



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Proyecto de graduación

DISEÑO DE UNA PLATAFORMA ACUÁTICA PARA EL
LANZAMIENTO DE COHETES DE ALTA POTENCIA
DENTRO DEL TERRITORIO COSTARRICENSE
CUMPLIENDO LOS REQUERIMIENTOS DE SEGURIDAD

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Angely Selenia Dittel Meza
Stephanie Rodríguez Vargas

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Abril de 2023

Hoja de tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.



Director de la Unidad Académica
Dr. Pietro Scaglioni Solano
Director Escuela de Ingeniería mecánica



Asesora directora
Ed.D. Leonora De Lemos Medina
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor interno
M.Sc. Sergio Ferreto Brenes
Escuela de Ingeniería Mecánica



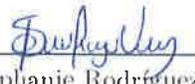
Asesor externo
Ph.D. Andrés Mora Vargas
Centro de Investigación AMES, NASA



Evaluador externo
M.Sc. Juan Gabriel Monge Gapper
Escuela de Ingeniería Mecánica



Ponente
Angely Selenia Diftel Meza



Ponente
Stephanie Rodríguez Vargas

Agradecimientos

A Javier Calderón Sánchez, por su apoyo en la comprensión de los conceptos de Ingeniería Naval.

Dedicatoria

A nuestras familias y las futuras generaciones entusiastas del aeroespacio.

Índice general

Hoja de tribunal	i
Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Índice de ilustraciones	vii
Índice de cuadros	viii
Siglas y abreviaturas	ix
Resumen	x
1. Introducción	1
1.1. Descripción general	1
1.2. Justificación	2
1.3. Antecedentes	3
1.4. Objetivos	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. Metodología general y recursos	6
1.6. Alcances y limitaciones	7
2. Marco teórico	9
2.1. Cohetes de alta potencia	9
2.1.1. Especificaciones de cohetes de alta potencia	9
2.1.2. Fundamentos teóricos de cohetería	9
2.1.3. Normativa internacional	12
2.2. Condiciones del entorno marino	13
2.2.1. Propiedades del agua	13
2.2.2. Fondo marino	14
2.2.3. Corrientes y mareas	14
2.2.4. Olas marinas	14
2.2.5. Olas regulares	15
2.2.6. Condiciones en Golfito	16
2.3. Anclaje	16
2.4. Hidrostática	19
2.4.1. Propiedades geométricas del casco	20
2.4.2. Principio de Arquímedes	21
2.4.3. Estabilidad	21
2.5. Hidrodinámica	24
2.5.1. Inercia añadida	25
2.5.2. Amortiguamiento	26
2.5.3. Fuerzas hidrodinámicas de excitación	27
2.5.4. Estrategias de control	28
2.6. Diseño mecánico	29

2.6.1.	Criterios de selección de materiales	29
2.6.2.	Resistencia de materiales	30
3.	Diseño preliminar	32
3.1.	Parámetros iniciales	32
3.2.	Análisis de flotabilidad	33
3.3.	Selección de materiales	33
3.4.	Diseño preliminar	34
3.5.	Prototipado	38
4.	Análisis de resultados	42
4.1.	Ensayo 1 Prototipo	42
4.1.1.	Ángulo de inclinación inicial	42
4.1.2.	Procesamiento de los datos	43
4.1.3.	Momento de amortiguamiento	44
4.1.4.	Momento restaurador	45
4.1.5.	Resultados del ensayo	45
4.2.	Estabilidad	47
4.3.	Modelo de la plataforma	48
4.3.1.	Momentos externos	49
4.3.2.	Respuesta del sistema plataforma	50
4.4.	Análisis de esfuerzos	53
5.	Diseño Biomimético	59
5.1.	¿Qué es biomímesis?	59
5.2.	Metodología	60
5.2.1.	Fase 1: Definición y contexto	61
5.2.2.	Fase 2: Transposición de la naturaleza	62
5.2.3.	Fase 3: Abstracción de los principios de diseño	66
5.2.4.	Fase 4: Emulación y evaluación	72
6.	Diseño Final	73
6.1.	Dimensiones finales	73
6.2.	Diseño de los flotadores	74
6.3.	Ancla	75
6.4.	Diseño de la estructura base	76
6.5.	Selección de la lanzadera	77
6.6.	Estimación de presupuesto	78
7.	Especificaciones de Uso	80
8.	Conclusiones	82
9.	Recomendaciones	84
	Referencias	90
	Anexos	91
	Anexo A.1. Diagramas de construcción	91
	Anexo A.2. Memoria de cálculo	115

Índice de figuras

1.1. Metodología de Diseño. [Elaboración propia]	7
2.1. Mapa de velocidades del agua en un ciclo de marea.	16
2.2. Línea de fondeo.[25]	18
2.3. Dimensiones de la cadena.[26]	19
2.4. Tipos de cascos. Adaptado de [27].	20
2.5. Grados de libertad del barco. Adaptado de [28].	21
2.6. Parámetros geométricos que afectan la estabilidad de la estructura [28].	22
2.7. Parámetros de la fórmula de Atwood. [30]	24
2.8. Características de la curva de estabilidad GZ. Adaptado de [30]	24
2.9. Decremento logarítmico en la respuesta de un sistema de un grado de libertad [31].	26
3.1. Diagrama preliminar de la plataforma [Elaboración propia]	35
3.2. Estructura base [Elaboración propia]	35
3.3. Sistema de remolque [Elaboración propia]	36
3.4. Elementos flotadores [Elaboración propia]	36
3.5. Ensamble completo del modelo preliminar [Elaboración propia]	37
3.6. Modelo del péndulo doble [Elaboración propia]	38
3.7. Prototipo a escala reducida.[Elaboración propia]	38
3.8. Ensamble del péndulo doble usado en el prototipo [Elaboración propia]	39
3.9. Vista inferior del péndulo doble [Elaboración propia]	39
3.10. Contrapesos fabricados para el prototipo [Elaboración propia]	40
4.1. Prototipo en posición de equilibrio. [Elaboración propia]	42
4.2. Ángulo de inclinación inicial.[Elaboración propia]	43
4.3. Dimensiones del flotador para el cálculo del ángulo inicial.[Elaboración propia]	43
4.4. Imagen binarizada para el rastreo de datos. [Elaboración propia]	44
4.5. Amortiguamiento del prototipo registrado en el ensayo.	44
4.6. Amortiguamiento en el modelo del prototipo a partir del ángulo inicial.	46
4.7. Ensayo 1 vs modelo matemático.	46
4.8. Momento restaurador respecto al plano longitudinal. [Elaboración propia]	47
4.9. Momento restaurador respecto al plano lateral. [Elaboración propia]	47
4.10. Amortiguamiento en el modelo de la plataforma.	49
4.11. Momento escorante en los cuatro escenarios de oleaje.	50
4.12. Respuesta del sistema en condiciones promedio.	51
4.13. Respuesta del sistema en condiciones de oleaje por embarcaciones grandes.	51
4.14. Respuesta del sistema en condiciones oleaje corto por viento.	52
4.15. Respuesta del sistema cuando la frecuencia del oleaje coincide con la del sistema.	53
4.16. Sección transversal del perfil	54

4.17. Geometría de la soldadura	56
4.18. Diagrama para el caso de cortante por flexión por carga distribuida	57
4.19. Diagrama para el caso de cortante por fuerza de remolque	57
5.1. Metodología de diseño biomimético [38]	60
5.2. Preguntas planteadas sobre las funciones de interés [Elaboración propia]	62
5.3. Victoria Longwood Hybrid en centro turístico “Los Chocuos”	66
5.4. Fotografías de algunas hojas recolectadas. [Elaboración propia]	67
5.5. Micrografías del tejido vegetal de la planta. (a) estomatodos (poros) en la hoja, (b),(c) y (d) geometrías y jerarquización del tejido parenquimático. [58]	68
5.6. Modelo de la geometría principal de la hoja. [60]	69
5.7. Probeta con sección transversal constante. [Elaboración propia]	70
5.8. Probeta con sección transversal variable. [Elaboración propia]	70
5.9. Deflexión en la probeta con sección transversal constante. [Elaboración propia]	71
5.10. Deflexión en la probeta con sección transversal variable. [Elaboración propia]	71
5.11. Matriz de resultados. [Elaboración propia]	72
5.12. Diseño preliminar de plataforma bio-inspirada. [Elaboración propia]	72
6.1. Renderizado de la Plataforma. [Elaboración propia]	74
6.2. Renderizado del flotador. [Elaboración propia]	75
6.3. Renderizado del ancla Danforth.[26]	76
6.4. Renderizado de la estructura base. [Elaboración propia]	77
6.5. Renderizado de la lanzadera. [Elaboración propia]	78

Índice de cuadros

2.1. Clasificación de motores. [13]	11
2.2. Dimensiones del lugar de lanzamiento. [11]	12
2.3. Especificaciones del anclaje según la eslora. [24]	17
2.4. Tipo de ancla recomendado según la composición del suelo marino. [25]	17
2.5. Alcance mínimo según el tipo de línea de fondeo seleccionada. [25]	18
2.6. Datos de dimensiones, carga de prueba y carga mínima de rotura.[26]	19
2.7. Tamaños de taco de amarre recomendados. [25]	19
2.8. Sistemas de estabilización [32]	28
3.1. Materiales usados para el prototipado.	39
4.1. Resumen del cálculo del coeficiente de amortiguamiento del prototipo.	45
4.2. Resumen del cálculo del momento restaurador del prototipo.	45
4.3. Resumen del cálculo del factor de amortiguamiento de la plataforma.	48
4.4. Resumen del cálculo del momento restaurador de la plataforma.	48
4.5. Resumen de datos de olas regulares para el cálculo de momento escorante en cuatro escenarios de oleaje.	50
4.6. Resumen del cálculo de esfuerzo por flexión en el perfil de la estructura base.	55
4.7. Resumen del cálculo de esfuerzos cortantes en el metal de aporte.	57
5.1. Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores	63
5.2. Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores. (Continuación del cuadro 5.1)	64
5.3. Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores. (Continuación del cuadro 5.2)	65
6.1. Dimensiones finales de la plataforma	73
6.2. Resumen de perfiles de la estructura base.	76
6.3. Costos estimados del diseño final de la Plataforma.	79

Siglas y abreviaturas

FAA Traducido del inglés, Administración Federal de Aviación.

GIA Grupo de Ingeniería Aeroespacial.

IMN Instituto Meteorológico Nacional.

IMARES Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios.

CIMAR Centro de Investigaciones del Mar.

NAR Traducido del inglés, Asociación Norteamericana de Cohetería.

NASA Traducido del inglés, Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio.

NFPA Traducido del inglés, Asociación Nacional de Protección contra el Fuego.

Resumen

Se presenta el Trabajo Final de Graduación que consiste en el diseño de una plataforma acuática para lanzamiento de cohetes de alta potencia. Los cohetes que serían lanzados son los que se operen con motores tipo H, I y J, estos requieren una distancia desde 0,5 km hasta 1,6 km de diámetro de seguridad. Se seleccionó la zona marítima de Golfito como lugar de lanzamiento, dado que cuenta con las características apropiadas en términos del espacio requerido y condiciones climáticas. Respecto a la estabilidad inicial, la altura metacéntrica de la plataforma es positiva en los planos de interés, por lo que se considera estable en ángulos de inclinación pequeños. Además, el momento restaurador tiene un máximo de 5 500 Nm y 6000 Nm en el plano longitudinal y lateral respectivamente. Este dato corresponde al momento escorante máximo permisible, que se puede aplicar de forma constante a la plataforma, para mantener la estabilidad en ángulos grandes de inclinación. Además, se realizó un prototipo a escala reducida para obtener datos del amortiguamiento del diseño de casco tipo pontoon seleccionado y poder valorar el comportamiento hidrodinámico de la plataforma con el fin de verificar el cumplimiento de los requerimientos de seguridad. A partir de modelo hidrodinámico, se obtuvo una frecuencia natural de 7,4 rad/s, factor de amortiguamiento de 0,43 y momento de amortiguamiento de 5 268,7 kg/m⁴ para el plano longitudinal y 5 466,7 kg/m⁴ para el plano transversal. Las oscilaciones de la inclinación de la plataforma modeladas a partir de los datos de olas regulares para oleaje promedio no superan los 5° y en las condiciones de oleaje por efecto del viento, se alcanzan 12° de inclinación, por tanto, se cumplieron los requisitos de seguridad establecidos en la normativa. El diseño final de la plataforma junto con la lanzadera tiene una masa total de 503 kg. Se propone utilizar como material para la fabricación aleaciones de aluminio de grado marino, específicamente las aleaciones AL6083 y AL5083 que se comercializan en el país.

Abstract

This Final Graduation Project consists in the design of an aquatic platform for high power rocket launching. The rockets to be launched are those operated with H, I and J type engines, these require a distance from 0.5 km to 1.6 km of safety diameter. The Golfito maritime area was selected as the launch site since it has the appropriate characteristics in terms of space requirements and climatic conditions. Regarding the initial stability, the metacentric height of the platform is positive in the axis of interest, so it is considered stable at small tilt angles. Furthermore, the restoring moment has a maximum of 5 500 Nm and 6000 Nm in the longitudinal and lateral axis respectively. This corresponds to the maximum permissible heeling moment, which can be constantly applied to the platform, in order to maintain stability at large tilt angles. In addition, a reduced scale prototype was made to obtain the damping factor of the selected pontoon hull design and to assess the hydrodynamic behaviour of the platform in order to verify compliance with safety requirements. From the hydrodynamic model, a natural frequency of 7.4 rad/s, a damping factor of 0.43 and a damping moment of 5 268.7 kg/m⁴ for the longitudinal axis and 5 466.7 kg/m⁴ for the transverse axis were obtained. The oscillations of the platform inclination modelled from the regular wave data for average waves do not exceed 5° and in wind wave conditions, 12° of inclination is reached, therefore the safety requirements were fulfilled. The final design of the platform together with the shuttle has a total mass of 503 kg. It is proposed to use, as the material for the fabrication, marine grade aluminium alloys, specifically AL6083 and AL5083 alloys which are commercially available in the country.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción general

La exploración espacial siempre ha sido una fuente de curiosidad para el ser humano, pero más allá de eso, los beneficios que otorga a la humanidad son incontables. Popularmente se tiende a pensar que es necesario dejar de invertir en tecnología espacial y buscar soluciones a los problemas de la Tierra, sin embargo la realidad es todo lo contrario, la tecnología espacial ayuda a mitigar muchos de los problemas a los que nos enfrentamos hoy en día, como el cambio climático o un desastre global. Un ejemplo de esto es el sistema de filtrado de agua que se usa en la NASA para los viajes espaciales, es el mismo sistema que se usa en diferentes partes del planeta para ayudar a acceder a este recurso tan importante para el humano de manera segura. Y así, se podrían listar otras tecnologías que se han desarrollado con el fin de resolver los retos que impone el ambiente espacial, como la comunicación, la protección solar, las "quijadas de la vida" que se diseñaron para separar el transbordador espacial de sus propulsores de refuerzo y ahora se usa para salvar vidas en accidentes automovilísticos. Pero no es únicamente esto, también se aporta a la investigación de tratamiento de enfermedades como el cáncer gracias a las condiciones de microgravedad en naves espaciales, donde se puede observar los efectos tridimensionales de la interacción de las células cancerígenas con células sanas.

