	SENSOR DE FUERZA FSR402	MEGATRONICA GUAYAQUIL	1	u.	\$13,10	\$13,10
7	RASPBERRY PI	MEGATRONICA GUAYAQUIL	2	u.	\$11,70	\$23,40
8	ARDUINO UNO	MEGATRONICA GUAYAQUIL	1	u.	\$17,00	\$17,00
9	PANTALLA TOUCH	MEGATRONICA GUAYAQUIL	1	u.	\$79,50	\$79,50
10	EQUIPO DE VENOCLISIS 150cm de largo-5mm diámetro	FYBECA	2	u.	\$1,65	\$3,30
11	EMPAQUE PARA PINTURA (500 ML)	FYBECA	2	u.	\$1,50	\$3,00
12	CABLE UTP 0.43CM DIAMETRO	KIWI	4	m.	\$0,30	\$1,20
13	CABLE 20 AWG	KIWI	2	m.	\$0,35	\$0,70
14	SENSOR CELDA 50 KG PE	VILCONSA	4	u.	\$5,10	\$20,40
15	TINTA DE IMPRESORA EPSON 504 COLOR ROJO	COMPUCCELL	2	u.	\$16,00	\$32,00
16	MODULO HX711	VILCONSA	2	m.	\$2,90	\$5,80

17	PLANCHA DE METAL DE ACERO INOXIDABLE 201 (1220X2440x2)mm	IMPORTACERO	1	u.	\$109,33	\$109,33
18	VARILLA DE ACERO INOXIDABLE 304 (1 m largo 2 cm diám.)	CASA DEL PERNO	1	u.	\$40,00	\$40,00
19	CUERDA DE NYLON TRANSPARENTE 0.5mm de espesor x100m largo	IMPORTADORA QITIO	1	u.	\$8,00	\$8,00
			Subtotal 1			\$561,52

En la tabla 13 se listan los costos asociados a los materiales que requirieron de algún servicio para darles forma. Algunos materiales son ofrecidos directamente por el proveedor del servicio, como el proveedor de piezas de poliamida. Otros materiales fueron listados en la tabla anterior y solo se solicitó el servicio para darles forma, como la plancha de acero que necesita maquinado.

Tabla 13

Costos de Servicios

MAQUINADO Y ELABORACION DE PIEZAS, MODELOS.						
N°	ARTÍCULO	PROVEEDOR	CANT.	UdM	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	ELABORACIÓN DE PIEZAS EN POLIAMIDA (SOPORTES, DISCO, ELEMENTO DE SUJECCION)	INDUPARTS	9	u.	\$65,00	\$585,00
2	IMPRESIÓN DE MODELO 3D	SMART 3D TEC	2	u.	\$45,00	\$90,00
3	ROSCADO DE VARILLA DE ACERO INOXIDABLE	TALLER TORNO LC	1	u.	\$10,00	\$10,00
4	CORTE Y AGUJEROS EN PLANCHA DE ACERO INOXIDABLE	TALLER TORNO LC	1	u.	\$20,00	\$20,00
4	DINAMOMETRO CASERO		1	u.	\$20,00	\$20,00
			Subtotal 2			\$725,00

En la tabla 14 se dan los costos estimados totales para la fabricación del carro remolque. Se consideraron costos de transporte de los materiales y costos de materiales varios como un porcentaje del total.

Tabla 14

Costos Totales

RESUMEN					
N°	ARTÍCULO	CANT.	UdM	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	EQUIPOS Y MATERIALES	1	Global	\$561,52	\$561,52
2	MAQUINADO Y ELABORACION DE PIEZAS, MODELOS.	1	Global	\$725,00	\$725,00
3	SERVICIO DE COURIER	1	Global	\$64,33	\$64,33
3	MATERIALES VARIOS	1	Global	\$128,65	\$128,65
			Total		\$1.479,50

Capítulo 4

4.1 Conclusiones y recomendaciones

4.1.1 Conclusiones

El análisis de fuerzas involucrados en el sistema, en el cual destacó la fuerza de arrastre, se realizó suponiendo dos modelos, un cono y un medio tubo. Estos son cuerpos seleccionados especialmente para el análisis y como prototipos iniciales a entregar con el equipo. Van acoplados al sistema de carro de remolque mediante unas varillas de acero inoxidable, una celda de carga para medición de fuerza, y varios implementos de sujeción. Se calcularon las fuerzas hidrodinámicas que parecen al desplazarse los modelos en el fluido. Se evidenció de que el modelo de medio tubo exhibe las mayores magnitudes de fuerzas aplicadas en él. Esto se debe a su coeficiente de arrastre, que es considerablemente alto, siendo de 2.3, y a la velocidad máxima programada del carrito de $0.3 \frac{m}{s}$ generará una fuerza de 2.322 N. Esto permitió obtener una comprensión de las fuerzas y las interacciones mecánicas e hidrodinámicas dentro del sistema del carro de remolque a través de la elaboración de diagramas de cuerpo libre.

Se propusieron varias ideas de implementación luego de evaluar las instalaciones del canal hidráulico del laboratorio. Estas ideas fueron evaluadas y categorizadas según el problema que resolvían. Estos problemas fueron: el método de tracción, el método de medición de velocidad, el método de sujeción del modelo y el método de medición de las fuerzas. En cada categoría, las ideas fueron puestas unas contra otras en una matriz de selección, resultando en un diseño final con las supuestas mejores propuestas. Este cuenta con el uso de una varilla roscada que sujeta el modelo y es soportada en el carrito, un anillo sujeto al carrito del que tira un motor de paso a través de una cuerda, el uso de sensores infrarrojos en distancias conocidas para el cálculo de la velocidad promedio, y el uso de una celda de carga instalada entre dos varillas para medir la fuerza en el modelo.

Basándonos en todo lo anterior se lograron identificar las reacciones y momentos aplicados sobre la varilla, con lo cual se pudo realizar un análisis de esfuerzo y deformaciones sobre la varilla para determinar su deflexión en su extremo. Se prevé que el ángulo del punto donde estará el modelo tome un ángulo de 0.0231° con respecto al flujo, lo cual es muy pequeño. Por lo tanto, se concluye que la deformación que presenten las varillas no resultará en el cambio de la orientación del modelo en estudio y servirá para la toma de mediciones exactas.

Se ha logrado constatar con un análisis por simulaciones que las fuerzas involucradas son del orden de magnitud evaluado en el análisis teórico del sistema del carro de remolque para predecir el comportamiento del diseño. Los modelos de cono y medio tubo fueron fundamentales para llevar a cabo las simulaciones mediante ANSYS Fluent ofreciendo una valiosa perspectiva sobre cómo los modelos se comportarían cuando están expuestos a un fluido. Las fuerzas calculadas por el programa de ANSYS difieren de los calculados en base a la teoría, y reconociendo que el programa no se especializa en geometrías que se desplazan en el flujo, no son muy fiables. La fuerza de arrastre arrojada por la simulación es de casi la mitad de las calculadas teóricamente. Sin embargo, siguen siendo del mismo orden de magnitud lo cual indica que pueden seguir siendo usadas como guías. Estas fuerzas se encuentran dentro de los límites que el sistema de carro de remolque puede soportar. Esta observación es fundamental, ya que sugiere que el diseño propuesto será funcional y seguro en situaciones prácticas.

El uso de simulaciones numéricas en este proyecto dio puntos a favor de validar el diseño. Además, estas simulaciones permitieron identificar oportunidades para la optimización del diseño, como lo es el dimensionamiento adecuado de los modelos con respecto al canal para que la simulación pueda converger en un resultado. Si la simulación no converge sugiere que los modelos pueden ser demasiado grandes para el canal y que deben ser reconsiderados.

Los elementos acoplados al carro de remolque fueron seleccionados para no generar vibraciones excesivas. Cada elección, desde la placa de acero inoxidable 201 con alta inercia hasta el uso de poliamida para soportes y componentes rígidos, se hizo con el objetivo de mantener la estabilidad y la integridad del sistema en condiciones de trabajo variadas. La varilla de acero inoxidable 201, diseñada para resistir deformaciones mínimas bajo la exposición al agua, garantiza que las vibraciones no afecten negativamente la precisión de los instrumentos. Además, la cuerda de nylon se seleccionó específicamente por su capacidad para mantener su rendimiento sin importar las condiciones de humedad y su capacidad para soportar las cargas previstas. En conjunto, estas elecciones respaldan la afirmación de que el diseño y los materiales elegidos están optimizados para prevenir vibraciones excesivas, asegurando así un funcionamiento confiable y preciso de los instrumentos acoplados al carro de remolque.

Tras el análisis de costos, teniendo en cuenta las cotizaciones de materiales y servicios disponibles en el mercado ecuatoriano, ha permitido concluir que el proyecto se encuentra en un rango de presupuesto altamente satisfactorio. Además de considerar los costos de los materiales y equipos, también se tuvo en cuenta el costo de servicios esenciales como la elaboración de piezas en poliamida, la impresión de modelos 3D y el maquinado de las piezas de acero. El proyecto cuenta con un costo estimado de 1479.50 USD y este se encuentre dentro del rango requerido por el cliente, es un indicador positivo de la viabilidad financiera del proyecto. Esto sugiere que los recursos necesarios para llevar a cabo el proyecto están disponibles y que se ha realizado una gestión eficiente de los costos. Este análisis de costos detallado proporciona una sólida base para la planificación y ejecución exitosa del proyecto, garantizando que se cuente con los recursos financieros necesarios para llevar a cabo todas las actividades de manera efectiva y dentro de los estándares de calidad requeridos. La atención meticulosa a los costos contribuirá significativamente al éxito y la rentabilidad del proyecto en su conjunto.

Se generaron múltiples planos de manufactura de piezas personalizadas para adaptar las instalaciones previas del laboratorio. Entre estas cuentan partes de acero inoxidable 201 como las varillas y la plataforma del motor. Otras piezas fueron diseñadas con poliamida en mente como el elemento de sujeción del modelo, los soportes de la varilla, los elementos guías de la cuerda, el rollo de la cuerda, el anillo de tracción al que va unido la cuerda y las plataformas de los sensores infrarrojos FC51. Los planos indicados se encuentran en el apéndice B al final de este documento. La figura 34 muestra un ensamble de todas las piezas instaladas en los equipos presentes en el laboratorio.

4.1.2 Recomendaciones

Una vez que el carro de remolque esté construido, es crucial realizar pruebas y validaciones en el entorno real del laboratorio de hidráulica. Esto garantizará que el diseño y los materiales funcionen como se espera y que no haya problemas no detectados. Ajusta el diseño según sea necesario después de estas pruebas para garantizar un rendimiento óptimo.

Desarrolla un plan de mantenimiento preventivo para el carro de remolque. Esto incluye rutinas de inspección y mantenimiento regular para asegurarte de que el sistema siga funcionando de manera eficiente y segura a lo largo del tiempo. Esto es particularmente importante dada la exposición al agua y otras condiciones de laboratorio.

Se debe tener especial consideración con las dimensiones del canal en el que se trasladará el cuerpo y las dimensiones del cuerpo mismo. Si no se coordinan estas y el cuerpo es muy grande, asumiendo que el canal es cerrado, el agua tendrá dificultad en rodear el objeto y seguramente desbordará en el diseño final. Esto también afectará muy negativamente los resultados de cualquier simulación de dinámica de fluidos, debiendo cuestionar la exactitud y el valor de estos.

Una buena sugerencia es la de usar uno o más programas de simulación CFD además del principal como prueba. Esto porque la mayoría de los programas no se especializan en desplazar una geometría dentro de un fluido estático. En vista de esta incertidumbre, se podrían comparar los resultados de varios programas calculando exactamente las mismas condiciones. Si los resultados suelen converger a los mismos valores, se podría desestimar la incidencia de la metodología del cálculo en los resultados, e interpretar estos datos contra la teoría. Caso contrario, solo sería posible usar prueba y error y evaluar los resultados que más se asemejen a la teoría como estimaciones.

Se recomienda encarecidamente evaluar cuidadosamente la maniobrabilidad de equipo, anticipando los posibles desafíos operativos y de seguridad, y los detalles de configuración como el cambio de modelo a estudiar y el regreso del carrito a su posición inicial. Es posible que para cambiar el modelo sea necesario elevar o retirar la varilla o los elementos que sujetan el modelo. Aquello debe ser un proceso realizable sin trabajo excesivo y por una sola persona. Para regresar el modelo a su posición inicial existe la posibilidad de usar el mismo motor de paso que realiza la tracción instalando una polea del otro lado del canal. Y la adición de una marca para el punto inicial, ya sea física o computacionalmente, aseguraría la reproducibilidad de cada experimento.

El material de las piezas de poliamida fue elegido por su costo principalmente, dado que las fuerzas involucradas no son muy grandes. Esto no implica que se deba obviar el análisis de los puntos críticos, pero mientras sea un material rígido se puede investigar la disponibilidad en el mercado por lo que sea más asequible. Se sugiere también hacer todas las piezas similares con el mismo proveedor para aprovechar descuentos por el mayoreo y obtener las piezas con mayor rapidez y de la misma calidad. Dado que se usan varias roscas de hilos pequeños para la inserción de tornillos y tuercas tiene sentido ser cuidadoso durante la manufactura de estas piezas para que no haya dificultad durante la instalación.