Si bien es cierto, hay varios países con un mayor desarrollo e historia en el uso de tecnología aeroespacial, pero son cada vez más los que están empezando a incursionar en esta área del saber y Costa Rica no es la excepción. El Grupo de Ingeniería Aeroespacial de la Universidad de Costa Rica (GIA) ha trabajado en el desarrollo de tecnologías relacionadas al sector aeroespacial y más que todo al tema de cohetes. Los cohetes son vehículos diseñados para facilitar el viaje fuera de la atmósfera terrestre y transportar carga útil; sin embargo, también existen los lanzamientos sub orbitales o a órbita baja, que es el enfoque inicial del GIA. El presente documento se ha concentrado en el desarrollo de un dispositivo que facilite estos lanzamientos de cohetes de alta potencia, ya que se debe cumplir con varios requisitos de seguridad, como un perímetro libre a la redonda y en el país contamos con muchas áreas silvestres protegidas y mucha riqueza natural en flora y fauna que debemos proteger y preservar. Se desea hacer uso del amplio territorio marítimo con el que cuenta el país y ser un primer acercamiento al desarrollo de este tipo de alternativas para futuros proyectos que se deseen desarrollar en el país.

En este proyecto realizó el diseño de una plataforma marítima en la cual se pueda instalar una lanzadera para cohetes de alta potencia, que sea de fácil transporte a la zona de lanzamiento y que cumpla con los requerimientos de seguridad que salvaguarden la

integridad de todos los seres vivos. Este análisis abarcó la evaluación de la estabilidad de la plataforma, la selección de los materiales, el diseño mecánico y el comportamiento dinámico de la lanzadera en el entorno marino, el cual es poco predecible y está en constante movimiento.

1.2. Justificación

La implementación de plataformas para lanzamientos marítimos presenta ventajas importantes respecto a los lanzamientos en Tierra, dentro de estas destacan las siguientes: disminución de riesgos relacionados con el lanzamiento en áreas pobladas, baja probabilidad de interferencia con otros sistemas de lanzamiento y con el tráfico aéreo, reducción de daños ocasionados por fallas durante el despegue y en los primeros minutos de vuelo sobre bienes públicos y privados, y permite localizar el lanzamiento del cohete en órbitas ecuatoriales lo cual mejora el rendimiento del lanzamiento y, por lo tanto, del cohete y ahorro de combustible.

La creación de este proyecto habilita una puerta adicional en el desarrollo de la ingeniería aeroespacial en Costa Rica, el cual ha tomado presencia en los últimos años. El cluster aeroespacial costarricense ha sido reconocido por la capacidad de impulsar el desarrollo de esta industria en el país, un ejemplo de esto han sido sus colaboraciones a proyectos universitarios desarrollados por estudiantes del GIA, en los cuales han representado a la Universidad de Costa Rica en concursos internacionales. A nivel académico este desarrollo brinda grandes oportunidades, ya que es una área con gran potencial de investigación que trae consigo temas novedosos que fomentan la creación de proyectos interdisciplinarios entre carreras tecnológicas y científicas, que a su vez tienen gran impacto internacional. Además, se proyectan beneficios económicos para el país, dado que fomenta un mercado en suplementos aeroespaciales, servicios a las industrias y alianzas estratégicas.

Actualmente, gracias a los esfuerzos llevados a cabo por el Grupo de Ingeniería Aeroespacial con el desarrollo de campamentos aeroespaciales y la manufactura de cohetes, se han logrado realizar lanzamientos en el territorio costarricense, lo cual ha generado una base de conocimiento en esta área y da paso a la necesidad de encontrar un lugar adecuado para realizar los lanzamientos sin poner en riesgo la integridad de personas, animales y bienes inmuebles. Al ser Costa Rica un país pequeño, a lo largo de su territorio es muy fácil encontrar asentamientos de poblados en pocos kilómetros de trayecto, lo cual imposibilita contar con un perímetro adecuado, según las normas de seguridad, en el cual se puedan realizar lanzamientos seguros. Con el desarrollo de este proyecto final de graduación se busca suplir esta necesidad y aportar un beneficio que impulse el crecimiento del grupo y el desarrollo aeroespacial del país.

Un evento motivador en la creación de este proyecto fue la aprobación de la ley que establece la creación de la Agencia Espacial Costarricense. Esta agencia trae grandes beneficios para el país y el desarrollo tecnológico en este ámbito, y particularmente para esta iniciativa por la posible vinculación de este proyecto con otros proyectos afines a nivel nacionales e internacional. Se ha mencionado en reiteradas ocasiones que Costa Rica es un país con potencial para lanzamientos de mayor escala, por ejemplo en aplicaciones como satélites sub orbitales. Sin embargo, la altura que este tipo de cohetes alcanzan está relacionada con la dimensión del cohete, la plataforma y el dispositivo de lanzamiento, este tamaño se ve limitado por la ausencia de un espacio geográfico amplio y seguro. Bajo esta premisa, el proyecto brinda una solución aplicable, ya que se pretende aumentar la altura

de los lanzamientos con el diseño de la plataforma marítima. Además, se espera que esta propuesta forme parte de una base teórica y técnica para fomentar lanzamientos de este tipo en un futuro próximo.

1.3. Antecedentes

En los años 30, entre la I y la II Guerras Mundiales existieron clubes de entusiastas de los cohetes en países como Alemania, Estados Unidos, Rusia, entre otros. En estos clubes se diseñaban cohetes experimentales, se probaban y en ocasiones se hicieron volar. Algunos cohetes usaban propelente líquido y otros combustible sólido. Sin embargo, fue en Alemania donde Hermann Oberth, un rumano, se dio a la tarea de promover la idea de los vuelos espaciales. En 1930 este probó con éxito un motor de combustible líquido con una tobera cónica que desarrollaba un empuje de 70 N, ya para 1932 volaban cohetes con motores de 600 N. [1]

En esta época, el ejército alemán había dado inicio al desarrollo de cohetes para su propio uso, los cohetes militares eran más ambiciosos. Fue así como un grupo de ingenieros y científicos alemanes, incluido Hermaan Oberth y liderado por Wernher von Braun, uno de los ingenieros más influyentes en la cohetaría, se dieron a la tarea de construir uno de los cohetes más avanzados de la época, el V-2, un cohete de 12 toneladas con un empuje de 250 000 N, con 1 tonelada de carga útil y un alcance de 300 km. [1]

Después de la II Guerra Mundial, Estados Unidos y la Unión Soviética notaron el gran potencial de los cohetes para usarse como arma militar, y dieron inicio a una serie de programas experimentales. Una de las primeras ideas de Estados Unidos fue un programa de cohetes con sondeo atmosférico, los primeros pasos del proyecto Goddard. En el año 1957, la Unión Soviética ponía en órbita el Sputnik I, un satélite artificial, esta fue la primera entrada exitosa en una carrera por el espacio entre ambas potencias. Menos de un mes después, los soviéticos lanzaron un nuevo satélite, esta vez, llevaba a bordo a una perra llamada Laika. Unos meses después, Estados Unidos lanzó su propio satélite, El Explorer I fue lanzado por el Ejército de los Estados Unidos en 1958 y en octubre de ese año, organizaron oficialmente su programa espacial, fundando la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), agencia civil con el objetivo de la exploración pacífica del espacio en beneficio de toda la humanidad. Muchas personas y máquinas fueron lanzadas al espacio, enviando humanos a la Luna y robots a explorar otros planetas, los satélites han permitido a los científicos realizar investigaciones, pronosticar el clima y ser medios de comunicación instantánea, el espacio se abría repentinamente a la exploración y explotación comercial. [2]

A medida que la carrera por el espacio crecía, se tuvo que construir una amplia gama de cohetes más potentes y versátiles, evolucionando desde simples dispositivos de pólvora, hasta vehículos capaces de viajar al espacio exterior, transportando desde objetos hasta personas, abriendo al mundo todo un universo por explorar. [2] La trayectoria de la exploración espacial es un hito importante para la humanidad, el desarrollo de la cohetaría y los alcances que se han logrado con estos han traído grandes beneficios para la vida en el planeta Tierra y para el avance en ciencia y tecnología. Cada vez son más las iniciativas que se llevan a cabo por diferentes organizaciones para formar parte de la exploración espacial y cada vez son más las naciones que se incursionan en esta área, entre ellas Costa Rica.

A nivel nacional, durante los últimos 10 años se ha impulsado y fomentado el desarrollo de la industria aeroespacial. En el 2016 se crea el Costa Rica Aerospace Cluster (CRAC), nombre destinado al conjunto de 25 empresas en sectores como electrónica, metalmeccánica y diferentes servicios especializados, que tiene como iniciativa posicionar al país en soluciones del campo aeroespacial, desarrollar competencias de alto nivel, ejercer labores estratégicas entre el estado, la empresa privada y las universidades estatales, y financiamientos para potenciar el crecimiento en el área. [3]

En el año 2014 se creó el Grupo de Ingeniería Aeroespacial (GIA) de la Universidad de Costa Rica. Este grupo tiene como objetivo impulsar el conocimiento aeroespacial en el país y organizar proyectos de carácter social. Gran parte de las actividades son para estudiantes de la UCR, sin embargo, algunas también son dirigidos a estudiantes de secundaria que presenten interés por el campo aeroespacial, por ejemplo los Campamentos Aeroespaciales que se llevaron a cabo en el 2015 y 2016, y diferentes talleres y charlas de coherencia impartidos en escuelas y colegios de regiones fuera de la gran área metropolitana. El grupo ha desarrollado proyectos relacionados al diseño de cohetes y ha logrado realizar lanzamientos durante los campamentos aeroespaciales, convirtiéndose en la primera agrupación nacional en llevar a cabo este tipo de actividades. Sin embargo, le ha sido difícil encontrar un lugar lo suficientemente adecuado para realizar lanzamientos seguros y pruebas con los cohetes y motores desarrollados, que cumplan con las normativas de seguridad.

Un ejemplo de esto fue lo ocurrido en el 2016, según lo relatado por la Directora del GIA UCR, Leonora de Lemos, cuando se quería realizar un lanzamiento en la zona de Liberia por parte de un grupo de investigadores de la Universidad de los Andes de Colombia en colaboración con el GIA. Durante esta actividad hubo interferencia indirecta con el tráfico aéreo, *“el cohete que se planeaba lanzar tuvo una falla y explotó en la lanzadera, sin embargo, pocos minutos después el grupo observó un avión volando sobre la zona de lanzamiento que había despegado del aeropuerto de Liberia”* [4]. Esta situación pudo haber sido catastrófica, y por esta razón es que nace la necesidad de contar con un lugar apropiado y seguro en el país para realizar lanzamientos.

Posteriormente, a inicios del 2021 se aprueba la ley de la creación de la Agencia Espacial Costarricense (AEC) la cual plantea la creación de un centro de investigación, innovación y desarrollo de tecnología en el área aeroespacial y propone a la provincia de Guanacaste como un lugar con condiciones climáticas y geográficas idóneas para la observación del espacio ultraterrestre. [5] Estas premisas aumentan las oportunidades para proyectos de esta índole, particularmente en el lanzamiento de cohetes como una herramienta en educación, investigación e incluso comercial. Existe la necesidad de desarrollar nuevos estudios y propuestas aplicables que permitan los inicios de lanzamientos seguros dentro del territorio costarricense.

Los lanzamientos de cohetes desde plataformas marítimas han sido estudiados desde la década de 1960 en programas vinculados con NASA, en respuesta a la demanda de realizar lanzamientos seguros y económicos para servicios comerciales. [6][7] En 1999 se consolidó la compañía internacional Sea Launch constituida por empresas comprometidas con el área aeroespacial de países como Estados Unidos, Rusia, Ucrania y Noruega. El diseño de las plataformas que utiliza la compañía Sea Launch en sus lanzamientos se basan en las plataformas de perforación petroleras, y son operadas desde una embarcación de comando. [7]

Existen plataformas tanto fijas como móviles, una de las plataformas de esta empresa

lleva el nombre de Odyssey, es una plataforma semisumergible que fue transformada a partir de una unidad móvil de perforación petrolífera en alta mar, se utiliza para realizar lanzamientos sobre la línea del ecuador en un lugar llamado Doldrums, ya que en esta región predomina un clima calmado y favorable. [8] Esta plataforma es autopropulsada, y se puede sumergir parcialmente con el fin de asegurar estabilidad durante el lanzamiento, según se indica en [6], además en el diseño se deben tomar en cuenta factores como: la altura de las olas del mar y el viento, que debido a las fluctuaciones en las mismas, se aumentan las cargas a las que se somete la lanzadera y el la interfaz lanzadera-plataforma de forma oscilatoria.

Actualmente, la empresa estadounidense Space Exploration Technologies Corp conocida como SpaceX anunció la compra de dos plataformas petroleras, con el objetivo de modificarlas para lanzamientos marítimos destinados al proyecto Starship. Las razones que expresa SpaceX de adquirir estas plataformas son múltiples. Por un lado la demanda de lanzamientos que generara el proyecto Starship es alta, por lo que requieren de más espacios habilitados para lanzamientos. Los lugares en tierra son limitados , ya que deben cumplir características de seguridad en cuanto a la cercanía con ciudades pobladas, por lo que una plataforma acuática brinda una solución al problema. Además, se estima que los lanzamientos del Starship producirán una gran área de peligro de explosión y planteará problemas de ruido si se lanza con frecuencia cerca de áreas pobladas. [9]

Esta información brinda conocimientos preliminares de gran aporte para esta iniciativa. Por un lado, la evidente necesidad en el país de la creación de un espacio seguro para realizar lanzamientos de cohetes que impulsen y fomenten el estudio en tecnología aeroespacial. Seguidamente, concede las bases preliminares en cuanto a la clasificación de cohetes y estándares internacionales en requerimientos de lanzamiento. Por otro lado, la importancia de las condiciones climáticas favorables en lanzamientos marítimos, lo cual se pretende estudiar en este proyecto para ubicar una zona óptima en el país. Finalmente, da una visión respecto al diseño de algunas plataformas existentes, en cuanto a que se basan en las plataformas petrolíferas, de las cuales se tiene mayor conocimiento debido a que se utilizan desde tiempos previos respecto a las plataformas de lanzamiento de cohetes.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar una plataforma de lanzamiento marítimo que pueda ser utilizada en la zona de Golfito para realizar lanzamientos según las características de los cohetes de alta potencia.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar los tipos y especificaciones de los cohetes de alta potencia que podrán ser lanzados.
- Identificar los requerimientos de lanzamiento de cohetes de alta potencia para asegurar el cumplimiento de las normativas de seguridad en la zona de Golfito.
- Seleccionar el tipo de la lanzadera más adecuada que cumpla con las condiciones requeridas para cohetes de alta potencia.

- Proponer planos y especificaciones de diseño de la plataforma para que cumpla con los requerimientos para lanzamiento de cohetes.

1.5. Metodología general y recursos

La metodología se dividirá en 3 etapas, cada una con sus respectivos pasos para cumplir los objetivos.

Etapas 1: Diseño preliminar y modelo matemático.

- Realizar una investigación bibliográfica de las posibles configuraciones para el modelo de la plataforma.
- Determinar los cohetes que serán lanzados en la plataforma.
- Delimitar y dimensionar preliminarmente la plataforma y lanzadera.
- Generar un modelo de cuerpo rígido de la plataforma.
- Analizar la estabilidad y el comportamiento hidrodinámico del modelo.

Etapas 2: Construcción de prototipo y pruebas en el IMARES.

- Escalar el diseño preliminar con el fin de evaluar su comportamiento en el tanque simulador de olas del IMARES.
- Búsqueda y adquisición de materiales para construir un prototipo de la plataforma.
- Construcción del prototipo en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCR.
- Ejecutar las pruebas en el IMARES.
- Procesar los datos obtenidos de las pruebas.
- Analizar los resultados.

Etapas 3: Modelado y diseño de la plataforma en escala real.

- Simulación del ángulo inclinación de la plataforma bajo condiciones de oleaje particulares.
- Extrapolación de los parámetros del prototipo a la plataforma en escala real.
- Selección final de los materiales de la plataforma.
- Diseño CAD de la plataforma y lanzadera final, planos y especificaciones.

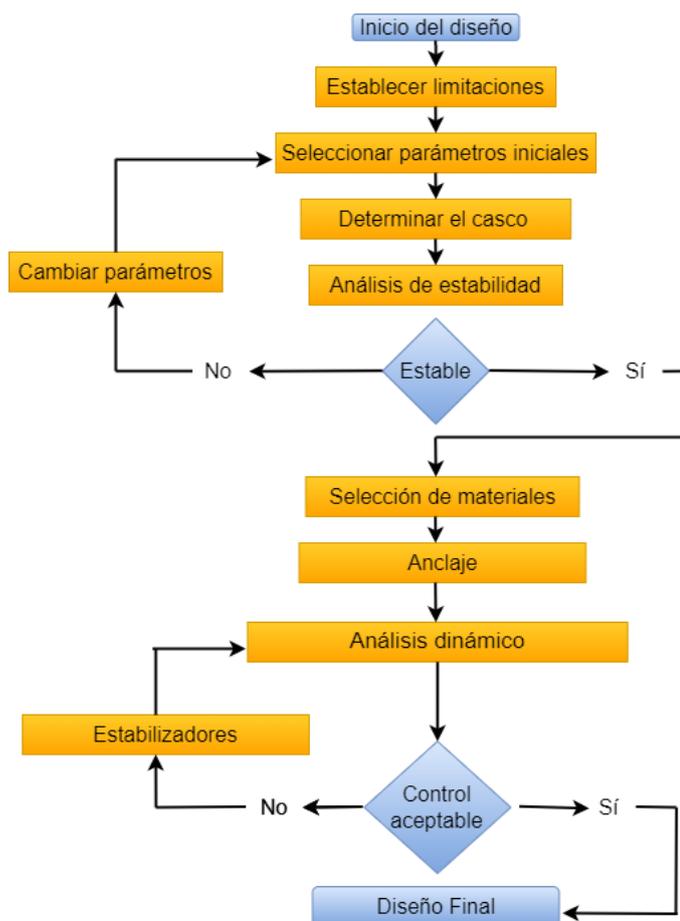


Figura 1.1: Metodología de Diseño. [Elaboración propia]

1.6. Alcances y limitaciones

Se plantea el diseño de una plataforma marítima para realizar lanzamientos de cohetes en la zona de Golfito, Puntarenas, según las características de los cohetes de alta potencia, sin llegar a la construcción de la misma.

El diseño de la plataforma se enfoca en lanzamiento de cohetes en un rango de motores del tipo H, I y J. Las características principales por las que se eligieron estos motores son que el rango de alturas que alcanzan estos cohetes va de los 457 m a los 1 609 m, se puede utilizar la misma lanzadera para los tres tipos y porque el país cuenta con personas certificadas en lanzamiento de cohetes de alta potencia de este tipo de motores que cumplirían el papel de Oficial de Seguridad de Campo (RSO, por sus siglas en inglés).

La zona que se propone como lugar para ubicar la lanzadera es Golfito, Puntarenas, esto debido a que este trabajo se puede vincular con un proyecto de investigación que se está desarrollando en dicha zona, en el cual participa la directora de este proyecto junto con otras investigadoras y busca desarrollar proyectos interdisciplinarios entre la investigación área aeroespacial y la biomimética.

Este proyecto plantea que el diseño de la plataforma y la lanzadera cumplan con todos los requerimientos necesarios hasta la ignición del cohete, por lo que no se contempla el diseño del cohete, diseño del motor ni del sistema de recuperación. Esto significa que se

hará uso de la información teórica existente de coherencia de alta potencia para tomar los datos necesarios de empuje e impulso en el despegue del cohete, que será el intervalo de tiempo de contacto entre el cohete y la plataforma.

Una de las principales limitantes encontrada es el difícil acceso a la documentación escrita de diseño, adaptación y uso de plataformas existentes para lanzamientos de cohetes, como lo son las que poseen SpaceX y Sea Launch, debido a que esto corresponde a información confidencial. Por lo tanto, este proyecto se fundamentará en plataformas marítimas destinadas a otro uso que serán adaptadas al objetivo de este proyecto.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Cohetes de alta potencia

Los cohetes se pueden categorizar de muchas formas diferentes, existen desde los modelos espaciales a escala, cohetes supersónicos, los misiles balísticos de alta potencia, hasta cohetes de varias etapas, sin embargo, las características de la configuración que posee cualquier tipo de cohete es la misma. Un cohete se compone de el cono u ojiva, el cuerpo con forma alargada y las aletas. [10]

La normal 1127: código para cohetes de alta potencia, de la Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (NFPA, por sus siglas en inglés) define cohete como *”un dispositivo que asciende en el aire sin el uso de fuerzas de elevación aerodinámicas que actúan contra la gravedad y que es propulsado por uno o más motores de cohete”*. [11]

2.1.1. Especificaciones de cohetes de alta potencia

La definición para cohete de alta potencia es *”vehículo cohete que (1) es propulsado por uno o más motores de alta potencia, o (2) es propulsado por una combinación de modelos de motores de cohete que tienen un impulso total de más de 320 Ns, o (3) es propulsado por una combinación de modelos de motores de cohete que tienen más de un total de 125 g de peso propulsor, o (4) pesa más de 1500 g con los motores instalados”*. [11]

2.1.2. Fundamentos teóricos de cohetaría

Para el desarrollo de este trabajo se tomará en cuenta los conceptos fundamentales referentes a cohetaría en el momento que el cohete despegue de la lanzadera, que es lo que compete para esta investigación. La propulsión de cohetes basa sus principios en la mecánica, la termodinámica y la química. Dicha propulsión se obtiene al aplicar una fuerza a un vehículo, o de forma alternativa, al mantener una velocidad dada contra una fuerza de resistencia. Al ejectar propelente a alta velocidad por un escape, se obtiene dicha fuerza. [12]

En términos generales, por medio de la segunda Ley de Newton se puede definir la fuerza del motor de un cohete:

$$\sum \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} \quad (2.1)$$

Donde:

- $\sum \vec{F}$ es la suma de las fuerzas externas (N)
- \vec{p} es el momento de inercia del sistema (kg*m/s)

Al derivar la ecuación 2.1 se obtiene la expresión de la fuerza del cohete:

$$\vec{F}_C = \dot{m} \vec{u} \quad (2.2)$$

Donde

- \vec{F}_C es la fuerza del cohete (N)
- \dot{m} es el flujo másico de los gases (kg/s)
- \vec{u} es la velocidad de los gases de escape (m/s)

La expresión de la ecuación 2.2 supone que la velocidad de escape de los gases es constante, de no ser así, es necesario realizar la suma del término que corresponde a la aceleración de los gases.

Impulso total

El impulso total de un motor de cohete corresponde a integrar la fuerza de empuje sobre el tiempo de combustión, por lo que hace referencia a la cantidad total de fuerza que libera el motor por el tiempo que se encuentre activo. Para un empuje constante y tiempos cortos, el impulso total se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_t = F_C t \quad (2.3)$$

Donde:

- I_t es el impulso total (Ns)
- F_C es la fuerza del cohete (N)
- t es el tiempo (s)

El impulso total de un motor es útil para determinar el tamaño del cohete, más específicamente para aquellos que operan con combustible sólido. En el cuadro 2.1 se muestra la clasificación de los motores de cohetes de combustible sólido, estos se clasifican en cohetes modelo y cohetes amateur, dentro de la categoría de cohete amateur se observa que se encuentran los cohetes de alta potencia:

Cuadro 2.1: Clasificación de motores. [13]

Clasificación de los Motores					
Tipo	Rango de Impulso [Ns]		Nivel de certificación TRIPOLI-NAR	Clasificación	
A	1,25	2,5	0	Baja Potencia	Cohete Modelo
B	2,5	5			
C	5	10			
D	10	20			
E	20	40			
F	40	80			
G	80	160			
H	160	320	1	Alta Potencia	Cohete Amateur
I	320	640	2		
J	640	1280			
K	1280	2560	3		
L	2560	5120			
M	5120	10240			
N	10240	20480			
O	20480	40960			

Impulso específico

El impulso específico es el impulso total por unidad de peso del propelente utilizado. Un valor alto de este parámetro significa un mejor rendimiento del vehículo. Se puede expresar de la siguiente manera:

$$I_s = \frac{\vec{I}_t}{W} \quad (2.4)$$

Donde:

- I_s es el impulso específico (s)
- I_t es el impulso total (Ns)
- W es el peso del propelente (N)

La expresión anterior se puede simplificar usando las ecuaciones 2.2 y 2.3 y queda de la siguiente forma:

$$I_s = \frac{\vec{u}}{g_0} \quad (2.5)$$

- I_s es el impulso específico (s)
- \vec{u} es la velocidad de los gases de escape (m/s)
- g_0 es la aceleración gravitacional estándar (m/s²)

Por medio de la tercera Ley de Newton se puede explicar el proceso en que un cohete despega de su lanzadera, dicha Ley expresa que por cada acción se produce una reacción de igual magnitud y sentido opuesto. En un cohete, se expulsan los gases de combustión por medio de la tobera del motor produciendo una acción, que a su vez genera una fuerza de reacción que impulsa el cohete hacia arriba.

2.1.3. Normativa internacional

Los lanzamientos de cohetes deben ser lanzamientos seguros, esto implica que se lanzaran en áreas donde los árboles, las líneas eléctricas y los edificios no representen un peligro. La dimensión del lugar de lanzamiento no será menos de la mitad de la altitud máxima esperada que alcanzará el cohete, esto significa que si se calcula o simula que el cohete alcanzará una altitud de 1 km, el área libre mínima que se debe tener a la redonda será de 500 m.

Los motores de cohetes se clasifican de acuerdo al impulso total instalado, y de acuerdo a esto se puede simular la altitud máxima que alcanzará el cohete. En el Cuadro 2.2 se especifica las dimensiones del lugar de lanzamiento determinadas por la norma NFPA 1127:

Cuadro 2.2: Dimensiones del lugar de lanzamiento. [11]

Impulso total instalado [N-s]	Tipo de motor equivalente	Dimensiones mínimas del lugar			
		m	km	ft	mi
160,01-320,00	H	457	0,5	1 500	0,3
320,01-640,00	I	914	1,0	3 000	0,6
640,01-1 280,00	J	1 609	1,6	5 280	1,0
1 280,01-2 560,00	K	1 609	1,6	5 280	1,0
2 560,01-5 120,00	L	3 219	3,2	10 560	2,0
5 120,01- 10 240,00	M	4 828	4,8	15 840	3,0
10 240,00-20 480,00	N	6 437	6,4	21 120	4,0
20 480,01-40 960,00	O	8 047	8,0	26 400	5,0

En la norma NFPA 1122: código para cohetes modelo, se detallan algunos aspectos a cerca de los lanzamientos. Esta norma dicta que los cohetes se deben lanzar desde una barra, torre o riel de lanzamiento, que apunte dentro de los 30° con la vertical, con el fin de asegurar un vuelo hacia arriba. También menciona que los cohetes se deben lanzar en un área abierta y en condiciones climáticas seguras, la velocidad del viento no debe ser mayor a 20 millas por hora, de ser así se deberá suspender cualquier lanzamiento de cohete modelo. Es necesario verificar que no haya pasto seco cerca de la plataforma de lanzamiento y que el lugar de lanzamiento no presente riesgo de incendios. [14]

La normativa de la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos en su título 14 de Aeronáutica y Espacio, parte 101: Moored ballons, kites, amateur rockets and unmanned free ballons [15], especifican operaciones de operación generales y para cohetes de alta potencia. La parte 101.23 indica las limitaciones generales de operación y dicta que el cohete amateur se operará de forma que:

- Sea lanzado en una trayectoria suborbital
- Cuando se lanza, no debe cruzar al territorio de un país extranjero a menos que exista un acuerdo entre los Estados Unidos y el país de interés
- No sea tripulado
- No signifique un peligro para las personas, la propiedad y otras aeronaves
- La Administración Federal de Aviación puede especificar limitaciones operativas adicionales necesarias para asegurar que el tráfico aéreo no se vea afectado de forma adversa y no se comprometa la seguridad pública

Por su lado, la parte 101.25 sobre las limitaciones operativas para cohetes de alta potencia y cohetes avanzados de alta potencia, indica que se debe cumplir las limitaciones de la parte 101.23 y que además no se operarán estos cohetes bajo las siguientes condiciones:

- A cualquier altitud donde prevalezcan las nubes o fenómenos de oscurecimiento de más de 5 décimas de cobertura
- A cualquier altitud donde la visibilidad horizontal sea menos a 1,6 km (5 millas)
- En cualquier nube
- Entre el atardecer y el amanecer sin autorización previa de la Administración Federal de Aviación
- Dentro de 9,26 km (5 millas náuticas) de cualquier límite de aeropuerto sin autorización previa de la Administración Federal de Aviación
- A menos que se observe la mayor de las siguientes distancias de separación de cualquier persona o propiedad que no esté asociada con las operaciones:
 - No menos de un cuarto de la altitud máxima esperada
 - 457 metros (1 500 pies)
 - A menos que esté presente una persona mayor a 18 años que esté a cargo de garantizar la seguridad de la operación y tenga la autoridad de aprobación final para iniciar el vuelo con cohetes de alta potencia
 - Que se proporcionen precauciones razonables para informar y controlar un incendio causado por la actividad de cohetes

2.2. Condiciones del entorno marino

En un proceso de diseño se debe identificar detalladamente el entorno al que se someterá el artefacto durante su respectivo funcionamiento. En el diseño de plataformas marítimas resulta indispensable reconocer las características geográficas, climáticas, legislativas y marinas de la zona donde se ubicara la estructura.