Para la selección del motor, si se dispone del carrito, se recomienda primero evaluar la fricción que existe entre el carrito y el recorrido que tiene que realizar. Este dará un primer dato sobre la potencia que debe vencer el motor. Luego, mientras que la documentación sobre el transiente de la circulación de cuerpos sumergidos mientras va acelerando es casi inexistente, lo más apropiado es estimar las fuerzas hidrodinámicas sobre un cuerpo sumergido con un flujo estable. Si este es laminar o turbulento dependerá de la velocidad a la que se desee que vaya el cuerpo. Con la potencia prevista dados estos datos es posible elegir un motor. Se sugiere que este motor pueda mantenerse a una distancia prudente del agua, que tenga una cubierta protectora, o que sea resistente al agua, caso contrario se estará averiando prontamente.

Cabe recalcar que el diseño de carros remolques de este tipo no está estandarizado y las instituciones que implementan estas instalaciones lo realizan de forma interna dado que no suelen existir ofertas en el mercado. En su mayoría se usan en centros de investigación y universidades que lo requieren para realización de estudios y pruebas, y estas instituciones suelen tener la capacidad de realizar diseños que se adapten a sus instalaciones existentes. Subsecuentemente, los diseños personalizados son más apropiados para este tipo de equipos y requieren de un estudio previo del lugar donde irá. Luego, se pueden idear soluciones prácticas y proceder a la selección de la mejor.

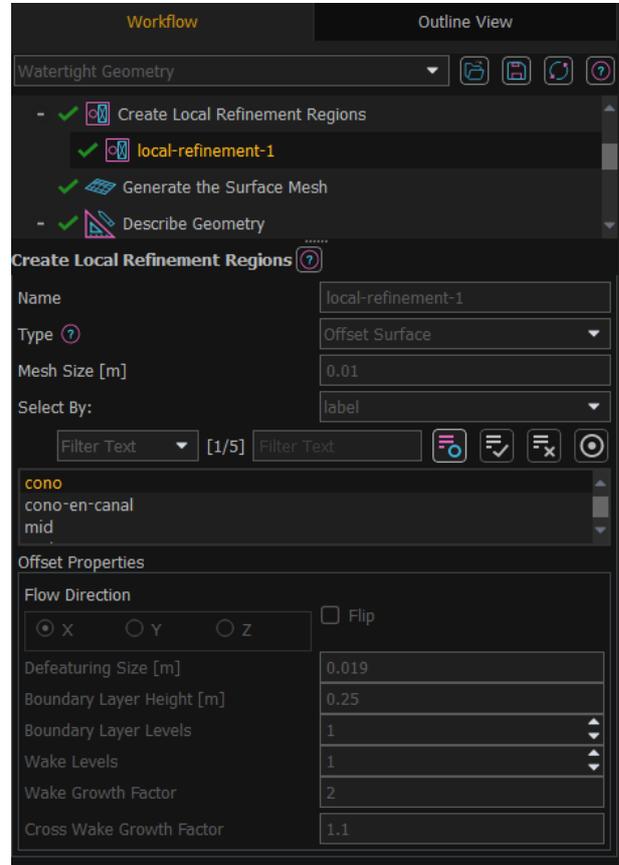
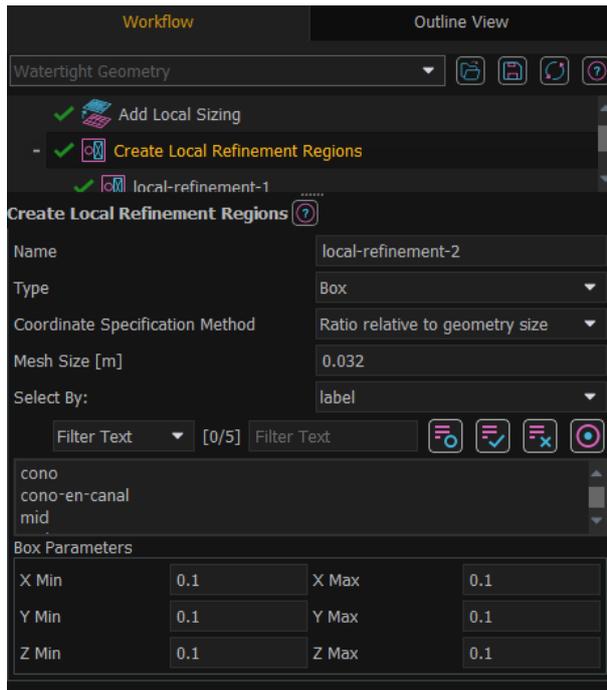
Bibliografía

- BUN-CA Fundación Red de Energía. (2018). *Manual técnico: Motores eléctricos*. Biomass Users Network (BUN-CA). Recuperado el 2023
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill Education.
- Fitzgerald, A. E., Kingsley, C. J., & Umans, S. D. (2015). Motores de inducción o asíncrono. En A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley, & S. D. Umans, *Máquinas Eléctricas* (pág. 184). España: McGraw-Hill.
- Green, J. (12 de Julio de 2022). *With instrumentation upgrades and modernization, Virginia Tech's towing tank facility is primed for engineering research*. Obtenido de Virginia Tech News: <https://news.vt.edu/articles/2022/07/towing-tank-modernization.html>
- Ibarra, G. A., & Palacios, J. A. (1 de Junio de 2013). *Criterios de diseño para un túnel de agua de bajo costo*. Recuperado el 11 de 6 de 2023, de Sciel: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-30332013000100013
- Mora, J. F. (2008). *Máquinas Eléctricas*. Madrid: McGraw-Hill.
- Raghavendra, N. V., & Krishnamurthy, L. (2013). Measurement of Force, Torque and Strain. En N. V. Raghavendra, & L. Krishnamurthy, *Engineering Metrology and Measurements* (págs. 341-363). New Delhi: Oxford University Press.
- Rodríguez Rodríguez, G., Hernández González, A., López Llanusa, A., & Ramírez Beltrán, J. (2 de abril de 2016). *Scielo*. Recuperado el 10 de junio de 2023, de Sistema para la medición de deformación usando galgas extensiométricas metálicas: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1815-59282016000100007&script=sci_arttext&tlng=en
- White, F. M. (2016). *Fluid Mechanics*. New York: McGraw-Hill Education.

Apéndice

Apéndice A: Simulación en ANSYS Fluent

Generación de Mallado con Región de Refinamiento en ANSYS Fluent



Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ **Generate the Surface Mesh**
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ Update Regions
 - ✓ Add Boundary Layers

.....

Generate the Surface Mesh

Use Custom Size Field/Control Files?

Minimum Size [m]

Maximum Size [m]

Growth Rate

Size Functions

Curvature Normal Angle [deg]

Cells Per Gap

Scope Proximity To

Draw Size Boxes

Separate Out Boundary Zones by Angle?

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ **Describe Geometry**
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ Update Regions

.....

Describe Geometry

Geometry Type

- The geometry consists of only solid regions
- The geometry consists of only fluid regions with no voids
- The geometry consists of both fluid and solid regions and/or voids

Change all fluid-fluid boundary types from 'wall' to 'internal'?

- Yes
- No

Do you want to apply Share Topology?

- Yes
- No

Enable Multizone Meshing?

- Yes
- No

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ **Update Boundaries**
 - ✓ Update Regions
 - ✓ Add Boundary Layers
 - ✓ smooth-transition_1
 - ✓ Generate the Volume Mesh

.....

Update Boundaries

Selection Type

Filter

oundary Nam	Boundary Type
cono	wall
mid	symmetry
outlet	pressure-outlet
wall	wall

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ **Update Regions**
 - ✓ Add Boundary Layers
 - ✓ smooth-transition_1
 - ✓ Generate the Volume Mesh

.....

Update Regions

Filter

Region Name	Region Type
cono-en-canal	fluid

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ Update Regions
- ✓ **Add Boundary Layers**
 - ✓ smooth-transition_1
- ✓ Generate the Volume Mesh

Add Boundary Layers

Add Boundary Layers?

Name

Offset Method Type

Number of Layers

Transition Ratio

Growth Rate

Add in

Grow on

Advanced Options

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ Update Regions
- ✓ **Add Boundary Layers**
 - ✓ **smooth-transition_1**
- ✓ Generate the Volume Mesh

Add Boundary Layers

Add Boundary Layers?

Name

Offset Method Type

Number of Layers

Transition Ratio

Growth Rate

Add in

Grow on

Advanced Options

Workflow Outline View

Watertight Geometry

- ✓ Add Local Sizing
- ✓ Create Local Refinement Regions
 - ✓ local-refinement-1
- ✓ Generate the Surface Mesh
- ✓ Describe Geometry
 - ✓ Update Boundaries
 - ✓ Update Regions
- ✓ Add Boundary Layers
 - ✓ smooth-transition_1
- ✓ **Generate the Volume Mesh**

Generate the Volume Mesh

Solver

Fill With

Growth Rate

Max Cell Length [m]

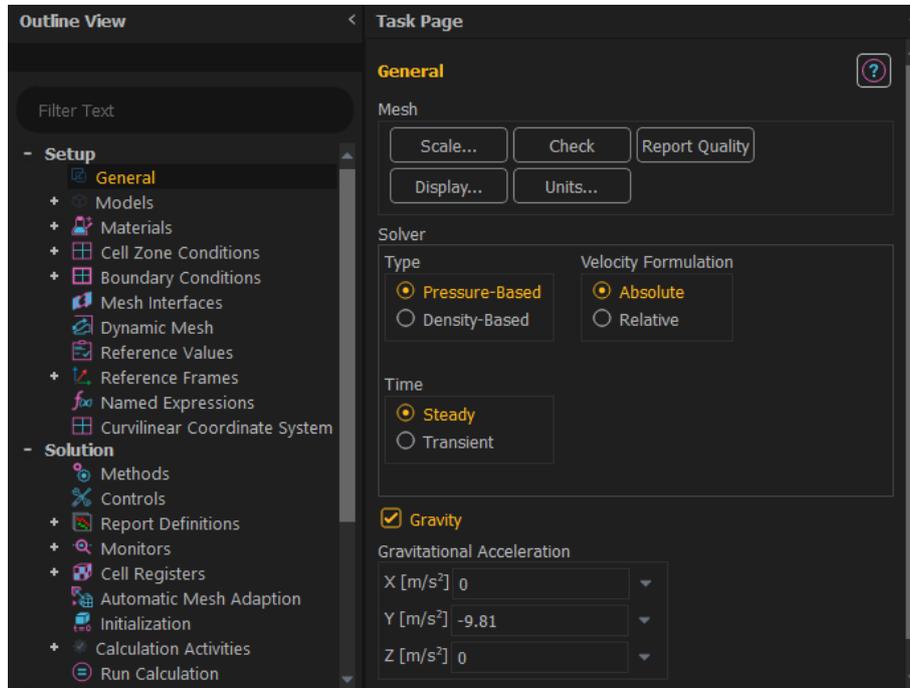
Enable Parallel Meshing

Advanced Options

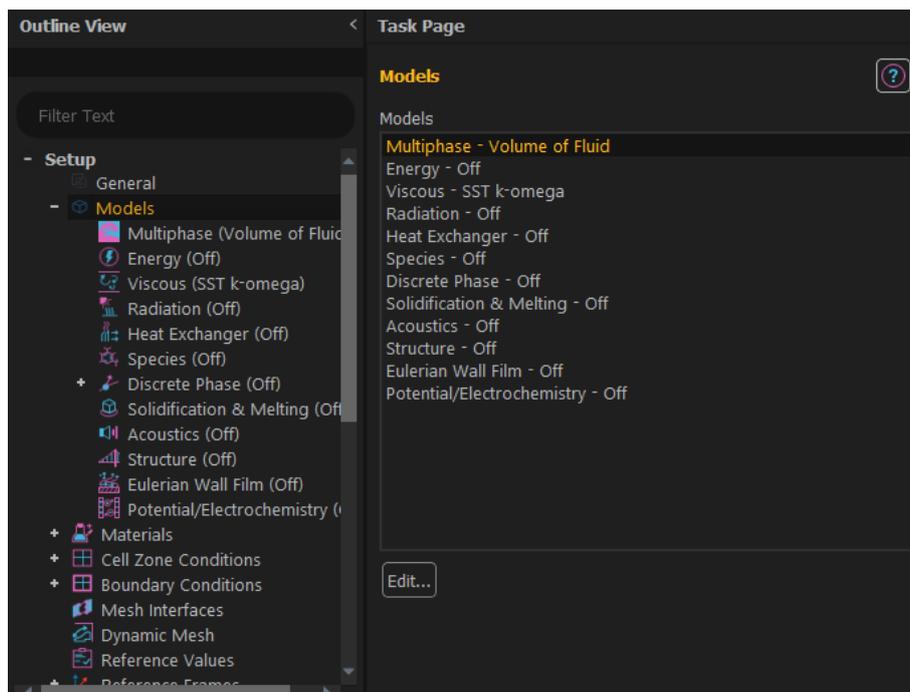
Global Boundary Layer Settings

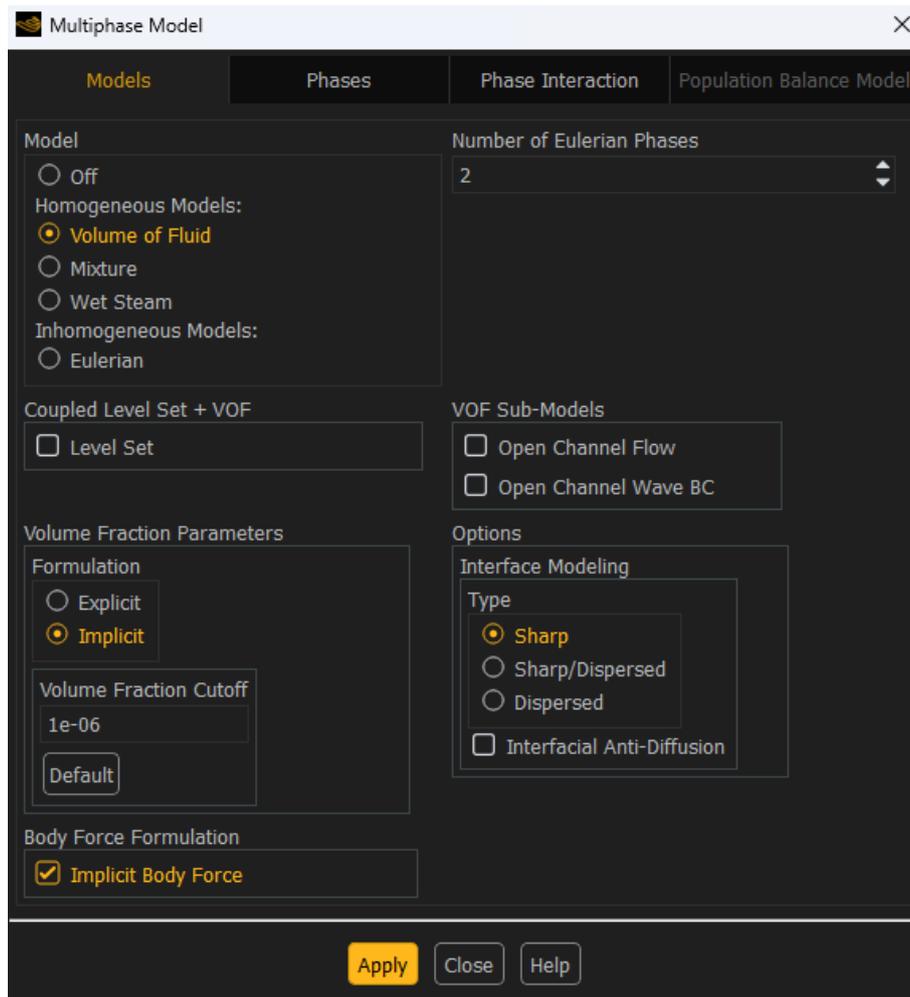
Configuración de Simulador en ANSYS Fluent