2.2.1. Propiedades del agua

En el caso de la plataforma propuesta, el ambiente al que se someterá es un entorno marino, por tanto, es primordial obtener de forma preliminar algunas de las propiedades más relevantes del agua de mar. El agua se compone de H_2O es su forma pura, sin embargo, en la naturaleza el agua se encuentra disuelta con una gran cantidad de sustancias que alteran sus propiedades físicas y químicas respecto a su composición original. La densidad del agua pura es aproximadamente 1 g/cm^3 a temperatura ambiente ($24 \text{ }^\circ\text{C}$) y varía con la temperatura. Además, la densidad del agua aumenta con el contenido de sales disueltas. La salinidad del agua se mide en gramos de sal en 1000 gramos de agua, el agua con menos de un 1,5 % de salinidad es considerada “agua dulce”. En promedio el agua de mar tiene un contenido de sal de 3.5 % del peso total, y la densidad del agua en esta condición a temperatura ambiente es de 1.025 g/cm^3 . Otra propiedad que aumenta su magnitud con la salinidad del agua y con el aumento de temperatura es la viscosidad cinemática [16].

2.2.2. Fondo marino

La corteza terrestre no es una superficie lisa, se extiende hasta 10 km por debajo del nivel del mar y por encima con alturas de hasta 8 km. Como es de esperar, el fondo marino presenta irregularidades, y la profundidad depende de la ubicación geográfica. La región oceánica se puede dividir en tres grandes zonas de acuerdo a su profundidad: zona costera, llanura continental, y el océano profundo. La llanura continental se extiende en promedio 70 km desde la zona costera hacia el océano, tiene una profundidad promedio de 150 m y una inclinación de 1.9 m/km. Al final de la llanura continental el suelo se vuelve profundo abruptamente en lo que se denomina llanura abisal, y presenta profundidades de hasta 6000 m [16].

2.2.3. Corrientes y mareas

Las mareas son un fenómeno que ocasiona el aumento y descenso alternado del nivel del mar. Es producido, en grandes rasgos, por la atracción de la luna y la tierra, y con menor medida entre la tierra y el sol. La altura de la marea depende de la ubicación, la geografía de la masa terrestre y la orientación de la llanura continental. En algunas localidades, la variación de las mareas es de hasta 15 m. La fuerza que ejerce la marea sobre las embarcaciones cerca de la zona costera esta directamente relacionada con la altura de la marea [16].

Las corrientes marinas se deben a los giros oceánicos, estos son corrientes de agua rotativa que se originan por el movimiento del viento en la atmósfera terrestre y el efecto coriolis. Las principales corrientes marinas en el planeta se deben principalmente a los cinco giros oceánicos principales, uno por cada cuenca oceánica: Pacífico Norte, Pacífico Sur, Atlántico Norte, Atlántico Sur y Cuenca del Océano Índico [16].

2.2.4. Olas marinas

En general el comportamiento de olas marinas es aleatorio e impredecible. Aunque dentro los tipos de olas hay algunas que tienen un comportamiento más regular como el caso del mar de fondo, estas son olas que se propagan lejos de lugar donde se originaron, por lo general lejos de las costas [17]. A excepción de este tipo, las olas generadas por el viento local, o la influencia astronómica, son particularmente irregulares. Sin embargo, para analizar y diseñar estructuras marinas es necesario realizar aproximaciones y consideraciones precisas acerca del comportamiento de las olas del mar. Una alternativa de gran utilidad al analizar las ondas marinas es considerarlas como una superposición de varias ondas armónicas regular, con una amplitud, longitud, frecuencia y dirección establecida. Este concepto se conoce como el principio de superposición [17]. Esto con el objetivo que obtener o simular una configuración irregular de olas que es característica de entorno en el que opera la plataforma. Para el análisis de las ondas formadas por la influencia del viento se puede hacer la siguiente clasificación básica:

- Olas de aguas profundas (ondas cortas): Se considera que el agua es profunda si: $h/\lambda > 1/2$, donde h es la profundidad y λ longitud de la onda.
- Olas de aguas poco profundas (ondas largas): Se considera que el agua es poco profunda si: $h/\lambda < 1/20$, en este caso el fondo marino influye considerablemente en las características de estas olas.

2.2.5. Olas regulares

La descripción matemática de las olas consiste en resolver un problema potencial donde la velocidad del fluido se determina como la derivación de la función $\phi(x, y, z, t)$. De acuerdo con la teoría de ondas de Airy respecto a la propagación de olas el agua de mar se considera no viscoso, incompresible e irrotacional. En esta teoría se obtiene la solución de la ecuación potencial en términos de las condiciones de contorno [18] [19].

Si se considera una ola coseno bidimensional:

$$\phi = \frac{ag}{ck} \frac{\cosh(k(z+h))}{\cosh(kh)} \text{sen}(k(x-ct)) \quad (2.6)$$

Donde:

- a es la amplitud de la ola (m)
- g es la aceleración de la gravedad (m/s^2)
- h es la profundidad del agua (m)
- k es la número de onda (rad/m)
- c es la velocidad de propagación (m/s)
- x, z son las coordenadas espaciales, z es negativo debajo de la superficie libre (m)

La elevación en función del tiempo y espacio esta dada por:

$$\eta(x, t) = a \cos(k(c-ct)) \quad (2.7)$$

La distancia entre dos máximos λ corresponde a la longitud de la ola:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (2.8)$$

La frecuencia angular del movimiento de la ola ω es:

$$\omega = kc \quad (2.9)$$

Por tanto, el periodo temporal de la ola T es:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (2.10)$$

Para valores de $kh > \pi$, es decir $h/\lambda > 1/2$, que ocurre en condición de aguas profundas, se obtienen relaciones sencillas para longitud y velocidad de las olas [19]:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} = 1,56T^2 \quad (2.11)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} = 1,56T \quad (2.12)$$

La pendiente máxima de la ola se obtiene al derivar la ecuación 2.7.

$$\alpha = \frac{d\eta}{dx} = -ka \text{sen}(k(x-ct)) \quad (2.13)$$

Es decir:

$$\alpha_m = ka = \frac{\pi H}{\lambda} \quad (2.14)$$

2.2.6. Condiciones en Golfo

Bahía Golfito se ubica en el Golfo Dulce de la Península de Osa en la zona sur del país. En algunas regiones tiene un ancho de 2 a 3 km y una profundidad desde los 7 m en marea baja, hasta 13 m en marea alta. Además, presenta un suelo marino tipo lodoso [20]. La velocidad del agua en la bahía relacionada con la marea se muestra en el mapa de la figura 2.1. En la boca de la bahía se presentan las velocidades más altas, desde los 1,2 hasta 1,5 m/s. Sin embargo, lejos de la boca de la bahía se presentan velocidades inferiores a 0,5 m/s.

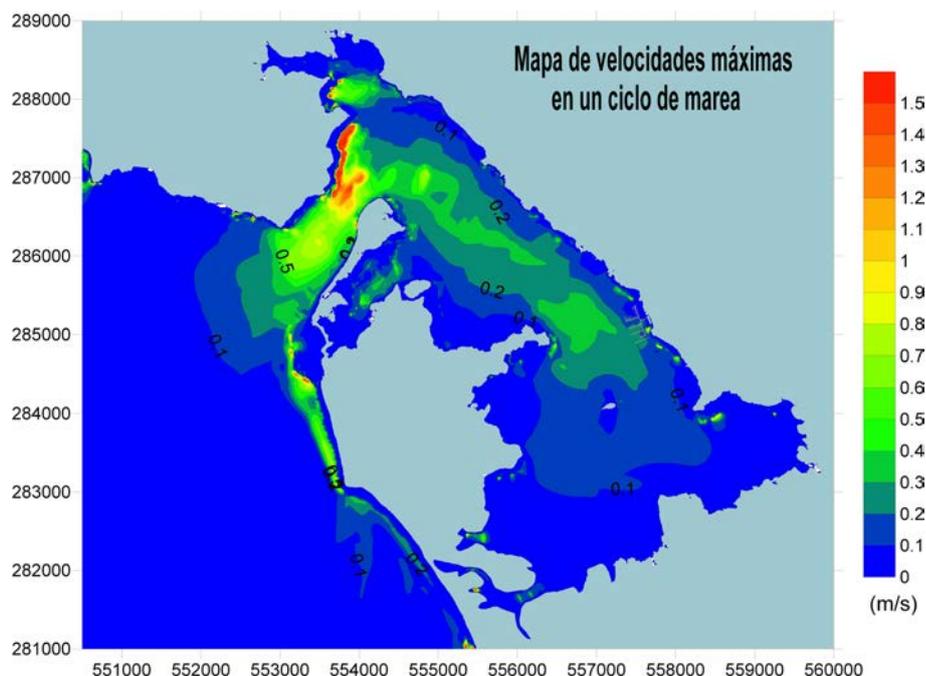


Figura 2.1: Mapa de velocidades del agua en un ciclo de marea. [21]

De acuerdo con los datos meteorológicos históricos del IMN hasta el 2014, la velocidad promedio del viento es de 5,7 km/h [22]. Respecto al oleaje, las condiciones se consideran en calma. Dado que la zona es una bahía semi cerrada el oleaje proveniente del océano pacífico es amortiguado, por lo que el comportamiento marino se caracteriza por olas de poca altura originado principalmente por embarcaciones pequeñas y viento. El oleaje promedio de diseño corresponde a olas con amplitud máxima de 0,25 m y periodo de 4 s. Sin embargo, de acuerdo con [23] embarcaciones de mayor tamaño (esloras mayores a 12 m) navegando a una velocidad de 5,1 m/s, pueden generar olas con amplitudes de hasta 0,50 m y periodos de 2,18 s. No obstante, estas condiciones se observarían en la cercanía de las embarcaciones.

2.3. Anclaje

Las embarcaciones en el mar cuentan con tres grados de libertad que no presentan fuerzas o momentos restauradores que devuelvan el barco a su posición original una vez que cesa la fuerza que produce el movimiento. Esto ocasiona que la embarcación sometida a estas fuerzas cambie de orientación y posición en el mar. En la mayoría de casos esto representa un problema para la operación de la embarcación, por ello es deseable tener

control sobre estos movimientos mediante un sistema de anclaje adecuado que debe ser considerado en la etapa de diseño.

En la industria naval existe una numerosa cantidad de “reglas de dedo” para escoger tipo y tamaño de ancla principalmente en embarcaciones de uso recreativo. Sin embargo, hay algunas normativas internacionales que especifican requisitos técnicos respecto a la cadena y otros accesorios del sistema de anclaje. De acuerdo con [24], en el cuadro 2.3 se especifican algunos parámetros del sistema de anclaje para varios tamaños de eslora en embarcaciones pequeñas.

Cuadro 2.3: Especificaciones del anclaje según la eslora. [24]

Eslora	Peso de ancla	Diámetro de cadena	Diámetro de cuerda
≤ 3 m	3,5 kg	6 mm	10 mm
5 m	6 kg		
7 m	10 kg		

Existen una gran cantidad de tipos de ancla en la industria. La selección del ancla depende de la carga aplicada y del tipo de suelo marino donde se va a utilizar este accesorio. La carga aplicada se especifica según el tamaño de la eslora del barco, como se detalla en el cuadro 2.3. En el cuadro 2.4 se muestran algunos tipos de ancla recomendados de acuerdo al suelo marino.

Cuadro 2.4: Tipo de ancla recomendado según la composición del suelo marino. [25]

Tipo de ancla	Tipo de suelo marino				
	Arena o arcilla	Lodo	Grava	Coral o roca	Algas
CQR	x	x			x
Danforth	x	x			
Bruce	x	x	x		
Hall	x	x			
Hongo	x	x			
Wishbone	x	x		x	
Northhill	x		x	x	x
Paraguas				x	

La conexión del ancla con la embarcación se denomina línea de fondeo y se compone de cuerda y cadena, aunque en algunas ocasiones se puede emplear solo cuerda o solo cadena. Este accesorio se debe fabricar con materiales que resistan el entorno marino corrosivo y la acumulación de material biológico. Además, debe ser muy resistente para mantener el bote en posición contra la fuerza del viento y marea, así como ser flexible para amortiguar cargas de impacto debido al movimiento ascendente y descendente del buque. En la figura 2.2 se muestran algunos parámetros para determinar adecuadamente la línea de fondeo.

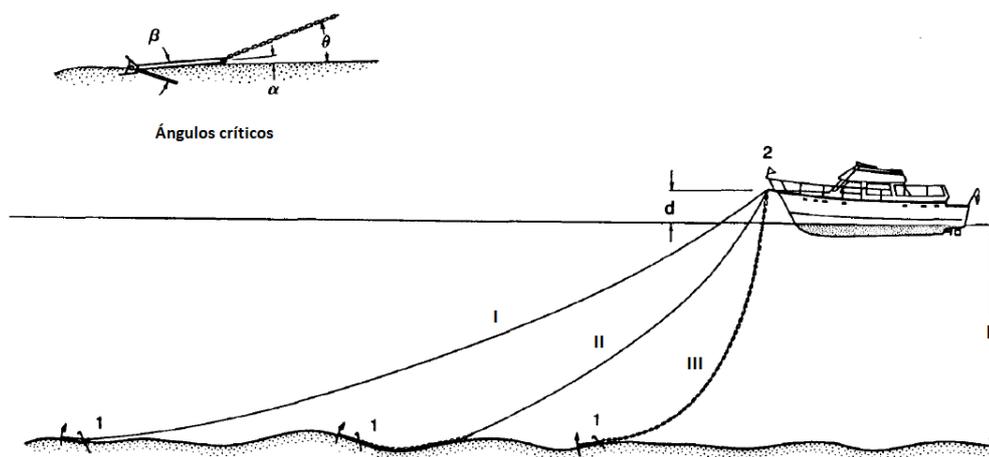


Figura 2.2: Línea de fondeo.[25]

donde:

- I es cuando la línea de fondeo es únicamente cuerda.
- II es cuando la línea de fondeo está compuesta por cuerda y cadena.
- III es cuando la línea de fondeo es únicamente cadena.
- θ es el ángulo de la línea de fondeo.
- d es la distancia de borda libre.
- h es la profundidad del fondo marino.

El ángulo de la línea de fondeo tiene un papel importante sobre la resistencia que ejerce el ancla al introducirse en el fondo marino. Esta fuerza actúa horizontalmente por lo que cualquier carga vertical que se ejerza sobre el ancla va a disminuir su efectividad. Para embarcaciones pequeñas se establece que este ángulo debe ser inferior a 8° para que el ancla se pueda cavar eficazmente en el suelo marino. [25]

Se denomina alcance S a la relación entre el largo de la línea de fondeo y la distancia vertical desde el fondo marino hasta el amarre con la embarcación. De acuerdo con [25], el alcance mínimo según el tipo de la línea de fondeo se puede determinar de acuerdo al cuadro 2.5.

Cuadro 2.5: Alcance mínimo según el tipo de línea de fondeo seleccionada. [25]

Tipo de línea de fondeo	Alcance S (adimensional)
I	10
II	7
III	4

A partir de estos parámetros, la longitud de la línea de fondeo L se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$L = (h + d)S \quad (2.15)$$

Para diseñar la cadena del ancla es necesario trazar el camino que llevará la cadena desde su origen hasta el ancla con el objetivo de desplegar o recuperar el ancla sin golpear el casco del barco [16]. Además, con respecto a las dimensiones de la cadena, en el cuadro 2.6 se detallan los parámetros que se deben cumplir de acuerdo a la norma [26].

Cuadro 2.6: Datos de dimensiones, carga de prueba y carga mínima de rotura.[26]

d_n	p_1	w_1 (mínimo)	w (máximo)	I	F_e (mínimo) kN	F_m (máximo) kN	Eslabón terminal A		
							d_2	p_2	w_2 (mínimo)
$6,0 \pm 0,3$	$18,0 \pm 0,5$	8,1	21,6	198 ± 4	9	18	$8,0 \pm 0,4$	$40,0 \pm 1,2$	18

Dimensiones en mm.

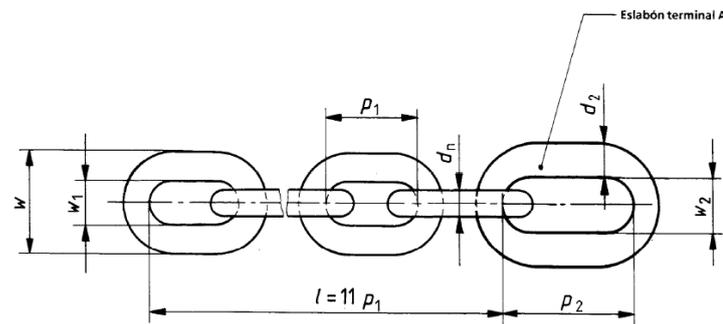


Figura 2.3: Dimensiones de la cadena.[26]

Un aspecto que se debe incluir en el diseño del sistema de anclaje es un espacio en cubierta para el almacenamiento de la cadena y el ancla. El espacio destinado debe asegurar que el sistema de anclaje no interfiera con la operación del buque y que tanto el despliegue como la recuperación del ancla sea eficaz y segura para la embarcación y los tripulantes. Otro accesorio indispensable es el taco de amarre cuya función es sujetar la cuerda al buque sin generar esfuerzos indeseables en accesorios de la cubierta de la embarcación.[25] En el cuadro 2.7 se muestran algunos largos recomendados del taco de amarre según el diámetro de la cuerda.

Cuadro 2.7: Tamaños de taco de amarre recomendados. [25]

Diámetro de la cuerda (in)	Largo de taco de amarre (in)
3/8	6
7/16	7
1/2	8

2.4. Hidrostática

La hidrostática es el estudio de las propiedades de los fluidos en reposo en condiciones de equilibrio, está basado en la primera y tercera Ley de Newton [Cengel1]. En este capítulo se desarrollan temas relacionados a la hidrostática en aplicación naval.

2.4.1. Propiedades geométricas del casco

La geometría del casco juega un rol muy importante como punto de partida para los cálculos de hidrostática y estabilidad, comportamiento hidrodinámico e información estructural como elementos de forma, área, longitud de corte y peso, los cuales solo pueden ser obtenidos si la superficie del casco es definido con precisión. Hay diferentes etapas del diseño del casco, las cuales se pueden definir ampliamente en tres etapas: la etapa de diseño de concepto, la etapa de diseño final y la etapa de generación de información de manufactura. [16]

La forma del casco es crucial para cumplir con los requisitos operativos del barco. Existen una amplia variedad de casco que combinan cualidades operativas como: estabilidad, velocidad, espacio en cubierta, entre otras. En la figura 2.4 se hace una clasificación general de los tipos de casco que interesa en este trabajo.

	Mono casco redondeado	Buena maniobrabilidad en aguas turbulentas. Puede volcarse con facilidad.
	Multi casco Catamaran	Muy estable y veloz. Amplios radios de giro.
	Mono casco plano	Estable. Movimientos bruscos. No apto para mar abierto.
	Forma en V	Muy veloz. Maniobrabilidad reducida con oleaje.
	Casco tipo Pontoon	Muy estable. No ágil. No apto para velocidad.

Figura 2.4: Tipos de cascos. Adaptado de [27].

Para desarrollar análisis posteriores respecto al comportamiento estático y dinámico de la plataforma conviene definir algunos parámetros utilizados para referirse a las embarcaciones. La dimensión más larga de un barco se denomina eslora, mientras que la dimensión corta se llama manga. La profundidad de la superficie del casco que queda por debajo de la línea de agua se denomina calado, mientras que la altura del casco que queda sobre la línea de agua se llama franco bordo. [16]

Una embarcación en el mar posee seis grados de libertad, algunos de estos movimientos afectan la estabilidad del barco. En la figura 2.5 se muestra la denominación para cada movimiento.

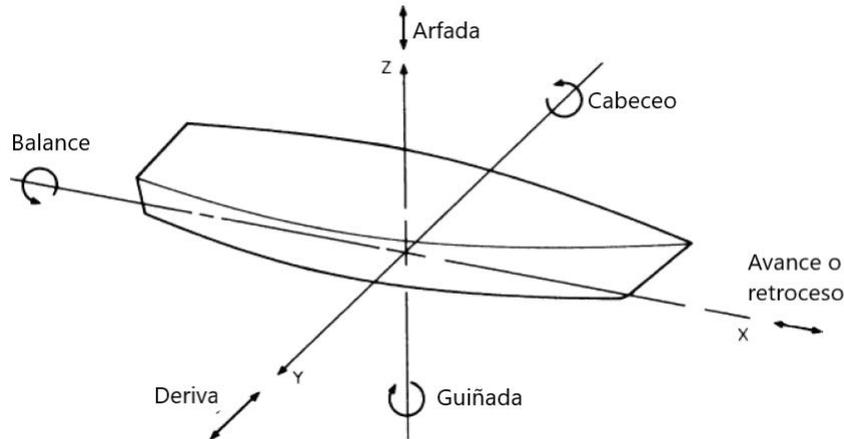


Figura 2.5: Grados de libertad del barco. Adaptado de [28].

Los movimientos que afectan la estabilidad de una embarcación son los de balanceo y cabeceo ya que estos tienden a girar el barco y modificar su estado de equilibrio. Estos movimientos serán de interés en secciones posteriores para el análisis dinámico de la plataforma.

2.4.2. Principio de Arquímedes

El principio de Arquímedes establece que un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza boyante hacia arriba que se define por:

$$F_{\nabla} = \rho \cdot g \cdot \nabla \quad (2.16)$$

Donde:

- F_{∇} es la fuerza boyante (N)
- ρ es la densidad del fluido (kg/m^3)
- ∇ es el volumen de fluido desplazado (m^3)

En el diseño de plataformas marítimas, es necesario comprender y determinar las propiedades geométricas del cuerpo para analizar adecuadamente sus propiedades mecánicas en el agua.

En terminología naval se denomina desplazamiento a la cantidad de masa de un fluido desplazada por un cuerpo sumergido en este. Se representa por la letra Δ y es definido en unidades de masa [29]. Si se conoce el volumen y densidad del fluido desplazado se puede determinar mediante la siguiente relación.

$$\Delta = \rho \cdot \nabla$$

2.4.3. Estabilidad

La estabilidad de una embarcación flotante está relacionada a las propiedades que tenga la estructura para retomar su posición de equilibrio ante el efecto de una fuerza o momento externo. Desde el punto de vista estático, estas fuerzas y momentos hidrostáticos son causadas por el fluido circundante y actúan sobre la estructura al considerar el agua

en reposo, sin perturbaciones. El centro del volumen de fluido desplazado por la estructura se conoce como el centro boyante. El centro de gravedad corresponde al punto en el cual se puede asumir que actúa todo el peso de la estructura [17].

Un cuerpo flotante se encuentra en equilibrio cuando las fuerzas y momentos que actúan sobre él son iguales a cero. Esto ocurre cuando el peso del cuerpo es de igual magnitud que la fuerza boyante que actúa sobre el mismo, la cual es equivalente al peso del fluido desplazado, y cuando el centro de gravedad y el centro boyante actúan en la misma línea vertical.

Además, la estabilidad depende de la geometría, el volumen de agua desplazado, y la distribución de la masa en la estructura. Para llevar a cabo el análisis de estabilidad de una estructura se deben definir algunos parámetros geométricos de la estructura [18].

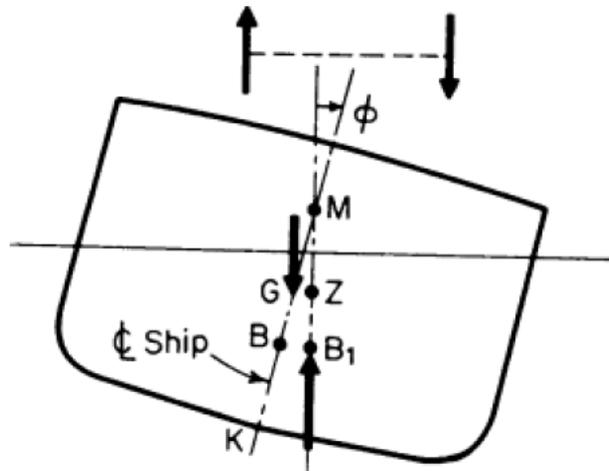


Figura 2.6: Parámetros geométricos que afectan la estabilidad de la estructura [28].

Algunos de los parámetros más relevantes se muestran en la figura 2.6 donde:

- G es el centro de gravedad de la estructura, se deben considerar los centroides de cada masa distribuida sobre la estructura para encontrar el centro de masa total. En este punto si se aplica una fuerza no hay rotación en la estructura, únicamente traslación.
- B es el punto donde actúa la fuerza boyante, es equivalente al centro de masa del volumen del fluido desplazado.
- B₁ es el punto donde actúa la fuerza boyante cuando el barco se inclina un ángulo ϕ , es equivalente al centro de masa del volumen del fluido desplazado dada la inclinación del barco.
- M se conoce como Metacentro al punto donde la línea vertical de la estructura cuando está rotada interseca con la línea vertical original cuando la estructura no está girada. Por tanto este punto siempre se encuentra en la misma línea que el punto B.
- GM corresponde a laltura metacéntrica. Corresponde a la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro. Este parámetro determina la estabilidad de la estructura.
- K es el punto de referencia para ubicar los otros parámetros.

- ϕ es la inclinación angular que puede presentar la estructura debido a un momento externo conocido como “heeling moment” que puede perturbar la posición de equilibrio de la estructura.
- GZ es el brazo de palanca del momento restaurador del balance, conocido como “righting moment”.

Cuando el momento externo actúa sobre la estructura, la forma de superficie sumergida cambia, por tanto, el centro boyante se desplaza hasta una posición B_1 como se muestra en la figura 2.6. La estabilidad se alcanza cuando el momento restaurador compensa el momento externo. El momento restaurador se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\begin{aligned} Ms &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GZ \\ Ms &= \rho \cdot g \cdot \nabla \cdot GM \cdot \text{sen}\phi \end{aligned} \quad (2.17)$$

La estabilidad inicial, en ángulos de inclinación menores a 20° , se puede suponer que el punto de giro de la embarcación es el metacentro, por tanto, la altura metacéntrica permanece constante y este el parámetro para evaluar la estabilidad. A partir de esta premisa la condición de estabilidad será:

$$\overline{GM} > 0$$

La altura metacéntrica se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{GM} = \overline{KB} + \overline{BM} - \overline{KG} \quad (2.18)$$

Las distancias \overline{KB} y \overline{KG} se obtienen a partir de las propiedades físicas del buque. La distancia \overline{BM} se conoce como brazo metacéntrico y se calcula mediante la ecuación 2.19 [29].

$$\overline{BM} = \frac{I}{\nabla} \quad (2.19)$$

Donde:

- I es la inercia del área de flotación respecto al eje transversal que pasa por el centro de gravedad (m^4)

Con ángulos de inclinación mayores, \overline{GM} ya es válido considerar el metacentro como un punto fijo. La altura metacéntrica ya no es una medida adecuada de estabilidad y en su lugar se utiliza el valor del brazo de palanca del momento restaurador, GZ . [30]

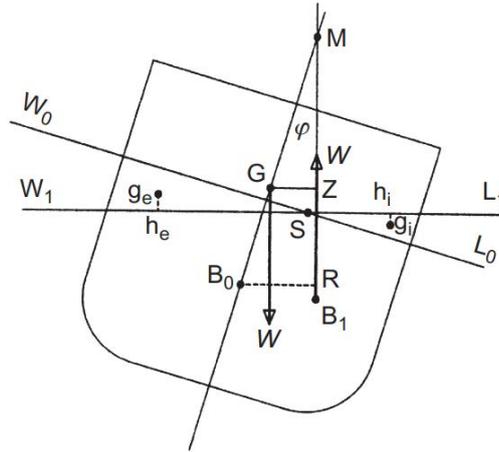


Figura 2.7: Parámetros de la fórmula de Atwood. [30]

Con la notación que se muestra en la figura 2.7, GZ se puede calcular por la fórmula de Atwood:

$$GZ = B_0R - B_0G \text{sen}(\phi) \tag{2.20}$$

Donde:

$$B_0R = vxh_e h_i / \nabla \tag{2.21}$$

$$v = L_0 S L_1 = W_0 S W_1 \tag{2.22}$$

Al graficar el brazo de palanca GZ respecto al ángulo de inclinación se obtiene la curva de estabilidad estática. Algunas características que se obtienen a partir de esta curva se muestran en la figura 2.8.

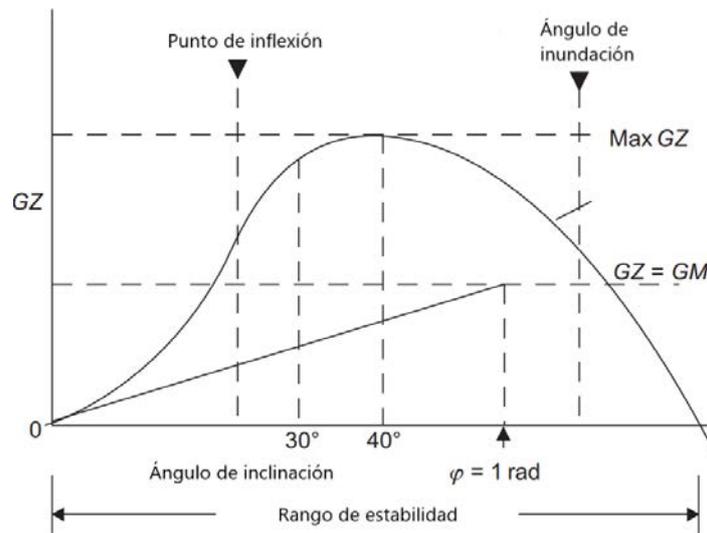


Figura 2.8: Características de la curva de estabilidad GZ. Adaptado de [30]

2.5. Hidrodinámica

Un cuerpo flotante se puede aproximar como un cuerpo rígido sujeto a una combinación de movimientos en seis grados libertad, tres de traslación y tres de rotación. El análisis

dinámico de estructuras marinas es indispensable por la misma naturaleza del entorno que las rodea. Para el caso de una plataforma de lanzamiento resulta primordial conocer de forma precisa y detallada el desplazamiento que tendrá la plataforma como resultado de la interacción el movimiento aleatorio del mar, debido a que el nivel de precisión requerido en el ángulo de lanzamiento de cohetes es alto.