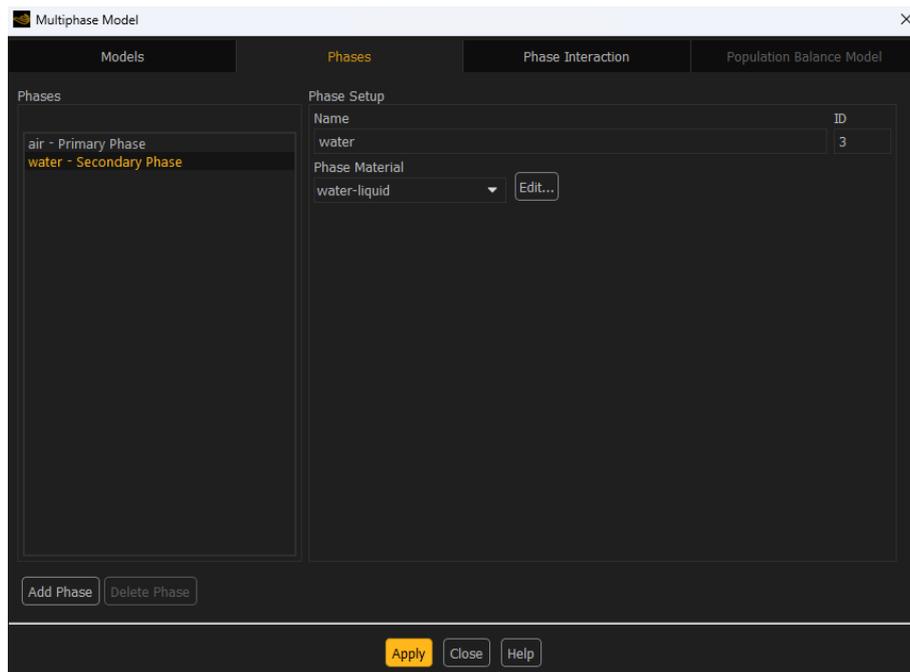
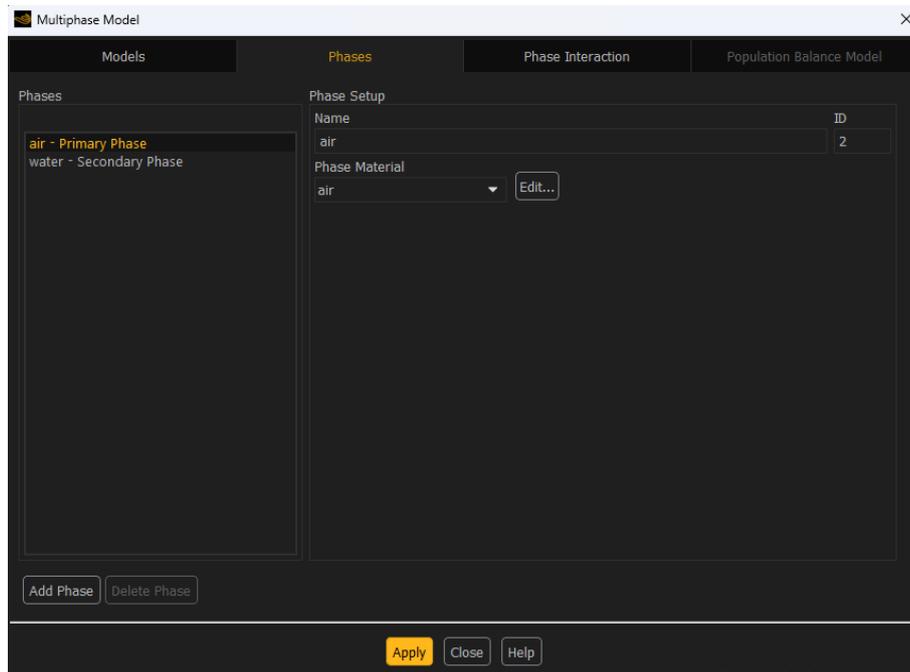
Sección general