En términos generales, para ángulos de inclinación pequeños ($< 15^\circ$), la ecuación diferencial que describe el movimiento de balanceo de un barco esta dada por:

$$I\ddot{\phi} + c\dot{\phi} + k\phi = M \quad (2.23)$$

En terminología naval, la ecuación 2.23 se puede describir en términos de las propiedades físicas del buque [29].

$$(I + I_a)\ddot{\phi} + B \cdot \dot{\phi} + GM \cdot \Delta \cdot g \cdot \phi = M \quad (2.24)$$

Donde:

- ϕ es el ángulo de inclinación (rad)
- $\dot{\phi}$ es la velocidad angular (rad/s)
- $\ddot{\phi}$ es la aceleración angular (rad/s²)
- I es la inercia total de la plataforma (kg · m²)
- I_a es la inercia añadida (kg · m²)
- B es el coeficiente de amortiguamiento (N · s · m)
- $B \cdot \dot{\phi}$ es el momento de amortiguamiento (N · m)
- $GM \cdot \Delta \cdot g \cdot \phi$ es el momento restaurador, definido como la altura metacéntrica por el desplazamiento (N · m)
- M es la suma de los momentos de excitación del buque (N · m)

2.5.1. Inercia añadida

Cuando un cuerpo en un fluido se mueve, también mueve el fluido alrededor. Esto implica que se requiere una fuerza mayor para mover un cuerpo en un fluido como el agua que la requerida en el aire. En terminología naval este fenómeno se representa como una masa añadida en el caso de movimientos de traslación, o como inercia añadida para movimientos de rotación. La inercia añadida se puede calcular evaluando el momento hidrodinámico que se opone al balance del buque cuando este se acelera, lo que se hace integrando el campo de presiones que surge de la aceleración relativa entre el cuerpo y el fluido. Sin embargo, este cálculo es complejo y en algunos casos se requiere de técnicas experimentales y numéricas. El momento de inercia añadido (I_a), en movimiento de balanceo en agua, se puede aproximar como un porcentaje de la inercia total del buque: $I_a = 0,20I$ [19].

2.5.2. Amortiguamiento

El amortiguamiento de un cuerpo en un fluido que se somete a un movimiento de balanceo se conoce como momento de amortiguamiento y está relacionado con el cambio en la fuerza boyante que percibe el objeto al inclinarse. Por tanto, este factor depende tanto de las de las propiedades físicas del cuerpo como de las características del fluido. Este parámetro se puede obtener experimentalmente empleando el método de decremento logarítmico.

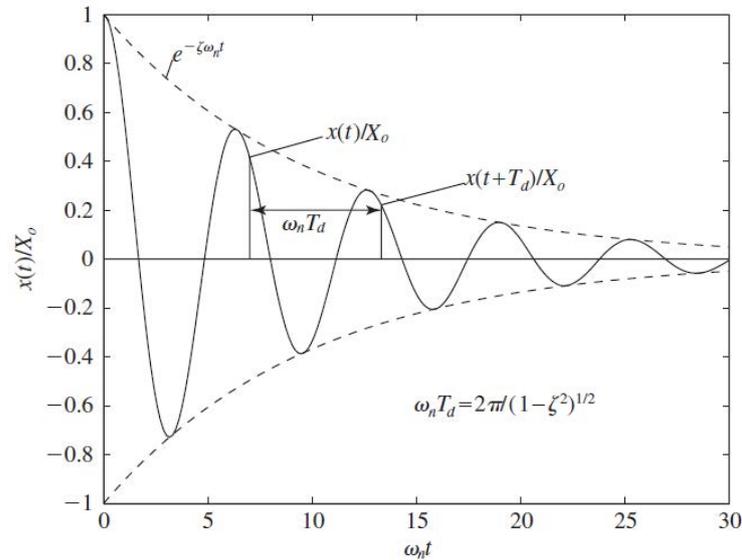


Figura 2.9: Decremento logarítmico en la respuesta de un sistema de un grado de libertad [31].

Decremento logarítmico

Este método consiste en determinar la atenuación del movimiento de un sistema sujeto a una vibración libre. Si se considera una respuesta oscilatoria en el dominio del tiempo de un sistema de un grado de libertad, tal como se muestra en la figura 2.9, el decremento logarítmico δ se define como el logaritmo natural de la relación de dos amplitudes sucesivas de la respuesta que ocurren con un período T_d de diferencia [31].

$$\delta = \ln \left(\frac{\phi(t)}{\phi(t + T_d)} \right) \quad (2.25)$$

$$T_d = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad (2.26)$$

donde:

- δ : decremento logarítmico
- T_d : periodo de la función (s)
- ω_n : frecuencia natural (rad/s)

Al sustituir la ecuación 2.25 con la respuesta del sistema y simplificar los términos (para la sustitución completa se puede referir a [31]) se obtiene la siguiente relación para

el factor de amortiguamiento

$$\zeta = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi/\delta)^2}} \quad (2.27)$$

Para el caso de un buque en movimiento de balanceo amortiguado sin momento de excitación la ecuación que rige el sistema es:

$$(I + I_a)\ddot{\phi} + B \cdot \dot{\phi} + GM \cdot \Delta\phi = 0 \quad (2.28)$$

Esta ecuación se puede escribir de la siguiente forma:

$$\ddot{\phi} + 2 \cdot \nu \cdot \dot{\phi} + \omega_n^2 \cdot \phi = 0 \quad (2.29)$$

donde:

$$2 \cdot \nu = \frac{B}{I + I_a} \quad (2.30)$$

$$\omega_n^2 = \frac{GM \cdot \Delta}{I + I_a} \quad (2.31)$$

La solución de la ecuación diferencial 2.29 para las condiciones iniciales $\phi(0) = \phi_0$ y $\dot{\phi}(0) = 0$ queda:

$$\phi(t) = \phi_0 \cdot e^{-\nu t} \left(\cos(\omega_d t) + \frac{\nu}{\omega_d} \text{sen}(\omega_d t) \right) \quad (2.32)$$

donde:

$$\nu = \zeta \omega_n \quad (2.33)$$

2.5.3. Fuerzas hidrodinámicas de excitación

Las fuerzas que actúan sobre un buque debido a la incidencia de las olas se pueden caracterizar por medio de dos fenómenos:

- Fuerzas de Froud Krylov: Se definen como la integral de las presiones sobre la superficie del cuerpo sumergido tomando como premisa que la ola no se ve afectada por la presencia del buque [17].
- Fuerzas de difracción: En la realidad, una parte de las olas se difractan al tener contacto con el buque lo que corresponde a una corrección a las fuerzas de Froude Krylov [17].

Al considerar el movimiento de balance del buque que concierne a este trabajo, las fuerzas de excitación se modelan como momentos:

$$M_{ESC} = M_{FK} + M_{DIF}$$

Donde:

- M_{ESC} : Momento escorante.
- M_{FK} : Momento por fuerzas de Krylov.
- M_{DIF} : Momento por fuerzas de difracción.

Así mismo, el momento escorante debido a una ola incidente larga en comparación con la manga del buque se puede determinar mediante la siguiente ecuación[19].

$$M_{ESC} = \Delta GM \alpha_m \text{sen}(\omega_e \cdot t) \quad (2.34)$$

Donde:

- α_m : pendiente máxima de ola, determinada por la ecuación 2.14 (rad)
- ω_e : frecuencia de encuentro (rad/s)

2.5.4. Estrategias de control

Las operaciones en una estructura marítima se puede ver afectada por el movimiento excesivo de la superficie marina, generando inestabilidad y balanceo. [32] Para el caso particular de la plataforma para lanzamiento de cohetes es necesario minimizar y controlar el balanceo de la plataforma con el fin de mantener un ángulo estable de lanzamiento, tal como se menciono anteriormente en las normas de seguridad, para esto se han desarrollado distintos sistemas estabilizadores y su aplicación depende del tipo de embarcación y la velocidad del vehículo.

La tendencia al balanceo de la estructura se caracteriza por ser un movimiento dinámico, no lineal y multivariable. Una estructura flotante puede presentar oscilaciones en 6 grados de libertad, como se mencionó anteriormente, sin embargo el movimiento de balanceo es el que alcanza las mayores amplitudes, llegando incluso a ser la mayor fuente de peligro de que la embarcación se hunda. [33]

Cuadro 2.8: Sistemas de estabilización [32]

Sistema	Pasivo	Activo	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones
Sistemas estabilizadores internos					
Peso móvil (sólido o líquido)	x	x	No hay arrastre hidrodinámico Eficaz a velocidad cero	Pesado	Transportador de carga
Gyroestabilizador	x	x	Compacto No hay arrastre hidrodinámico Eficaz a velocidad cero	Estabilización limitada	Yates
Sistemas estabilizadores externos					
Paravanes	x		Puede reajustarse	Incrementa el arrastre. Vulnerables al daño.	Cruceros
Quillas de balance	x		Ligeros	Crean arrastre hidrodinámico Ineficaces a velocidad cero Vulnerables al daño	Muchas aplicaciones, sin importar tipo o tamaño
Aletas	x	x			Barcos pequeños
Control de timón		x			Embarcaciones de media a alta velocidad
Trim tabs		x			Ferries rápidos

En el cuadro 2.8 se muestran los sistemas más utilizados para estabilizar según el tipo de embarcación y la velocidad de la misma. Se detallan las ventajas y desventajas principales de cada uno de los sistemas. Cuando es sistema es activo, implica que existe un dispositivo que detecta el balanceo de la estructura y responde al movimiento en el momento necesario para contra restar el desplazamiento. Por el contrario, si el sistema es pasivo, no se requiere energía adicional o sistemas de control que detecten el movimiento.

Los casos de interés en la aplicación de la plataforma de lanzamiento radica en los dos primeros sistemas: peso muerto y gyroestabilizadores, ya que son eficaces a velocidad cero, que es el caso de la plataforma al momento del lanzamiento cuando permanece anclada.

2.6. Diseño mecánico

El diseño es un proceso que busca brindar una solución a un problema o necesidad establecida. Puede incluir o no la creación de algo físico y es un proceso altamente iterativo. Es un proceso de toma de decisiones, en algunos casos las decisiones son provisionales, por lo que es conveniente reservarse el derecho de hacer ajustes conforme se avance en el proceso [34].

En general el proceso de diseño se puede dividir en etapas o fases, las cuales puede involucrar etapas intermedias iterativas.

- Reconocimiento de la necesidad
- Definición del problema
- Síntesis
- Análisis y optimización
- Evaluación
- Presentación

En cuanto a consideraciones de diseño, se entienden como características importantes que influyen directamente en la función del elemento o sistema a diseñar. Algunas de las consideraciones más importantes son:

- Funcionalidad
- Resistencia / Esfuerzo
- Desgaste
- Seguridad
- Confiabilidad
- Utilidad
- Costo
- Mantenimiento

2.6.1. Criterios de selección de materiales

La selección de un material para construir cualquier mecanismo, es de las decisiones más importantes que se debe tomar, sin embargo esta selección puede ser fácil o tan complicado y desalentador como cualquier problema de diseño. Una técnica básica radica en listar las propiedades importantes de los materiales asociadas con el diseño, estas son la resistencia del material, la rigidez y el costo, seguidamente se hace una lista de los materiales disponibles y se ordenan a partir del mejor y se realiza una depuración de la lista en listas reducidas y se les realiza una revisión más profunda de acuerdo con la importancia

de cada propiedad. [34]

Una forma sencilla de elegir materiales para determinada aplicación, es por medio del histórico de aplicaciones previas. Por ejemplo, para estructuras marinas se deben usar materiales inoxidables, ya que el entorno es altamente corrosivo por el alto contenido de sales del agua de mar, lo que significa un alto desgaste en el material, también se podría implementar el uso de plásticos, pero esto dependerá de la aplicación y de la resistencia que se requiera.

Para realizar una adecuada selección de materiales para la construcción de plataformas marinas fijas o flotantes, barcos y submarinos, se deben tomar en cuenta algunos parámetros [16], tales como

- **Relación fuerza-peso:** Como es sabido, las estructuras marinas son sensibles al peso. Una embarcación con un desplazamiento constante y construida con material pesado, significa una menor carga útil.
- **Tenacidad a la fractura:** También conocido como tenacidad a la muesca. Es una medida de la capacidad del material para absorber energía antes de la deformación plástica que conduce a la fractura, o bien, la capacidad del material para resistir a la fractura frágil en presencia de una muesca.
- **Resistencia a la fatiga:** La falla por fatiga puede ocurrir a un material que está sometido a cargas cíclicas o la fatiga por corrosión que conduce al agrietamiento por corrosión. La falla por fatiga es compleja, se inicia debido a la generación de una pequeña grieta que crece hasta convertirse en una falla mayor bajo cargas cíclicas repetidas.
- **Facilidad de fabricación, soldabilidad y facilidad de mantenimiento:** La soldadura es la causante muchos problemas en aceros de alta resistencia, aluminio y titanio. Adicional a esto, la inducción de hidrógeno en el metal provoca problemas de fragilización por hidrógeno.
- **Costo y disponibilidad:** Este depende del costo unitario y de la cantidad de material utilizado. Generalmente, los aceros tienen un costo unitario muy alto, por lo tanto, una pequeña reducción de peso puede que no tenga un efecto significativo sobre el costo. El uso de aceros de mayor resistencia es costoso y solo se pueden usar si se realizan otras consideraciones tecnológicas. Las aleaciones de aluminio son mucho más ligeras que el acero, pero el costo unitario es mayor.

2.6.2. Resistencia de materiales

Budynas y Nisbett definen acerca la resistencia de los materiales que: “La supervivencia de muchos productos depende de la forma en que el diseñador ajusta el esfuerzo inducido por la carga para que sea menor que la resistencia en un punto de interés” [34]. Esto indica que siempre se debe conocer el valor exacto del esfuerzo al que se someterá el diseño y que se debe establecer una holgura o factor de seguridad para garantizar que no habrá una falla inesperada a pesar de las incertidumbres que puedan existir.

La resistencia de un material depende de una gran cantidad de factores, que deben ser analizados para desarrollar un diseño adecuado. De acuerdo a [34], la resistencia es una propiedad inherente a la pieza y depende de la selección, el tratamiento y procesamiento del material. Existen varios tipos de resistencia según el análisis que se requiera; entre

ellas: la resistencia a fluencia, resistencia última y resistencia a cortante.

Por otro lado, el esfuerzo es una propiedad de estado [34], depende del punto específico dentro del cuerpo en el cual se haga el análisis y es función de la carga aplicada, la geometría, la temperatura, y el proceso de manufactura. El esfuerzo se representa con la letra σ y tiene unidades de fuerza entre área.

Un enfoque general para determinar la seguridad de un diseño es establecer un factor de seguridad, que se determina como la resistencia del material respecto a esfuerzo permisible o al que se somete la estructura. El factor de seguridad depende de la aplicación del diseño ya que en ocasiones se permite un sobre diseño mayor por aspectos de seguridad, sin embargo el costo de los materiales puede influir en determinar un factor de seguridad más ajustado.

$$\eta = \frac{S}{\sigma_{perm}} \quad (2.35)$$

Donde:

- η es el factor de seguridad
- S es la resistencia del material
- σ es el esfuerzo permisible

Capítulo 3

Diseño preliminar

Como punto de partida en este capítulo fue importante especificar los cohetes que se usarán en la plataforma. Como se mencionó al inicio del capítulo 2, los cohetes se pueden clasificar como baja, media y alta potencia, dentro de estos últimos se cuentan con los tipos de cohetes desde la H hasta la O, diferenciados por su respectivo rango de impulso. Para operar cohetes de alta potencia es necesario contar con una certificación en cohetaría de alta potencia, la cual asegura que los cohetes serán lanzados bajo los estándares de seguridad establecidos. La certificación nivel 1 permite operar cohetes tipo H e I, la certificación nivel 2 permite operar cohetes J, K y L, y la certificación nivel 3 para los tipos M, N y O. En el país se cuenta con personas certificadas en los niveles 1 y 2 [35]. Con base en lo anterior, para lanzamientos desde la plataforma se seleccionaron los cohetes tipo H, I y J, los cuales requieren un perímetro libre de seguridad de 0,5 km para los H, 1 km para los I y de 1,6 km para los J.

En la zona de Golfito se cuenta con espacio de mar libre entre los 2 km y los 3 km, por lo que se cumple con el requerimiento de perímetro libre de flora, fauna, edificaciones y personas para el lanzamiento de los cohetes seleccionados. Sin embargo, se debe considerar, al momento del lanzamiento, la ausencia de embarcaciones dentro del perímetro.

3.1. Parámetros iniciales

Para dar inicio al diseño de la plataforma fue importante tomar en cuenta algunos parámetros iniciales relacionados al peso y dimensiones. Con el fin de realizar un montaje seguro y adecuado del cohete en la lanzadera, se consideró la presencia de dos personas sobre la plataforma. Como referencia, se estableció que el peso de cada persona es, en promedio, de 80 kg. Además, los cohetes de alta potencia tienen un peso promedio de 1 kg. Para dimensionar el peso de la lanzadera, se toma como referencia la lanzadera con la que cuenta el GIA, esta tiene forma de trípode y un peso de 20 kg. Cada base de la lanzadera mide 0,91 metros y el mástil principal mide 2 metros. Se considera que pueden presentarse otras cargas sobre la plataforma, como sistemas de instrumentación, entre otros. Por tanto, se estimó un peso de 10 kg para estos fines.

Otro parámetro importante es el casco de la plataforma, que corresponde a la superficie destinada para la flotabilidad. En la selección del casco, se consideró la velocidad requerida de la embarcación, el espacio en cubierta y la estabilidad. El estilo de doble casco, se adapta bien a las necesidades, ya que se favorece la estabilidad. El estilo “poonton”, que es similar al tipo “catamarán”, tiene una geometría simple respecto a los elementos flotadores y se utiliza para aplicaciones donde la velocidad de la embarcación es baja. Dado que la

plataforma no requiere de un gran desempeño hidrodinámico en cuanto a velocidad, se eligió este diseño, que proporciona un amplio espacio en cubierta. Los elementos flotadores consisten en dos estructuras de geometría cilíndrica distribuidas en los extremos de la estructura.

3.2. Análisis de flotabilidad

El análisis de flotabilidad de la plataforma se desarrolló con base en el principio de Arquímedes. Haciendo uso de la ecuación 2.16, que relaciona el volumen del fluido desplazado, el peso de la plataforma, el radio de los elementos flotadores y la altura del nivel del agua respecto a los cilindros, se determina el diámetro de los flotadores que permite que la plataforma flote.

Tomando como referencia el peso de los elementos mencionados anteriormente, más el peso de la estructura, tomado del modelo CAD realizado en SolidWorks, la línea de flotación es de 37 cm por encima de la base de los cilindros para un diámetro de 60 cm, lo que significa que se los flotadores se sumergen por encima de la mitad de su diámetro y la plataforma se mantiene en equilibrio hidrostático. La solución se obtuvo por medio del software MatLab, creando un código para realizar distintas iteraciones hasta encontrar la dimensión de flotador más adecuada.

3.3. Selección de materiales

Como parte del proceso de diseño se debe realizar una adecuada selección de los materiales a utilizar. En términos generales, hay algunas consideraciones preliminares que se tomaron en cuenta, las cuales se mencionan a continuación:

- El peso final de la plataforma.
- Facilidad de manufactura.
- La exposición a altas temperaturas debido a los gases calientes que son expulsados por medio de la tobera del cohete.
- La naturaleza del medio, en este caso el agua de mar, que es altamente corrosiva.
- Degradación por la exposición solar.
- Filtración de agua o humedad, que podría deteriorar algunos materiales.

Con base en lo anterior se realizó una investigación y análisis de algunos materiales usados en ciertas aplicaciones navales. Se consideraron los siguientes materiales y sus implicaciones:

- **Fibra de vidrio:** Se utiliza como material compuesto junto con resina polimérica para generar diferentes geometrías. Una vez trabajado, es un material resistente, con tendencia frágil, ligero y resistente a la corrosión. Es muy utilizado en aplicaciones marinas por su capacidad de producir geometrías complejas, como el caso de algunos cascos de barcos. La manufactura de este material es laboriosa y compleja, ya que se requiere, en primera instancia, de la confección de un molde para generar el producto final. Además, la resina polimérica más adecuada en esta aplicación no se comercializa con vastedad en el país y las más convenientes se deben importar.

- **Aluminio:** Es un material ligero, dúctil y resistente a algunos tipos de corrosión. En este caso la manufactura es más simple, ya que existe en el mercado nacional una amplia gama de presentaciones de aleaciones de aluminio, tales como: láminas, placas, perfiles, entre otros. Una ventaja de utilizar este material es que se evita la filtración de agua que se presenta en materiales porosos, además del beneficio respecto al peso de la plataforma. Debido al entorno marino que caracteriza esta aplicación, es recomendable utilizar aleaciones de aluminio de grado marino. Algunas de estas aleaciones se consiguen en el mercado nacional. Una desventaja consiste en que el aluminio no es un material económico respecto a otros metales.
- **Acero:** Se considera el acero porque es un material fácil de manufacturar, económico, resistente y ampliamente utilizado en la industria. Sin embargo, tiene la desventaja de ser un metal pesado y no resistente ante muchos tipos de corrosión, especialmente frente a la corrosión electrolítica. Aunque con los cuidados preventivos adecuados se podría extender su vida útil. En el caso de aplicaciones marinas, el factor determinante que resulta en el descarte de este material es el aumento en el peso de las estructuras.
- **Madera:** La madera es muy usada para la manufactura de embarcaciones, principalmente en geometría de cascos convencionales. Con el debido proceso de curación, puede generar buenos resultados respecto a la resistencia y durabilidad. Sin embargo, al ser un material poroso, se puede presentar inconvenientes de filtración de agua. Además, el diseño se ve limitado, ya que la madera no permite la manufactura de algunas geometrías con facilidad. La mayor desventaja encontrada para la aplicación que interesa en este proyecto, es que la madera es un material inflamable en su estado natural, por lo que existe el riesgo de incendio por la exposición a los gases calientes del cohete.
- **Polímeros:** Algunos compuestos poliméricos pueden presentar ventajas respecto al peso, resistencia y precio. Sin embargo, la continua exposición solar provoca degradación acelerada en estos materiales. Además, algunos tipos de polímeros no son resistentes al calor por lo que la exposición a los gases calientes del cohete podrían generar daños anticipados en el material.

3.4. Diseño preliminar

Basado en los parámetros iniciales, se realizaron algunos bocetos preliminares con el fin de encontrar la geometría que mejor se adapta al resultado esperado. Se inició con un modelo de 5 metros de largo por 5 metros de ancho, el cual se fue simplificando de acuerdo a los requerimientos de operación hasta obtener a un modelo de 3,5 metros de largo por 2,5 metros de ancho y Se colocaron dos cilindros a lo largo del lado mayor de esta geometría. El boceto de este diseño preliminar se muestra en la figura 3.1.

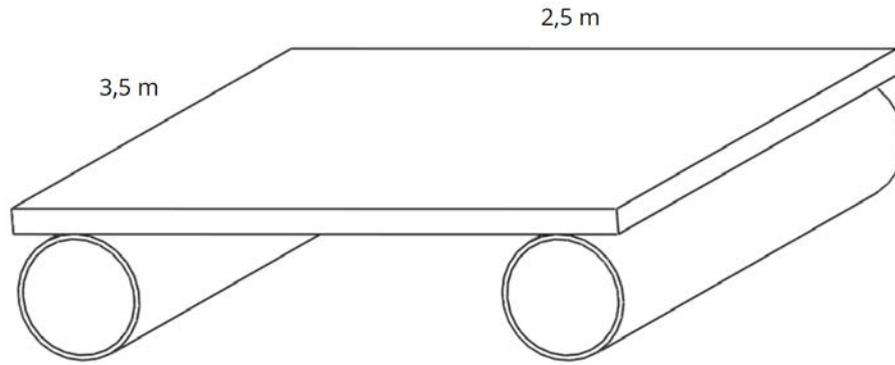


Figura 3.1: Diagrama preliminar de la plataforma [Elaboración propia]

La estructura base consiste en un marco de aluminio reforzado con perfiles horizontales y diagonales para que soporten esfuerzos de flexión de la carga distribuida sobre la cubierta de la plataforma. También los esfuerzos en cortante debido a la fuerza de remolque que se ejercerá sobre la estructura al trasladarla al sitio de lanzamiento. En la Figura 6.4 se muestra el modelo preliminar de la estructura base, con la configuración elegida se distribuye el flujo de fuerzas a lo largo de la misma.



Figura 3.2: Estructura base [Elaboración propia]

Para el sistema de remolque se le añade a la estructura base perfiles diagonales en la parte frontal que permite desplazar la plataforma en el mar, en la unión se coloca una junta que permite el cambio de dirección de la fuerza aplicada, tal como se ilustra en la Figura 3.3

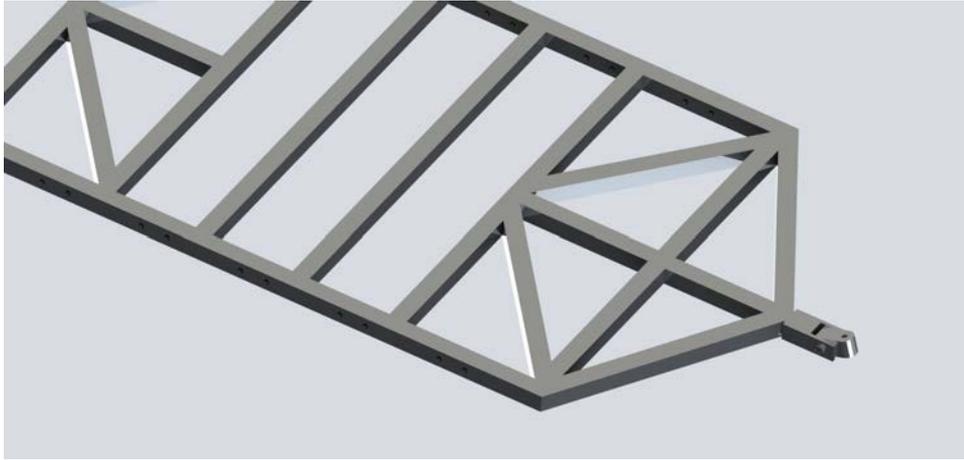


Figura 3.3: Sistema de remolque [Elaboración propia]

Como se mencionó, se eligió el tipo poonton para el casco de la plataforma, estos son los elementos flotadores y corresponden a dos cilindros huecos sellados con tapas. En la dirección del remolque se colocan tapas con forma de cono con el fin de reducir la fricción con el agua al desplazar la plataforma al lugar de lanzamiento. La estructura sería confeccionada con soldadura y en la parte superior se le colocan pletinas longitudinales que permiten unir los flotadores a la estructura base por medio de pernos, esto también facilita el mantenimiento de los mismos en caso de que se necesite reemplazar alguno.



Figura 3.4: Elementos flotadores [Elaboración propia]

El diseño preliminar que se ha desarrollado cuenta con los elementos mencionados anteriormente, de igual forma se considera aislar la lanzadera del resto de la plataforma con el fin de que colocar el sistema de control estabilizador que asegure un adecuado lanzamiento vertical del cohete y evitar que alguna perturbación varíe el desplazamiento del mismo, este mecanismo estará ubicado debajo de la lanzadera. El objetivo con la lanzadera es contar con una superficie en la que se puedan colocar y fijar varios tamaños de lanzadera, que sean del mismo tamaño o más pequeñas que la lanzadera de referencia. En la figura 3.5 se puede observar el modelo preliminar de la plataforma.



Figura 3.5: Ensamble completo del modelo preliminar [Elaboración propia]

Preliminarmente, para asegurar la estabilidad de la lanzadera, se hizo un estudio de diferentes sistemas de control, proponiendo el uso de un péndulo doble o gimbal, que consiste en colocar un soporte giratorio que permita la rotación de la lanzadera alrededor de los ejes y un contrapeso, con el fin de mantenerla en posición vertical a pesar de los movimientos oscilatorios provocados por el movimiento de las olas, esto gracias a la inercia mecánica que se obtiene debido al contrapeso y que dificultaría el cambio en la posición de la lanzadera, ya que la devolvería a su posición original, generando una restitución ante el movimiento de las olas. Para llevar a cabo esto, se debe realizar un agujero en el piso de la plataforma, justo debajo de la lanzadera, hacer uso de rodamientos y ejes que permitan el movimiento giratorio y que la lanzadera cuente con el contrapeso en la parte posterior.

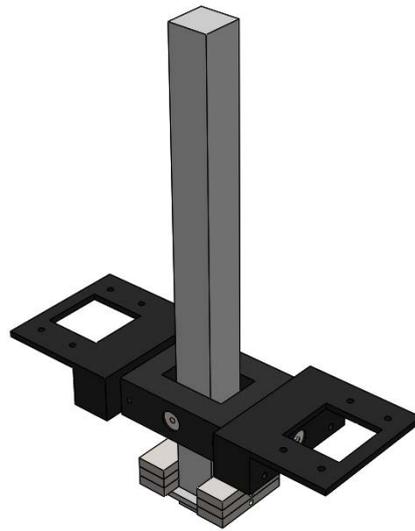


Figura 3.6: Modelo del péndulo doble [Elaboración propia]

3.5. Prototipado

Para comprobar la estabilidad y comportamiento de la plataforma en un entorno con condiciones similares a las que se generan en Golfito se planteó la construcción y evaluación de un modelo a escala reducida del diseño preliminar. Se escogió utilizar una escala 1:10 por facilidad de construcción, ensamble y disponibilidad de materiales.

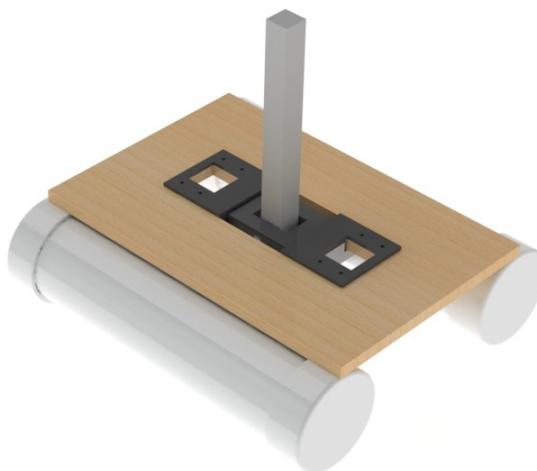


Figura 3.7: Prototipo a escala reducida.[Elaboración propia]

Para llevar a cabo la construcción del prototipo, se buscó la manera de simplificar el modelo y hacer uso de tecnologías disponibles de fácil acceso, por lo que con la ayuda del Taller de la escuela de Ingeniería Mecánica y de las impresoras 3D del Laboratorio de Mecatrónica, se realizó el mecanizado y ensamble de las partes. Los materiales usados se muestran en el Cuadro 3.1:

Cuadro 3.1: Materiales usados para el prototipado.