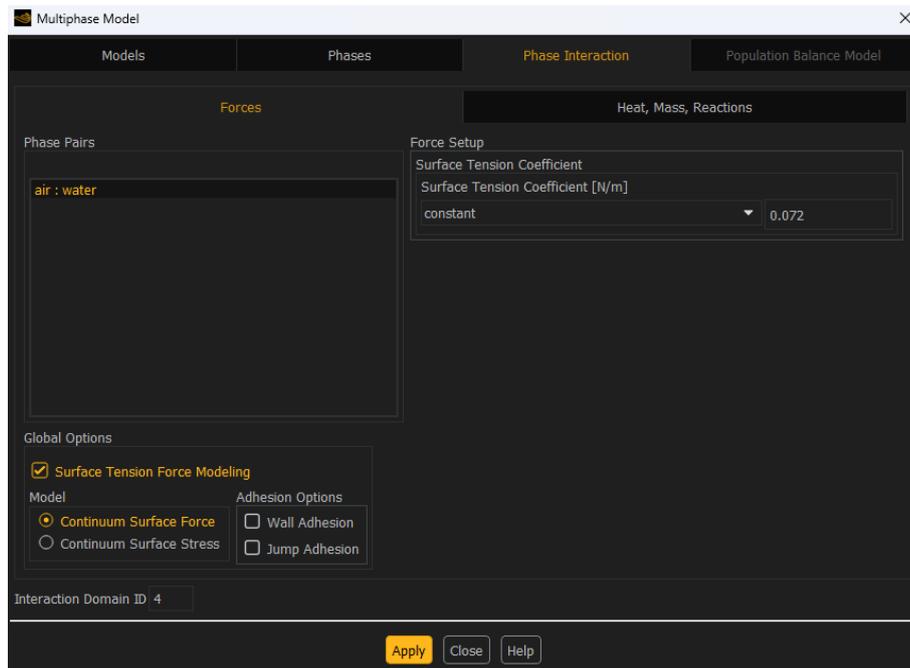


Sección de modelos

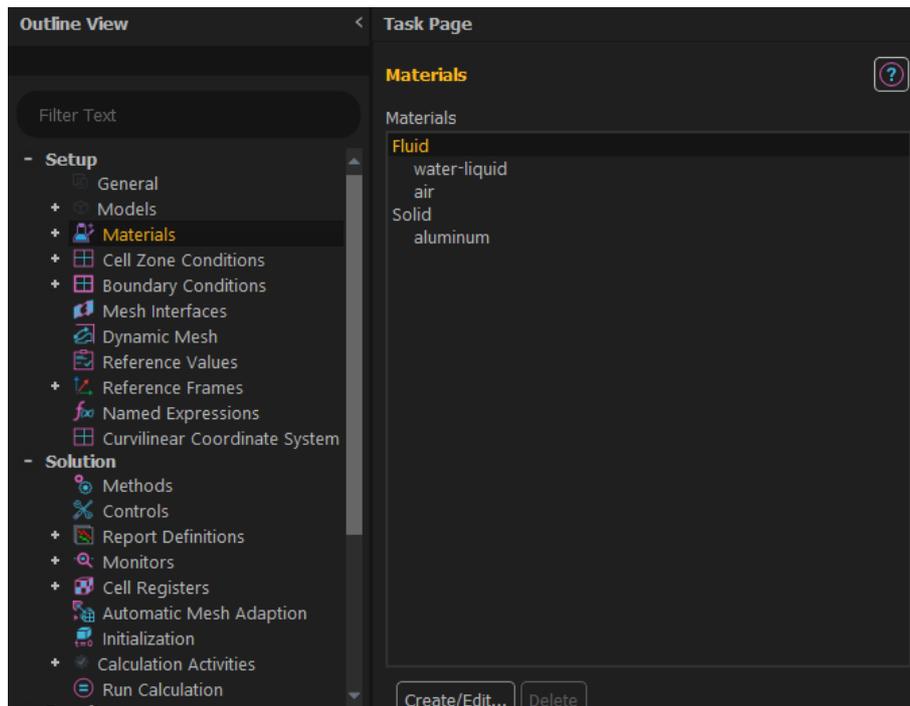




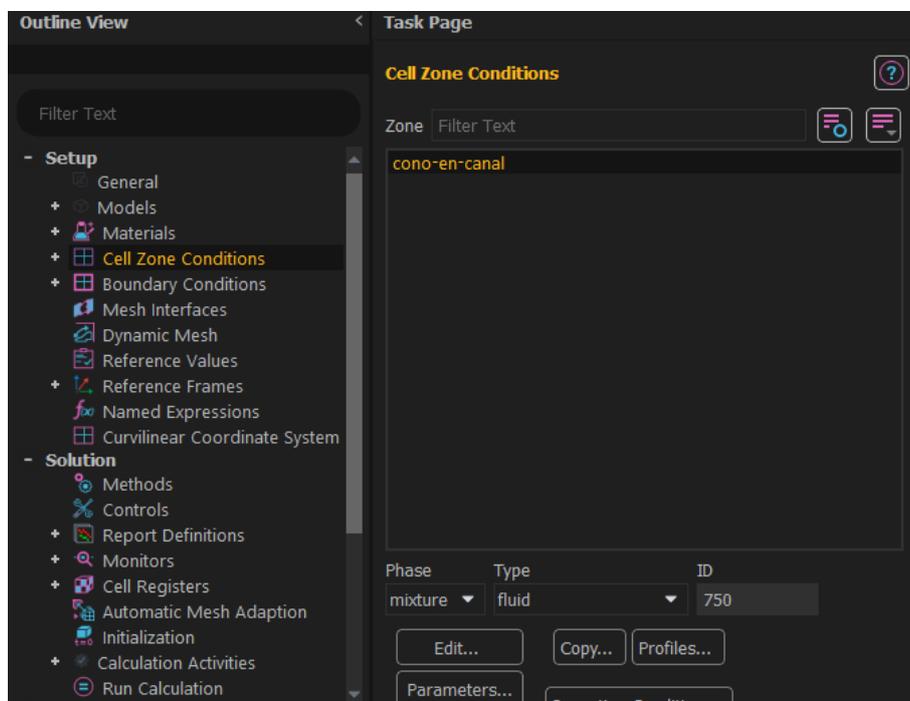




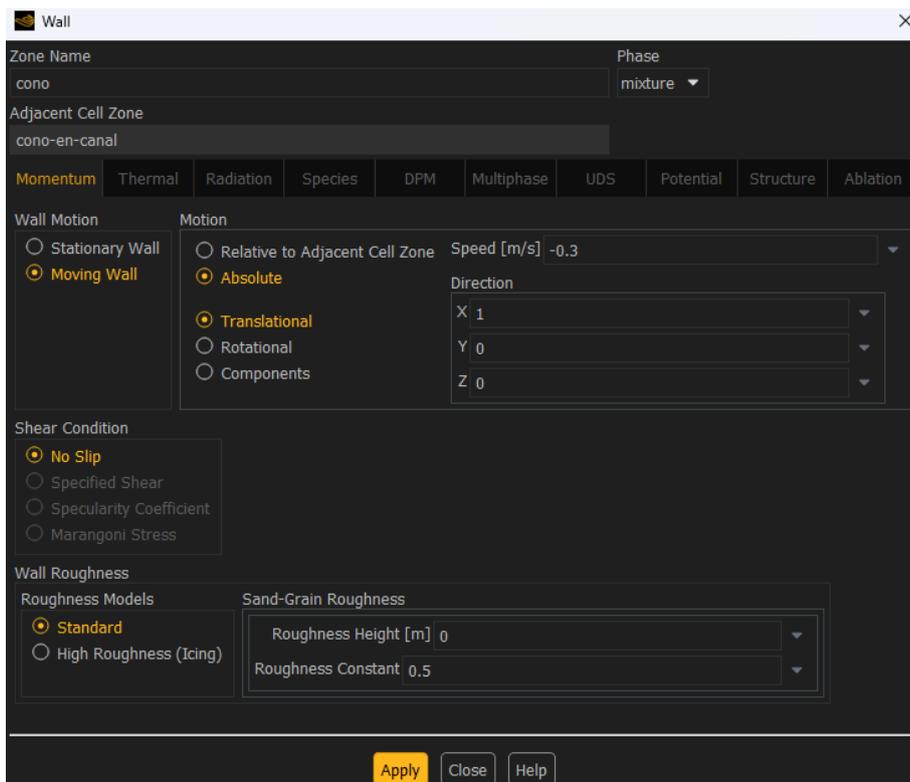
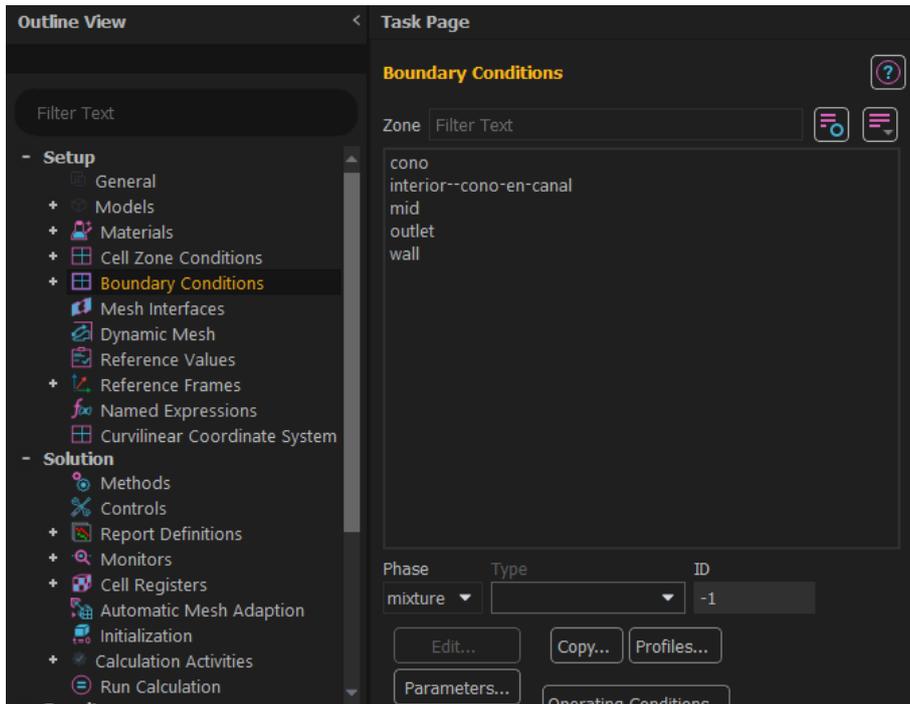
Sección de materiales



Sección de zonas de celdas



Sección de condiciones de frontera



Pressure Outlet [Close]

Zone Name: outlet Phase: mixture

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Pressure Specification Method: Gauge Pressure

Gauge Pressure [Pa]: 0

Pressure Profile Multiplier: 1

Backflow Direction Specification Method: Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification: Total Pressure

Radial Equilibrium Pressure Distribution

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%]: 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Wall [Close]

Zone Name: wall Phase: mixture

Adjacent Cell Zone: cono-en-canal

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS Potential Structure Ablation

Wall Motion

Stationary Wall Relative to Adjacent Cell Zone

Moving Wall

Shear Condition

No Slip

Specified Shear

Specularity Coefficient

Marangoni Stress

Wall Roughness

Roughness Models

Standard

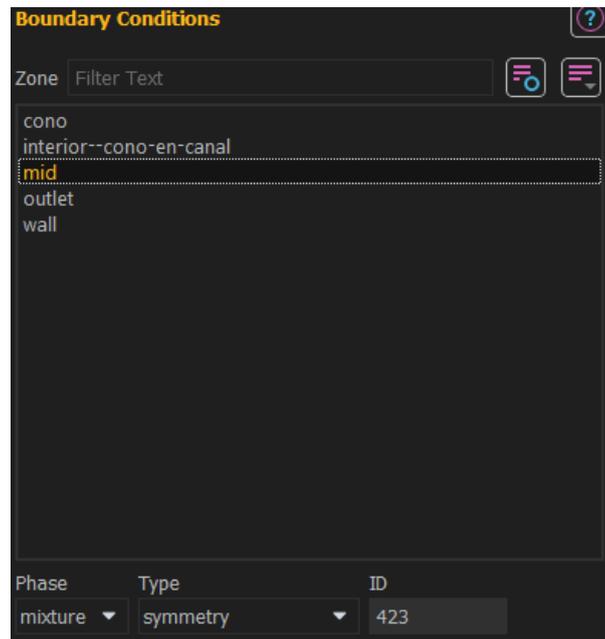
High Roughness (Icing)

Sand-Grain Roughness

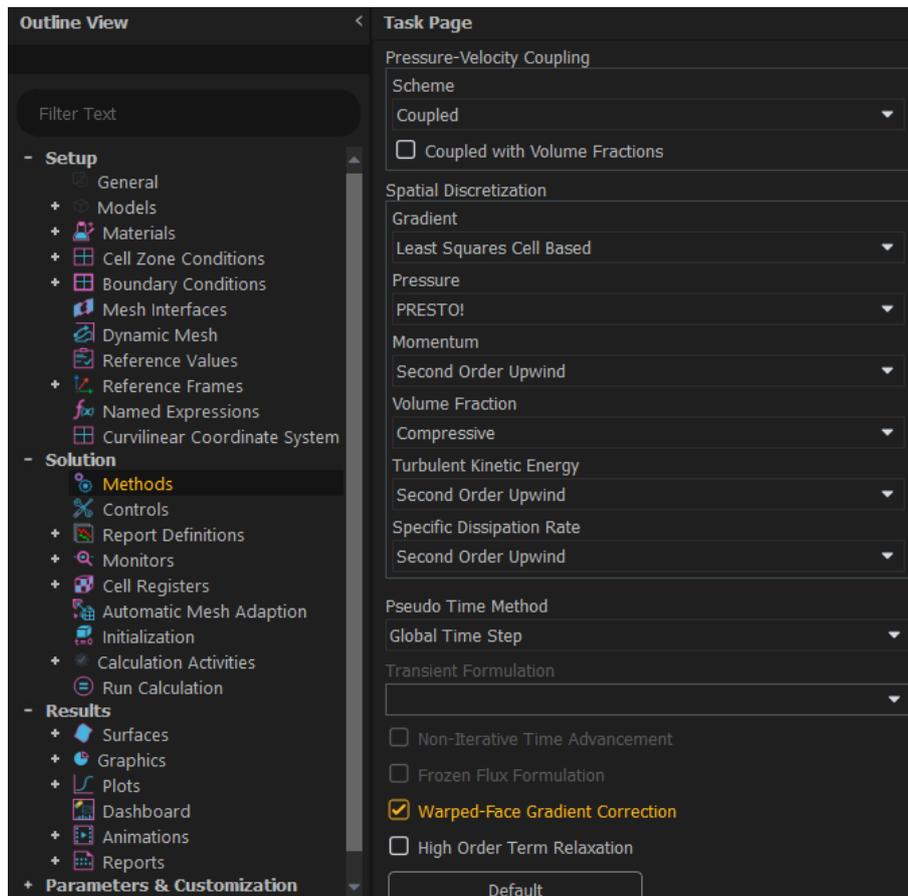
Roughness Height [m]: 0

Roughness Constant: 0.5

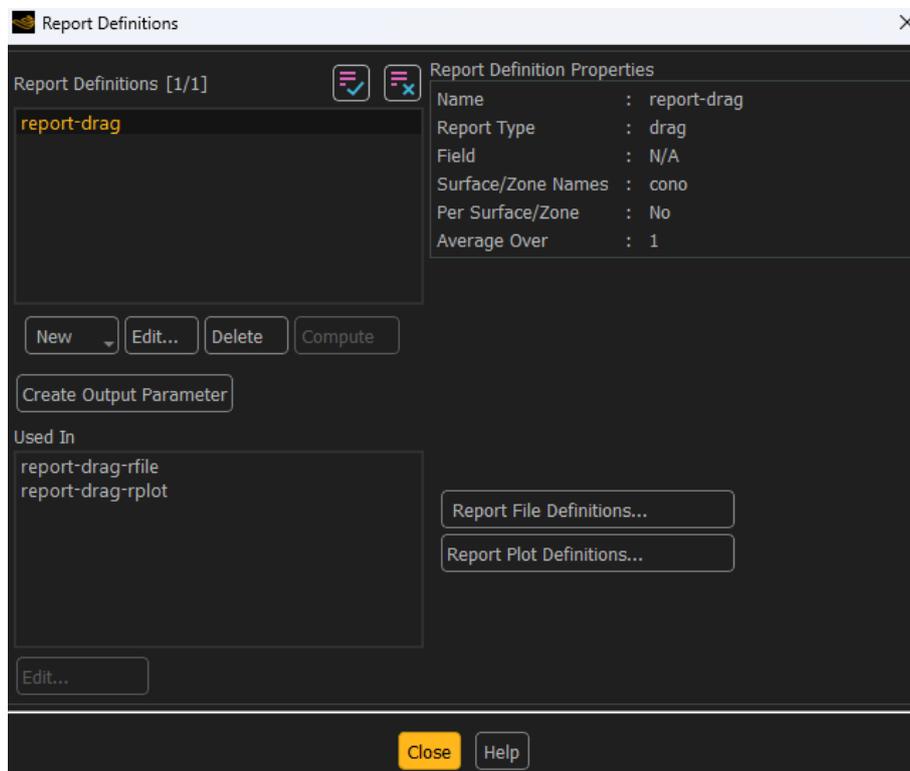
Apply Close Help

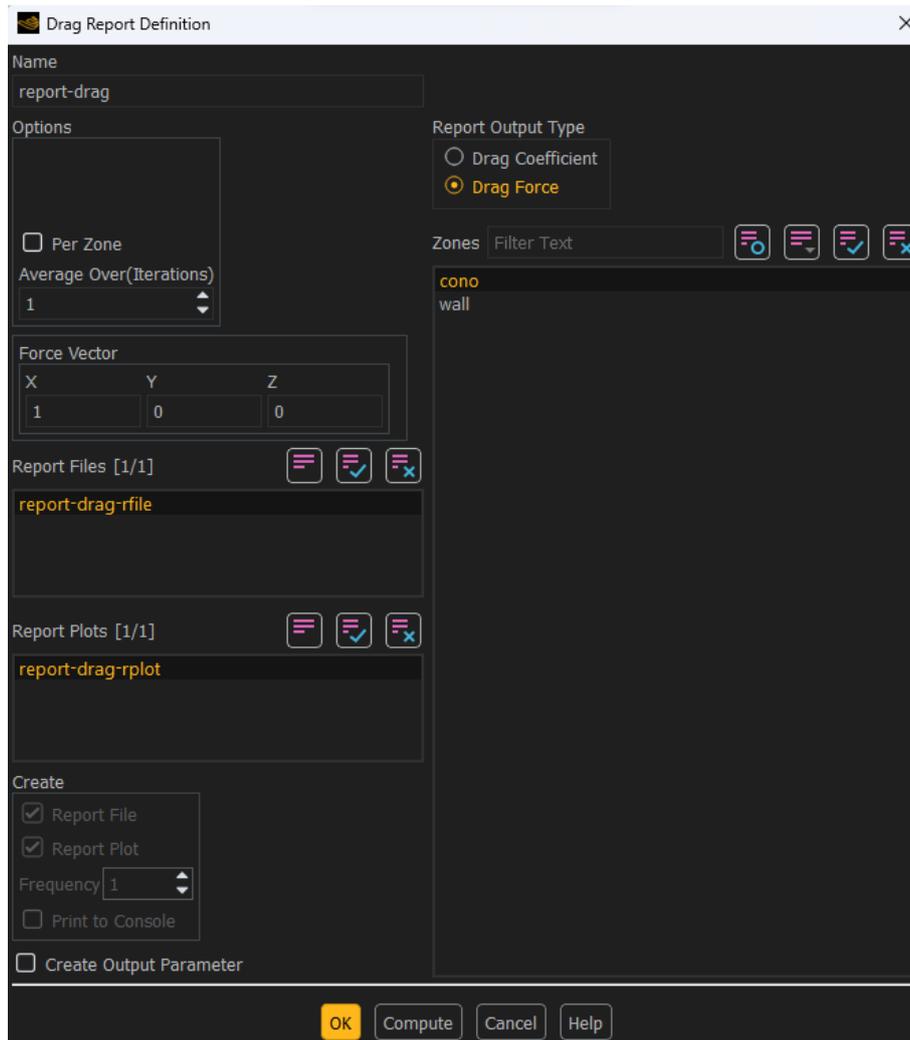


Sección de método de solución

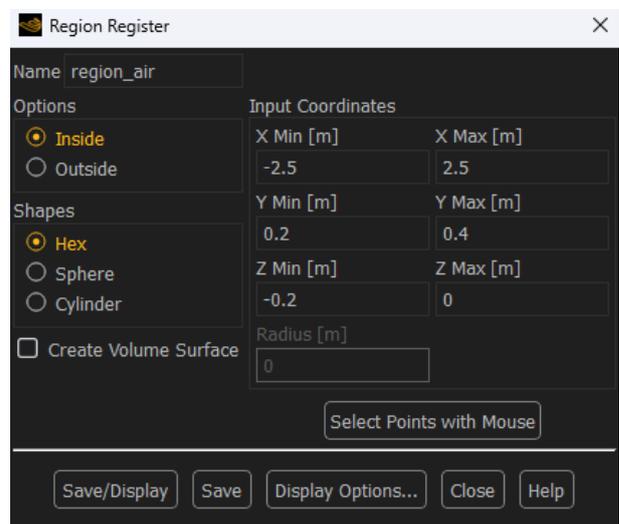
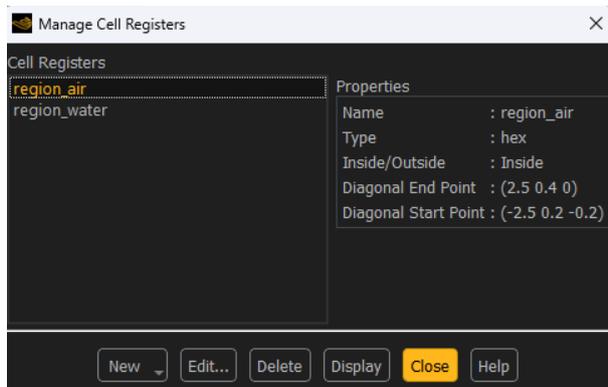


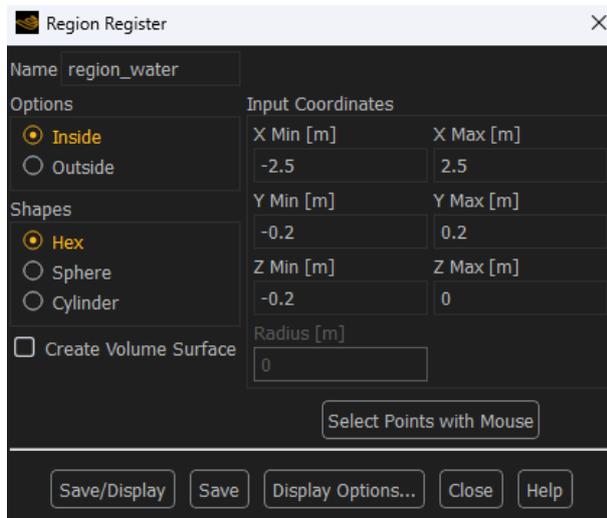
Sección de definición de reportes



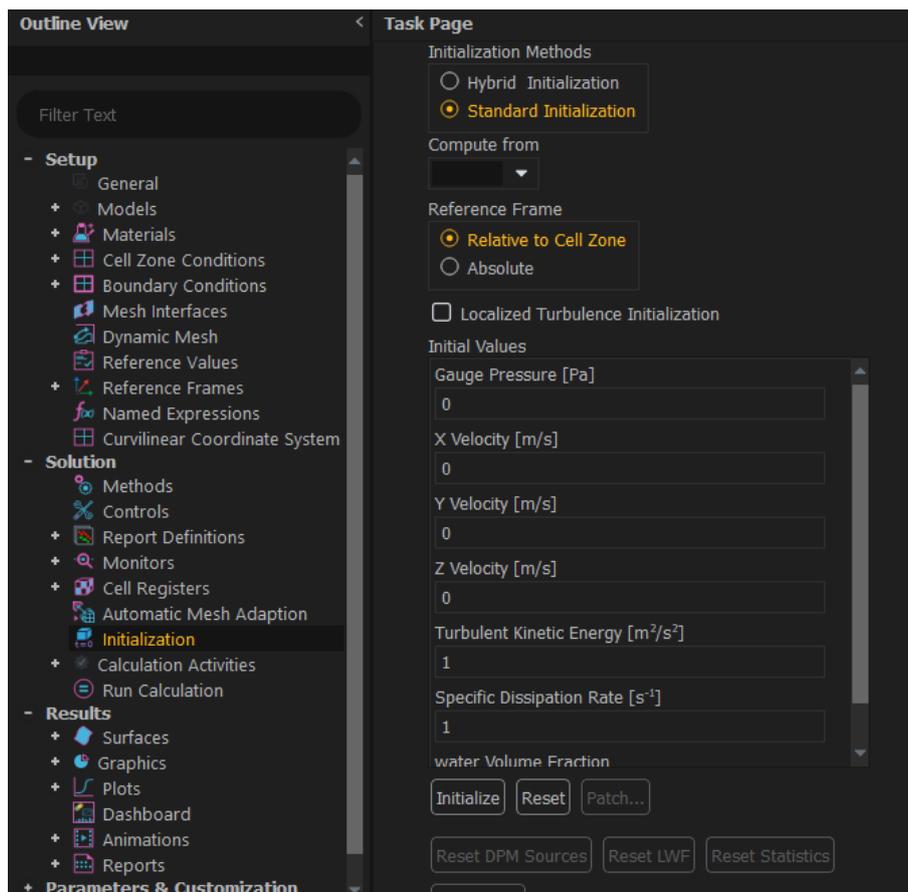


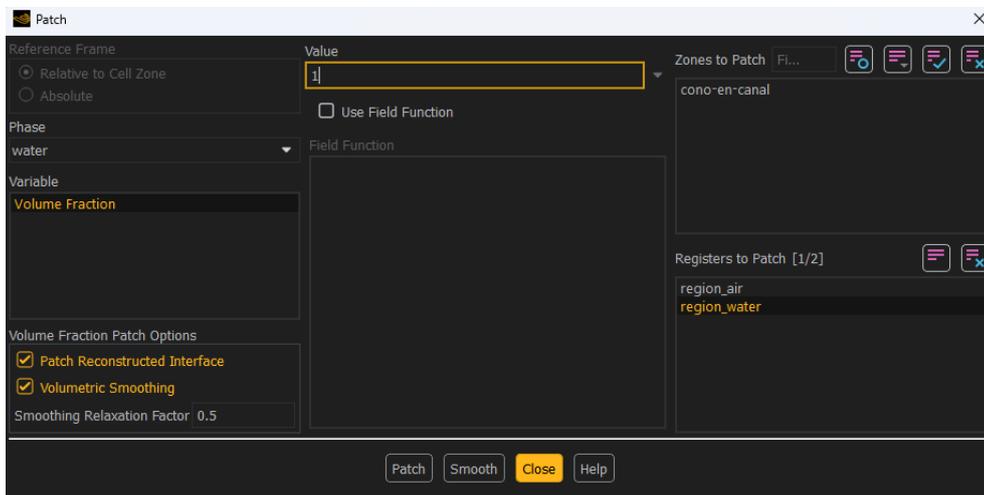
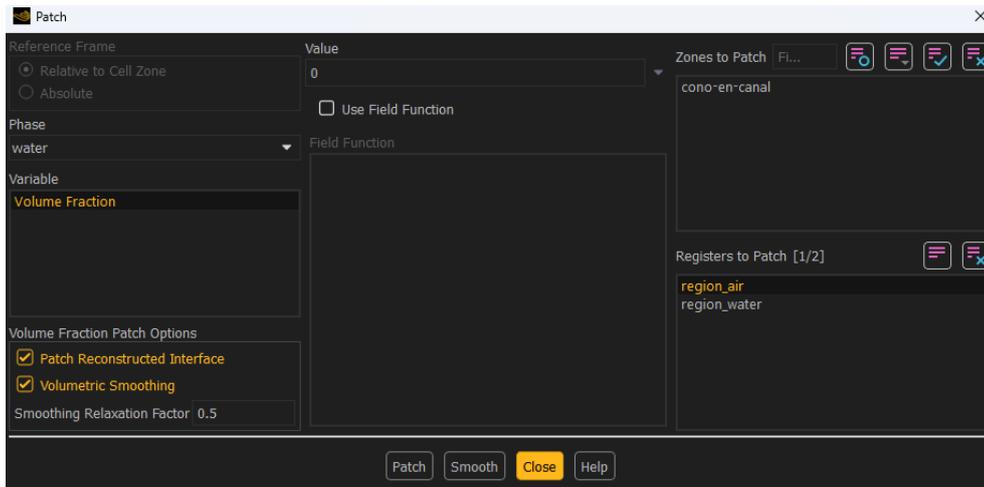
Sección de registro de celdas



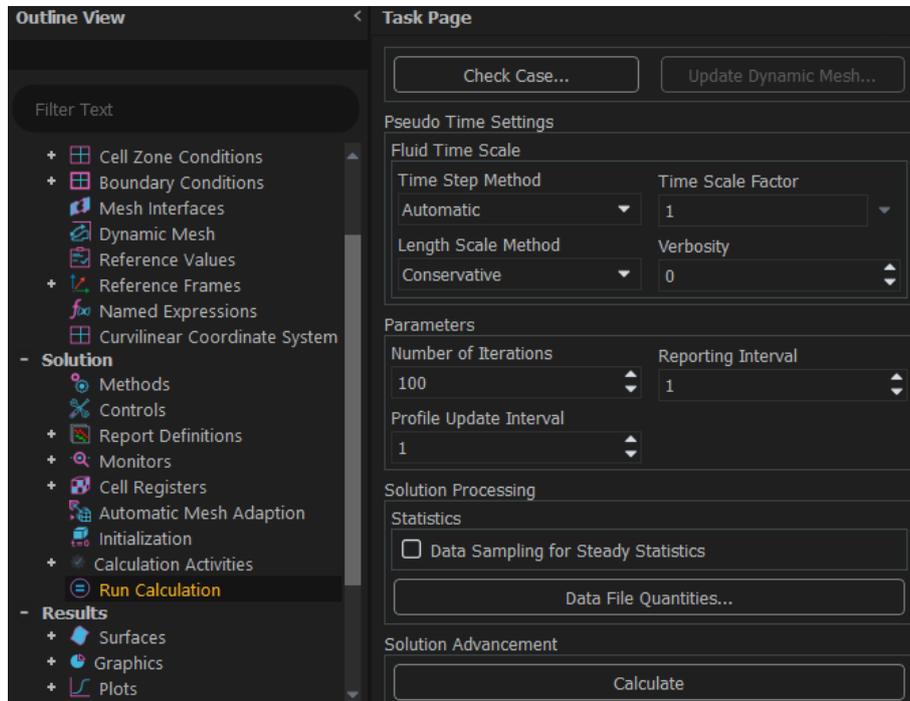


Sección de inicialización

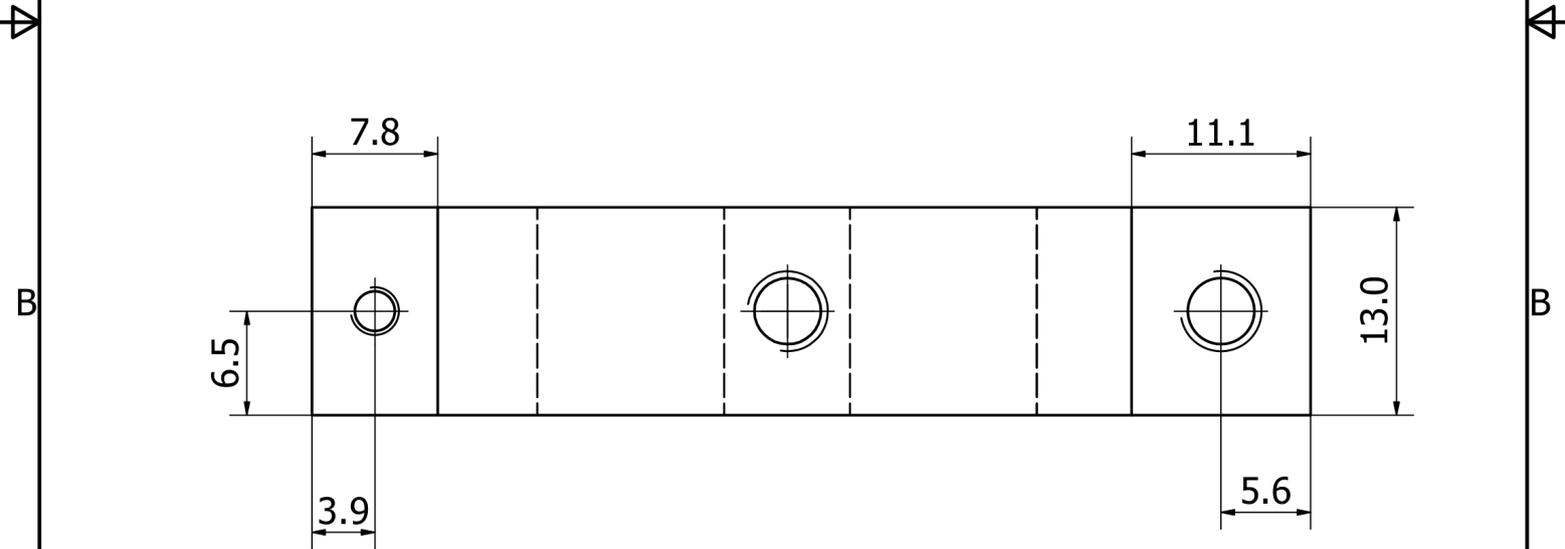
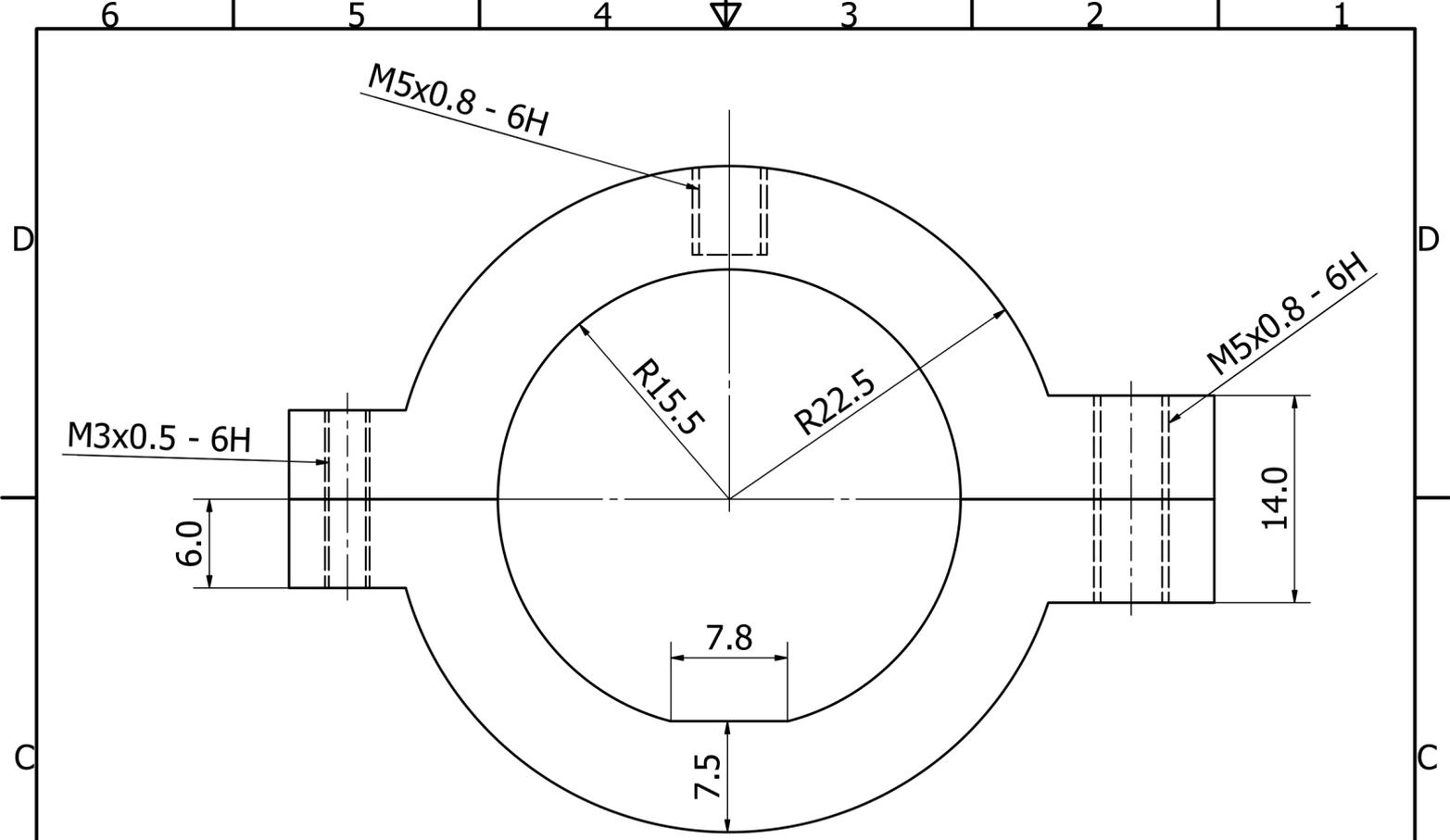




Sección de cálculo



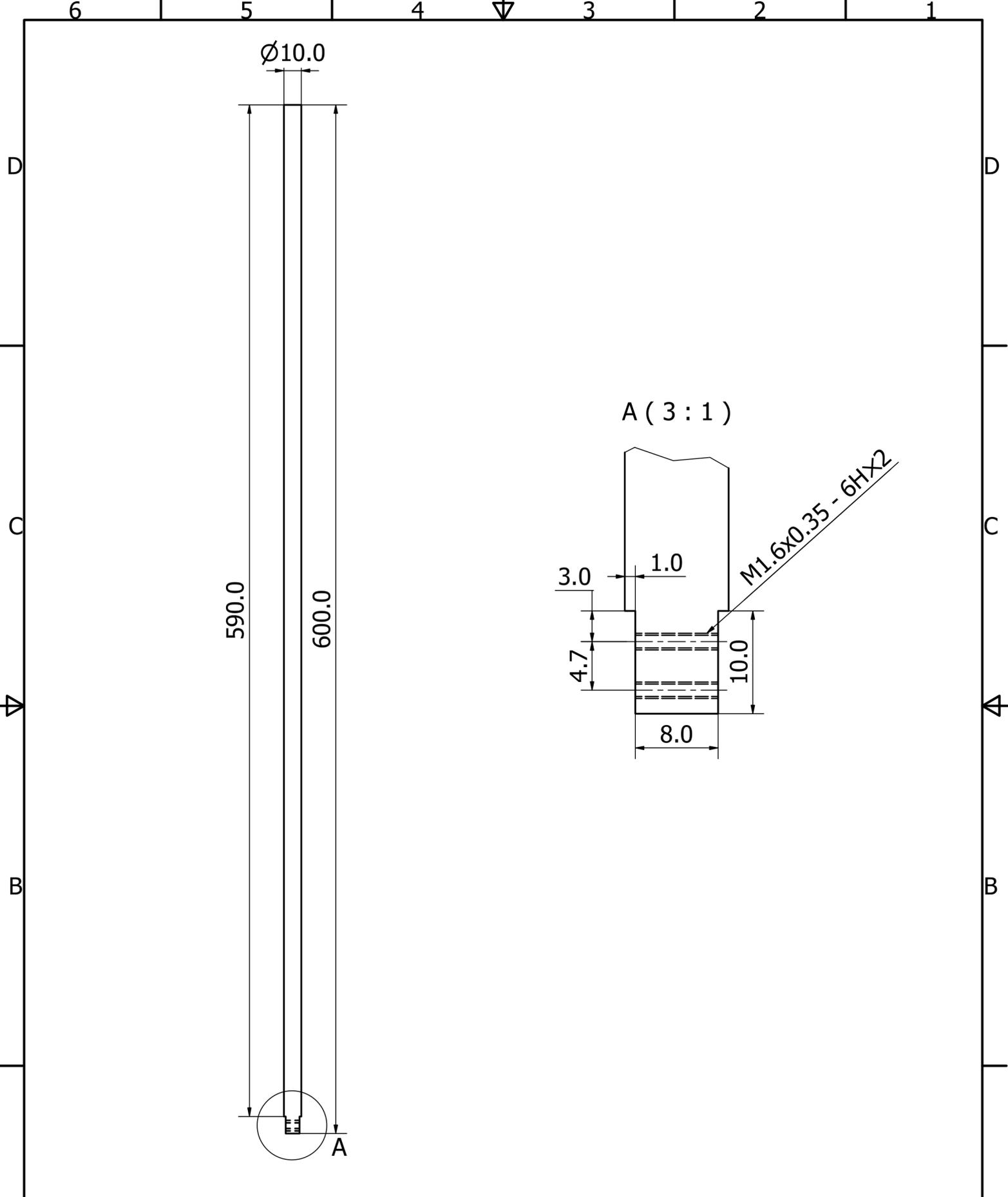
Apéndice B: Planos de Manufactura



Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 3 : 1	Material Poliamida
--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	--------------------	-----------------	-----------------------

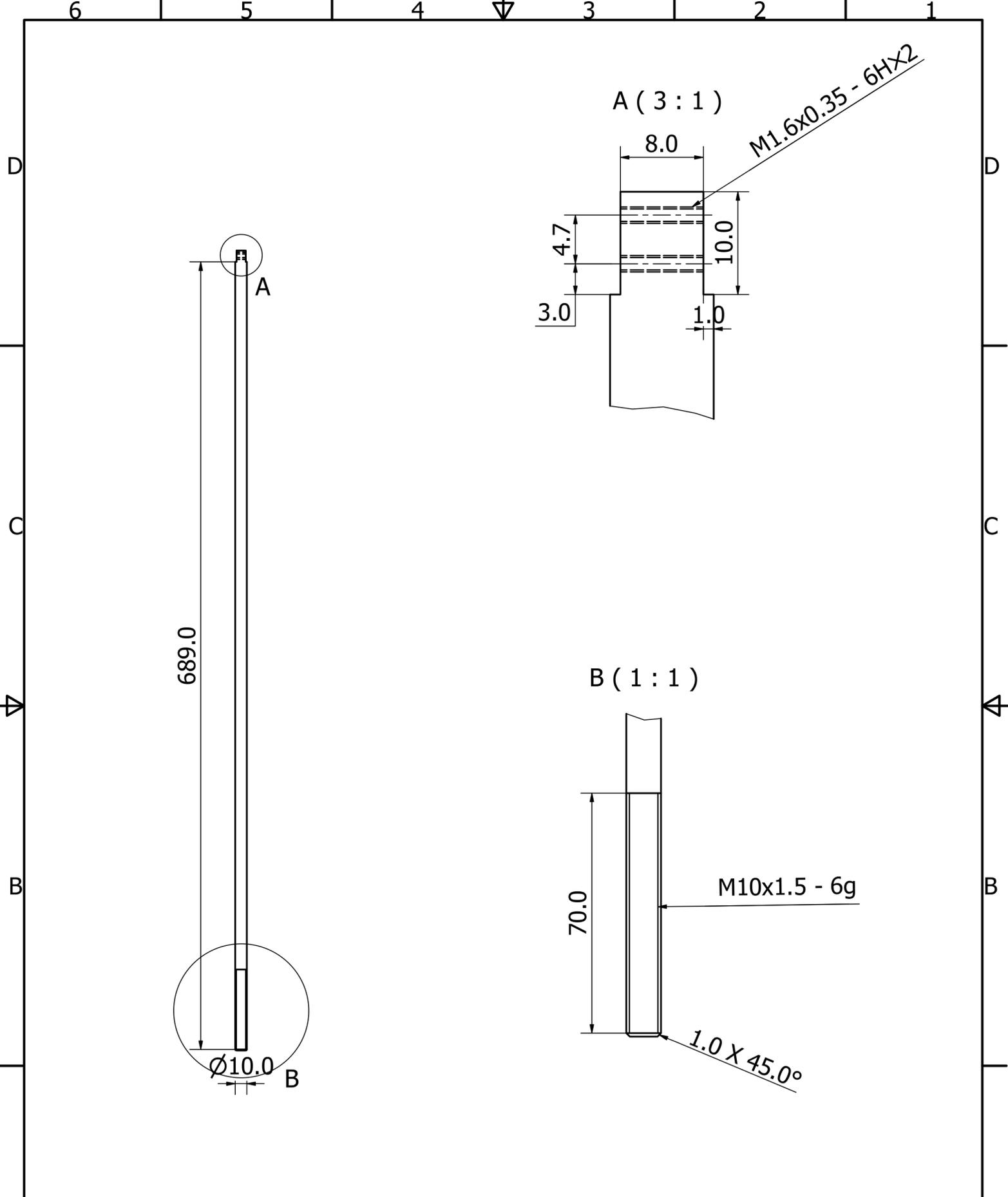
	Anillo de Tracción		
	Carro Remolque	Lámina 1	Hoja 1



Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 1 : 2	Material Acero inoxidable
--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	--------------------	-----------------	------------------------------

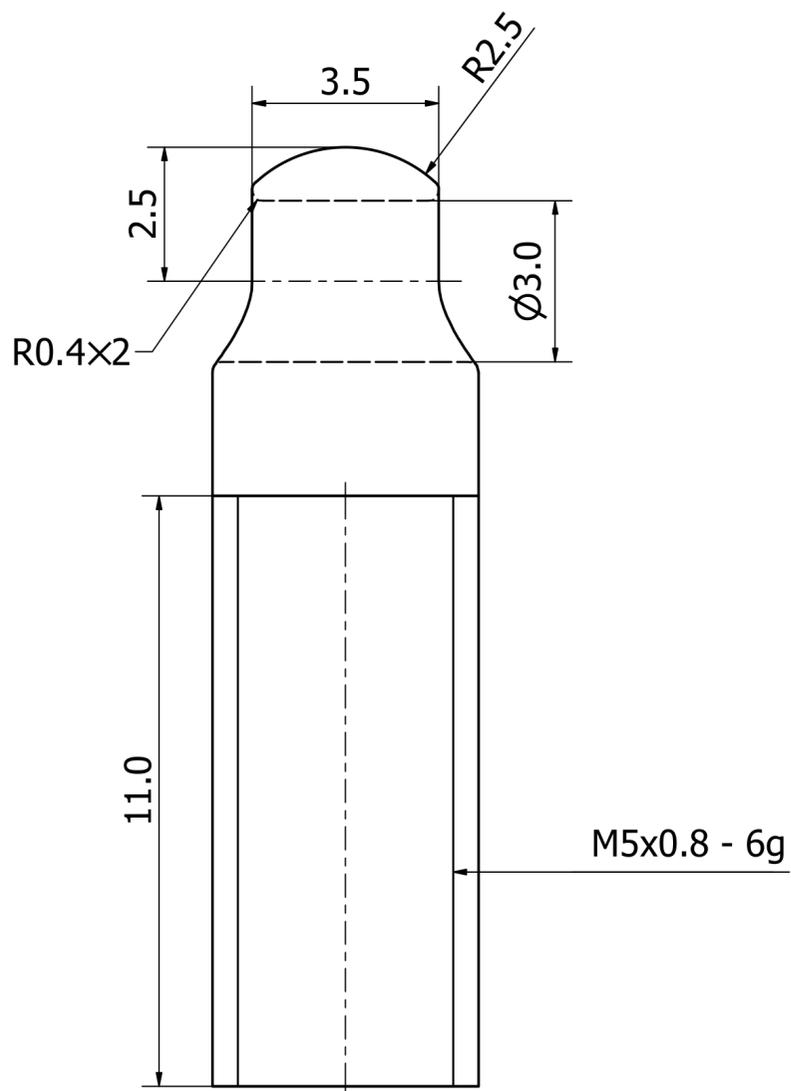
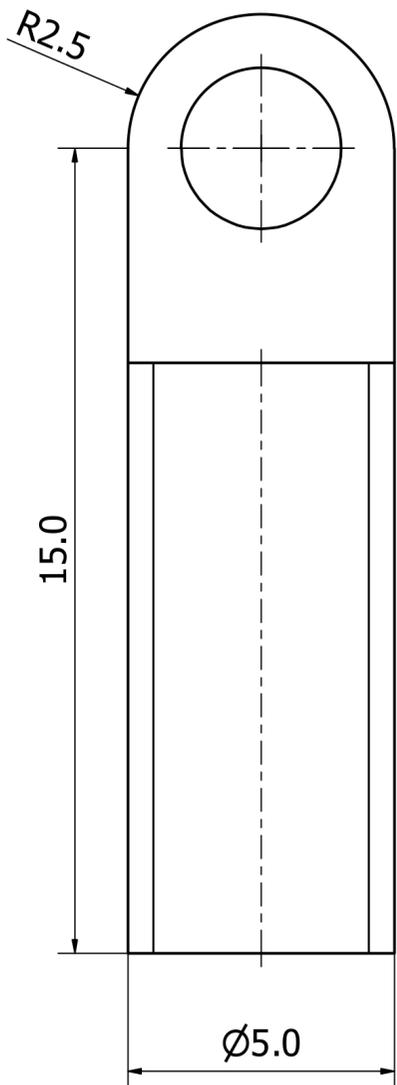
	Varilla Superior		
	Carro Remolque	Lámina 8	Hoja 1



Todas las medidas en mm.

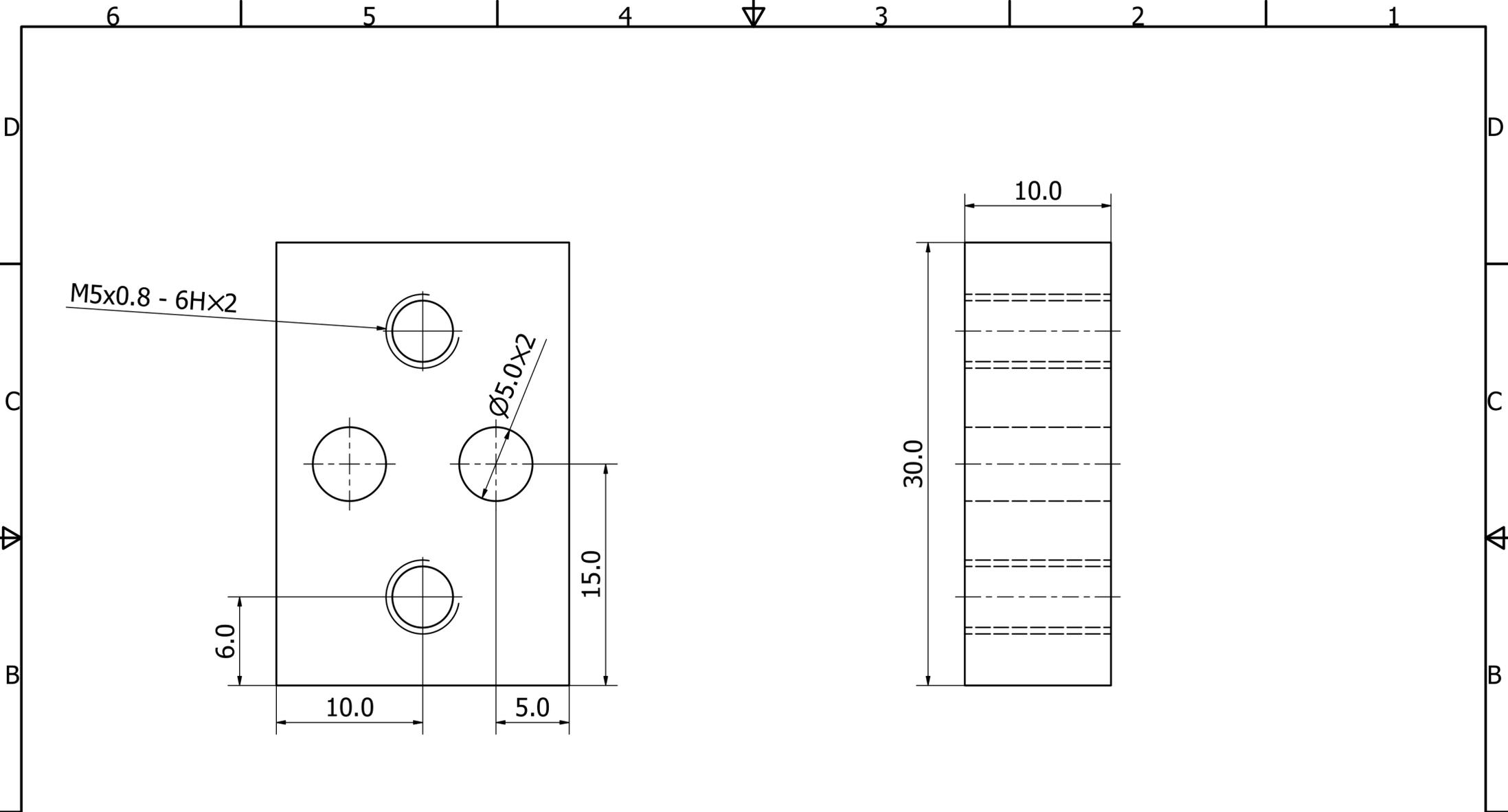
Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 1 : 3	Material Acero inoxidable
--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	--------------------	-----------------	------------------------------

	Varilla Inferior		
	Carro Remolque	Lámina 9	Hoja 1



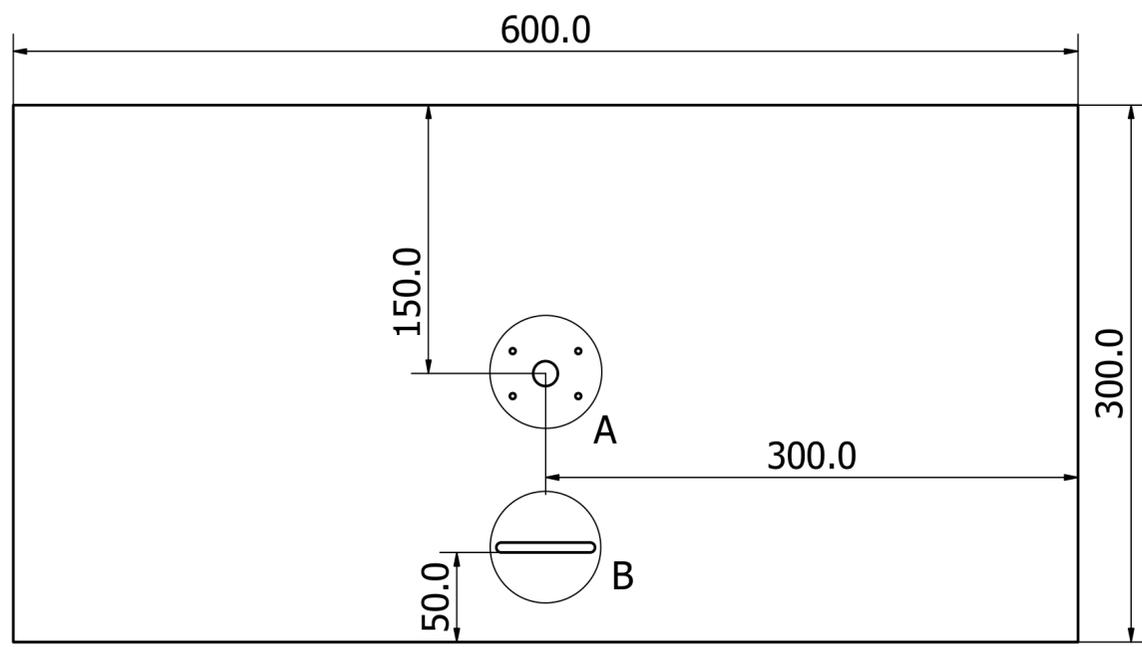
Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 10 : 1	Material Poliamida
			Guía de Cuerda		
			Carro Remolque	Lámina 11	Hoja 1



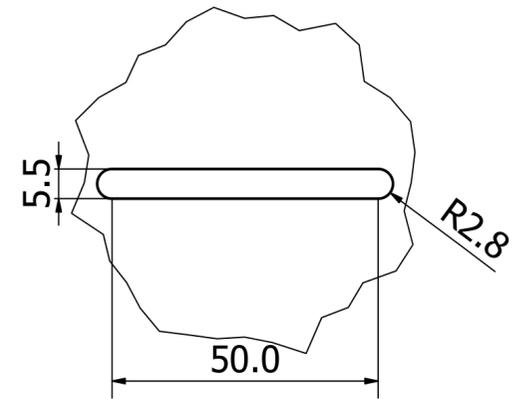
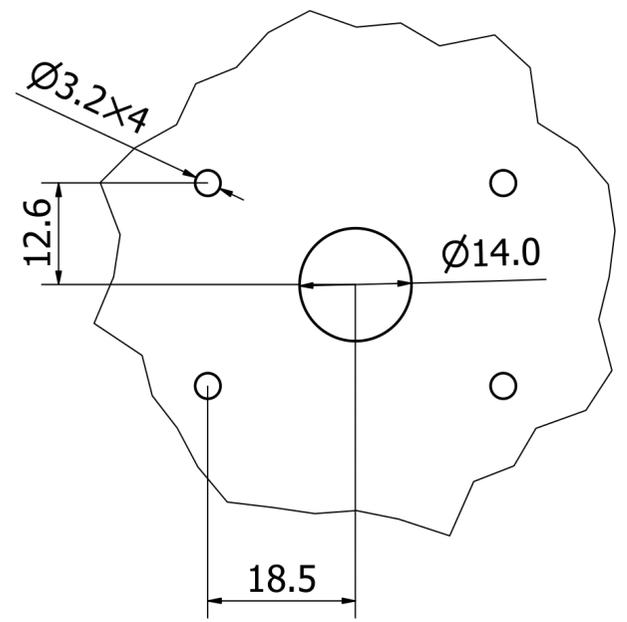
Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 4 : 1	Material Poliamida
			Base de Guías		
			Carro Remolque	Lámina 10	Hoja 1



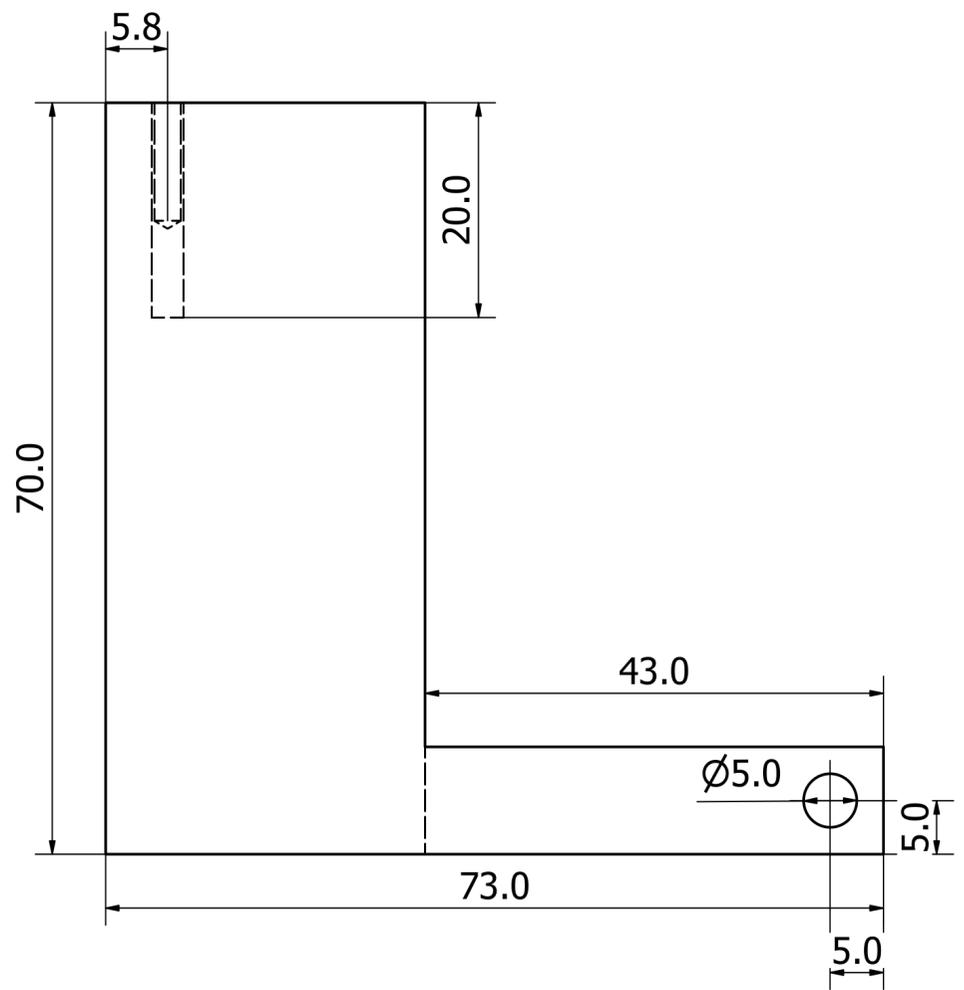
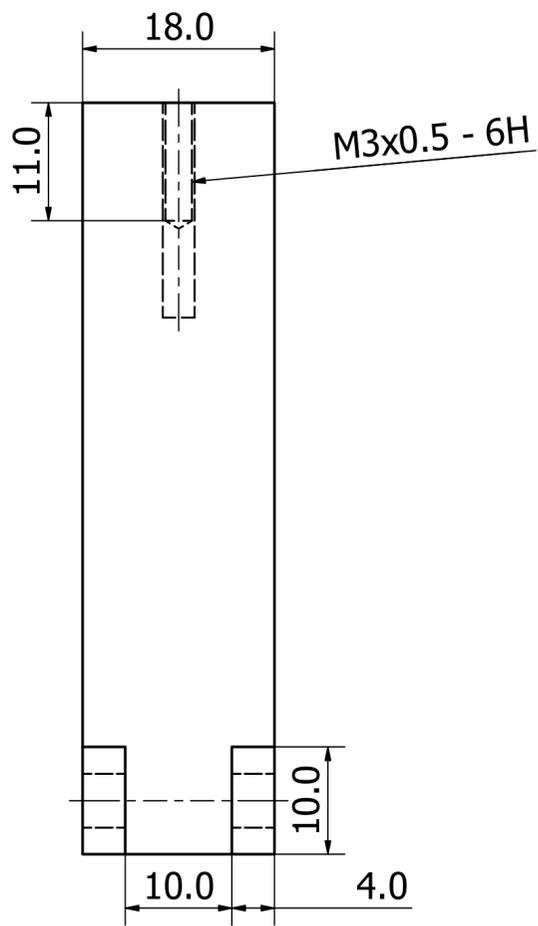
A (3 : 2)

B (1 : 1)



Todas las medidas en mm.
 Espesor constante de 2 mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 1 : 3	Material Acero inoxidable
			Plataforma de Motor		
			Carro Remolque	Lámina 12	Hoja 1



Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 2 : 1	Material Poliamida
--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	--------------------	-----------------	-----------------------

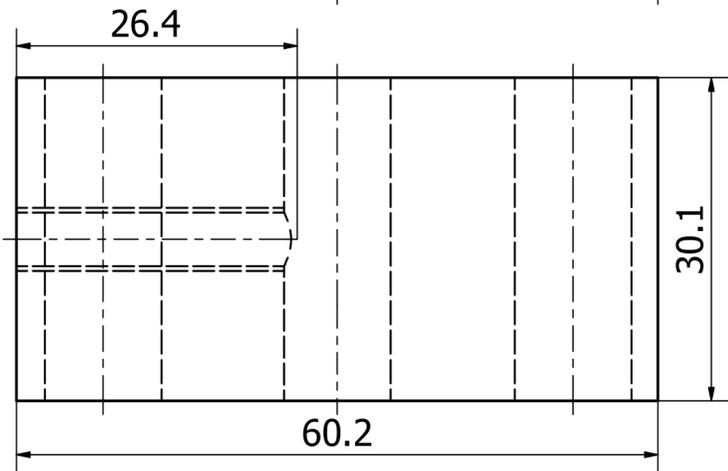
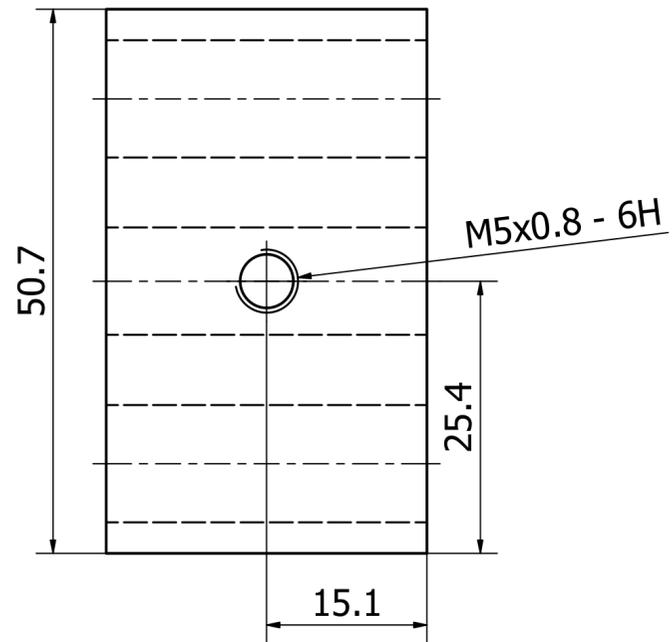
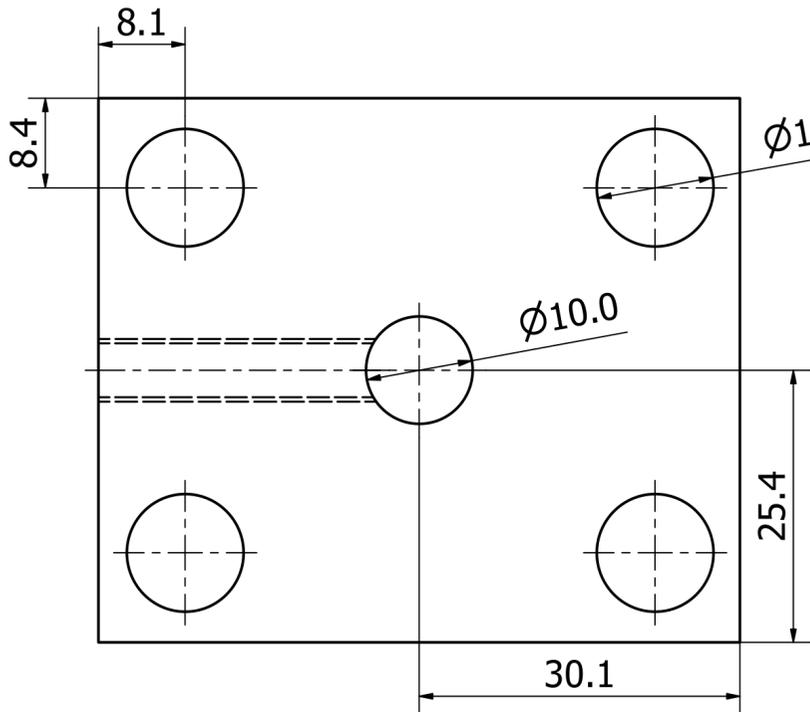
espol Escuela Superior
Politécnica del Litoral

Plataforma de FC51

Carro Remolque

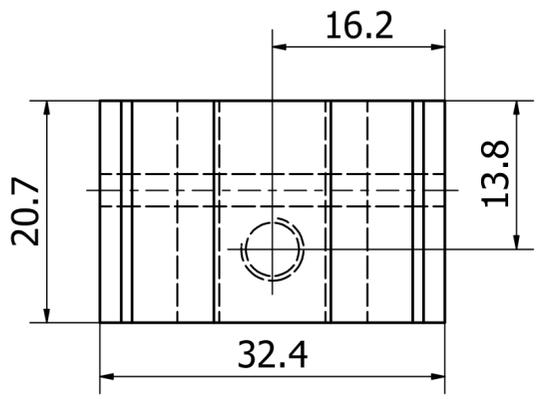
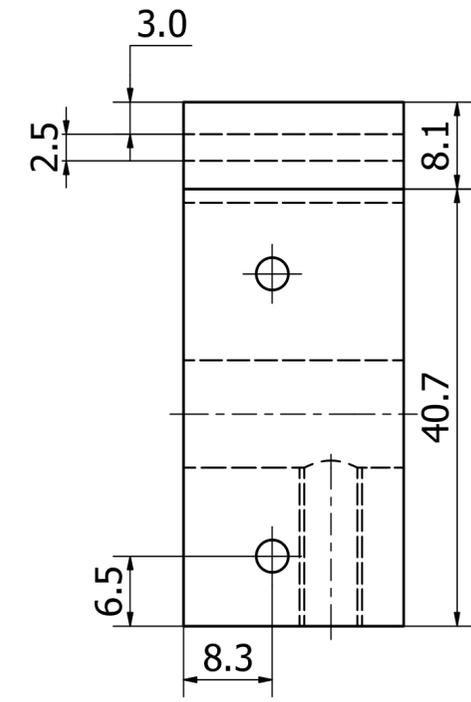
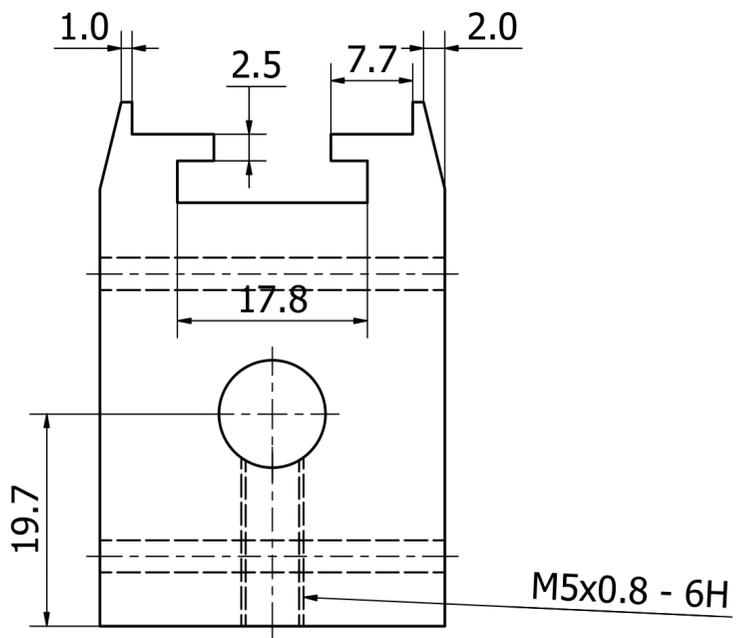
Lámina
3

Hoja
1



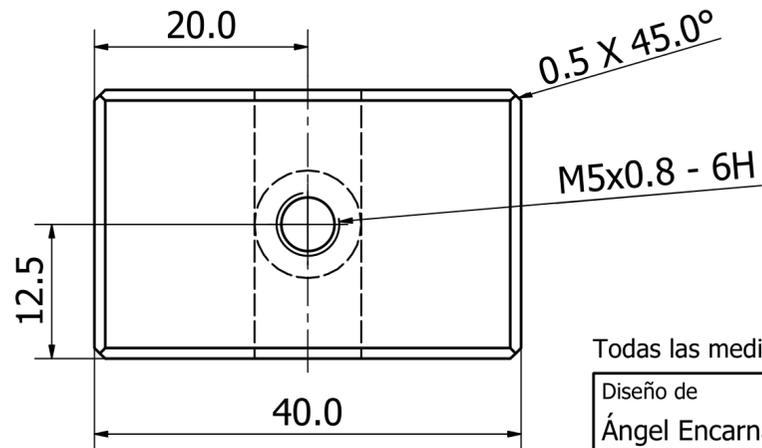
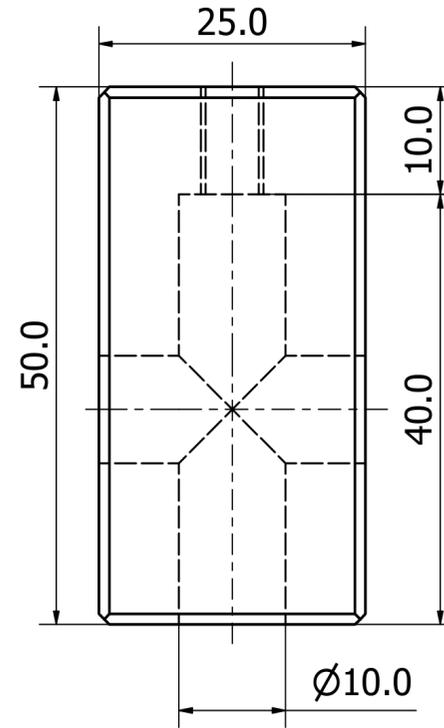
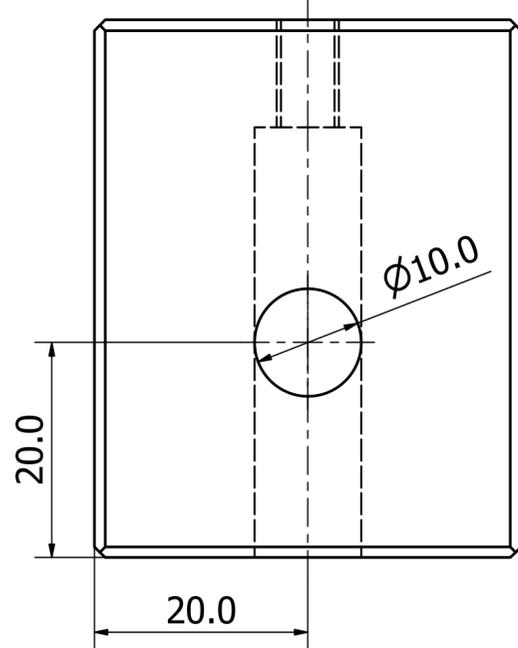
Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 2 : 1	Material Poliamida
			Soporte Inferior de Varilla		
			Carro Remolque	Lámina 5	Hoja 1



Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 2 : 1	Material Poliamida
			Soporte Superior de Varilla		
			Carro Remolque	Lámina 6	Hoja 1



Todas las medidas en mm.

Diseño de Ángel Encarnación	Dibujado por Daniel Barrera	Aprobado por PhD. Jorge Silva	Fecha 30/8/2023	Escala 2 : 1	Material Poliamida
			Sujeción de Modelo		
			Carro Remolque	Lámina 7	Hoja 1