Parte	Material
Flotadores	Tubo PVC
Piso	Tabla de plywood
Lanzadera	PLA - Impresión 3D
Sistema del péndulo	Maquinado en Nylon
Sujeción de flotadores a piso	Grapas - Gazas plásticas

Adicionalmente, se adquirieron 4 rodamientos para el sistema del péndulo y 3 piezas de acero para el contrapeso de la lanzadera.

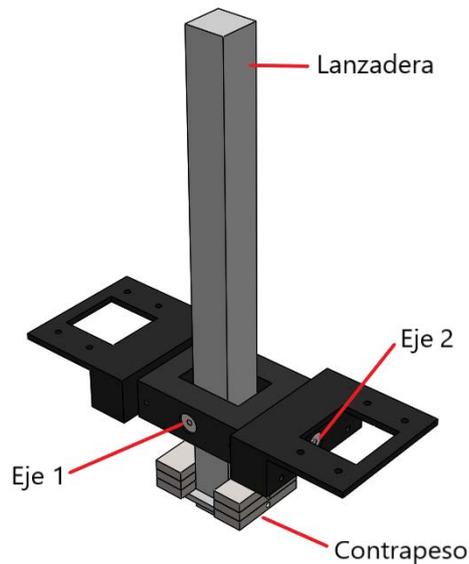


Figura 3.8: Ensamble del péndulo doble usado en el prototipo [Elaboración propia]

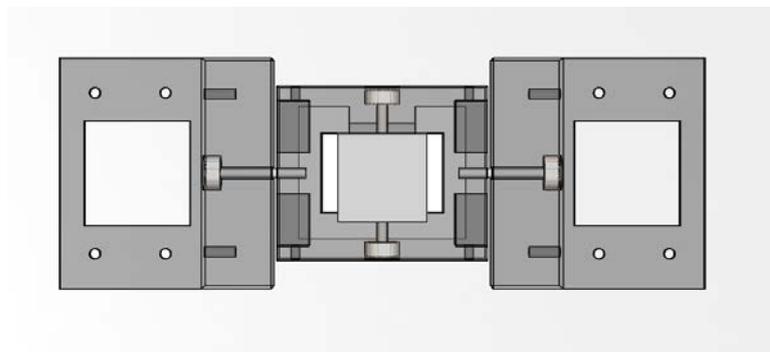


Figura 3.9: Vista inferior del péndulo doble [Elaboración propia]

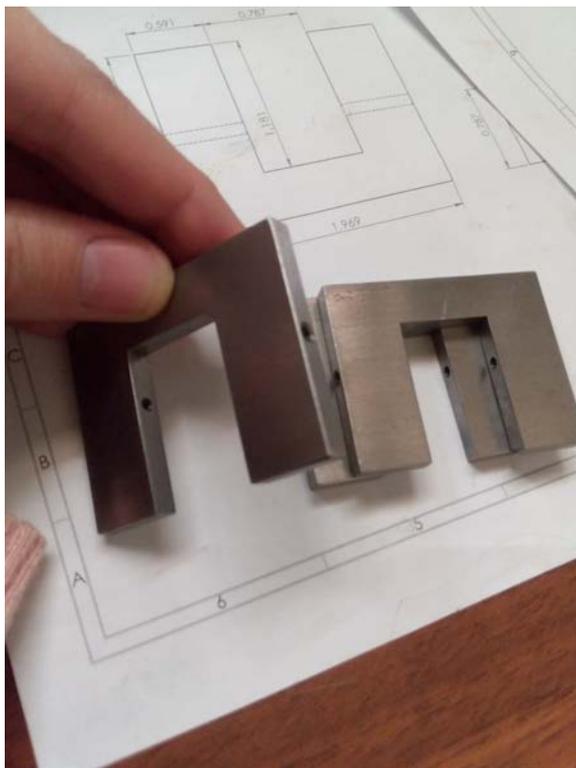


Figura 3.10: Contrapesos fabricados para el prototipo [Elaboración propia]

En el Instituto de Investigaciones en Ingeniería (INII) se encuentra la unidad de Ingeniería Marítima de Ríos y Estuarios (IMARES). Dentro de los objetivos de esta unidad esta la determinación de condiciones de oleaje de las zonas marítimas del país. Además, cuenta con un tanque de agua que se utiliza para simular condiciones de oleaje específicos. Según las condiciones documentadas para la zona de Golfito, en la zona se generan olas de 60 cm de altura con periodos de 6 s. Por tanto, para coincidir con la escala del prototipo 1:10, se configuró el tanque para generar olas de 6 cm con un periodo de 1,90 s.

Con el objetivo de generar un modelo matemático de la plataforma y comparar con datos experimentales, se realizaron dos experimentos en el tanque. El primer ensayo consistió en un experimento de balance en aguas tranquilas. Para llevar a cabo este ensayo, se colocó el prototipo en el tanque y se aplicó una fuerza para inclinar la plataforma a un ángulo de escora determinado, tal como se detalla en la figura 4.3. El objetivo de este experimento fue encontrar el factor de amortiguamiento de la plataforma definido por la ecuación 2.30.

El segundo ensayo consistió en evaluar el comportamiento de la plataforma al interactuar con las condiciones de oleaje definidas anteriormente. Para ello se colocó la plataforma en el tanque sujeta con un peso de plomo que funcionó como ancla para evitar el desplazamiento de la plataforma. Sin embargo, durante el ensayo se observó una superposición del movimiento de traslación y el de rotación del prototipo, por lo que el procesamiento los datos de inclinación no fue posible con el equipo y software utilizado. Por tanto, este experimento se evaluó cualitativamente. Por observación se determinó que la inclinación del prototipo fue muy poca en las condiciones de oleaje generadas y que además no generaba mayor impacto en el sistema de péndulo de la lanzadera, ya que al ser inclinaciones muy pequeñas, el sistema se tornaba innecesario.

Bajo la observación de que el comportamiento del sistema péndulo-lanzadera durante las pruebas no era necesario, ya que la restitución al movimiento no era requerida dada la estabilidad de la plataforma, se mantuvo fijo o sujeto el sistema del péndulo para realizar la recolección de datos y analizar un sólo sistema de plataforma-lanzadera.

Capítulo 4

Análisis de resultados

4.1. Ensayo 1 Prototipo

Se llevó a cabo el ensayo de movimiento de balance del prototipo con el objetivo de determinar el momento de amortiguamiento de la plataforma. Para ejecutar este experimento, se colocó el prototipo en el tanque simulador de oleaje tal como se observa en la figura 4.1. En el extremo superior de la lanzadera se colocó un indicador hecho de un trozo de cartulina color amarillo con el objetivo de rastrear el movimiento de la lanzadera.

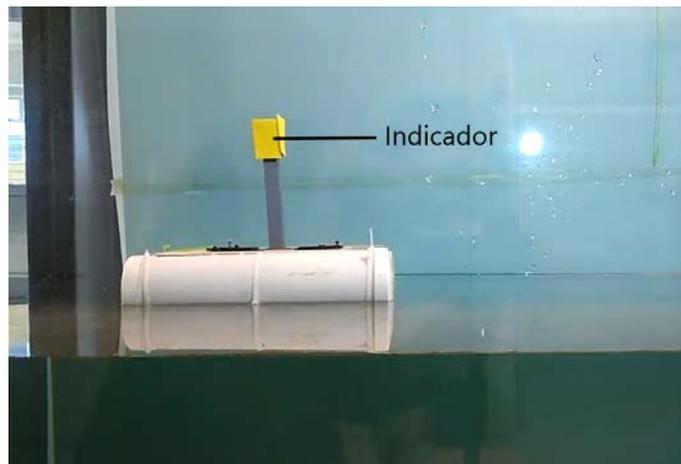


Figura 4.1: Prototipo en posición de equilibrio. [Elaboración propia]

4.1.1. Ángulo de inclinación inicial

Para ejecutar el experimento se ejerce una inclinación inicial en un extremo de la plataforma. El ángulo de inclinación se definió como el ángulo que se forma cuando la circunferencia de uno de los extremos de los flotadores queda bajo la superficie del agua. En la figura 4.2 se muestra la inclinación de la plataforma y el ángulo que se forma respecto al eje vertical.

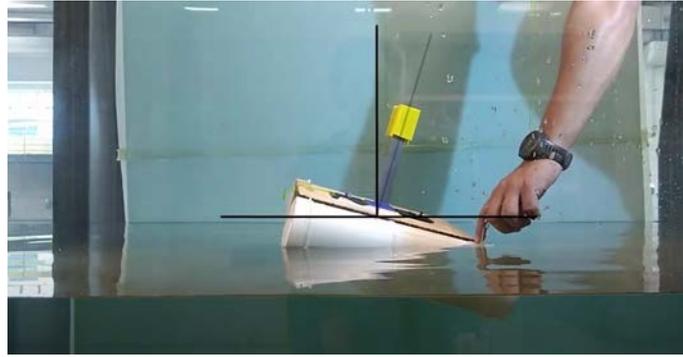


Figura 4.2: Ángulo de inclinación inicial.[Elaboración propia]

A partir del diámetro y largo de los flotadores, se calculó el ángulo de inclinación inicial por relación trigonométrica y los datos de la figura 4.3.

$$\phi_0 = \tan\left(\frac{d}{L}\right)$$

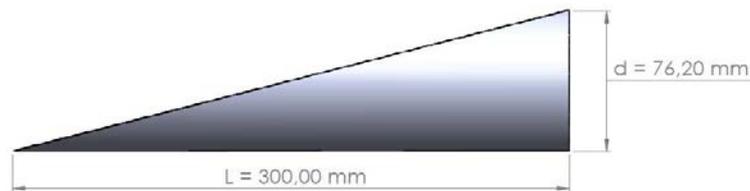


Figura 4.3: Dimensiones del flotador para el cálculo del ángulo inicial.[Elaboración propia]

Por tanto:

$$\phi_0 = 15^\circ$$

4.1.2. Procesamiento de los datos

Posteriormente, se soltó la plataforma desde la inclinación inicial y se grabó el movimiento de balanceo con una cámara de celular. Para procesar los datos del video, se utilizaron los códigos ejecutados en MATLAB que se pueden consultar en los Anexos A.2.1 y A.2.2, con el objetivo de localizar el indicador amarillo de la imagen del video. Esto se logró mediante la binarización de la imagen de modo que los píxeles de color amarillo se convirtieran en píxeles rastreables por el programa, tal como se muestra en la figura 4.4. Luego, se asignó un centroide a la región resaltada y se obtuvieron las posiciones del centroide respecto al tiempo del video.

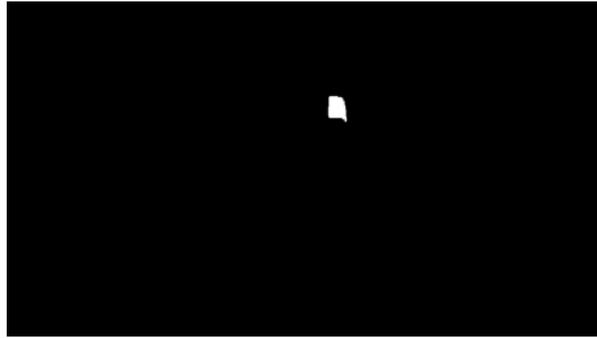


Figura 4.4: Imagen binarizada para el rastreo de datos. [Elaboración propia]

4.1.3. Momento de amortiguamiento

El objetivo del ensayo fue obtener una función oscilatoria amortiguada del ángulo de inclinación respecto al tiempo, como la que ilustra en la figura 2.9. A partir de las posiciones del centroide del indicador y el ángulo de inclinación inicial se determinaron los datos del eje vertical de la gráfica que corresponde al ángulo de escora del prototipo. En función de los “frames” del video y el tiempo total del ensayo, se definieron los datos del eje horizontal. Como resultado se obtuvo la gráfica que se muestra en la figura 4.5. Los resultados obtenidos mostraron un comportamiento de un sistema amortiguado similar a lo observado en la teoría (ver figura 2.9). Bajo la premisa que el comportamiento del sistema responde a la forma de la ecuación 2.32, se calculó el factor de amortiguamiento del sistema mediante las ecuaciones 2.25 y 2.27 y los datos de la gráfica. En el cuadro 4.1 se resumen los resultados de este cálculo.

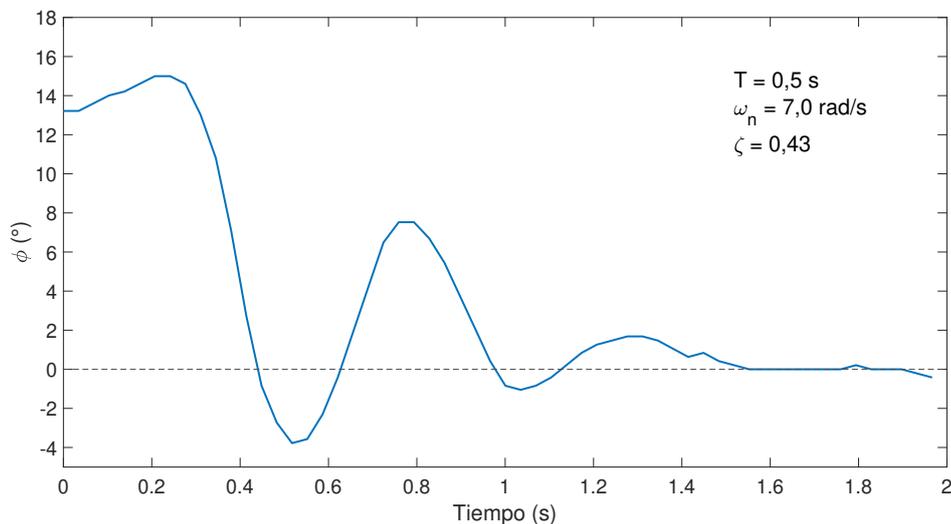


Figura 4.5: Amortiguamiento del prototipo registrado en el ensayo.

Una vez calculado el factor de amortiguamiento ζ , se determinó el valor del momento de amortiguamiento del prototipo a partir de las ecuaciones 2.30, 2.33. En el cuadro 4.1 se resumen los datos utilizados en este cálculo.

Cuadro 4.1: Resumen del cálculo del coeficiente de amortiguamiento del prototipo.

Variable	Valor	Unidades
$\phi(t)$	0,13	rad
$\phi(t + T)$	0,029	rad
I	0,01	kg/m ²
I_a	0,002	kg/m ²
ζ	0,43	-
ω_n	7,0	rad/s
ν	3,0	-
B	0,072	N · m · s

4.1.4. Momento restaurador

De acuerdo con la ecuación 2.19 el radio metacéntrico se calcula a partir de la inercia del área de flotación respecto al eje transversal que pasa por el centro de gravedad y el volumen de agua desplazada. Para el caso del prototipo, el área de flotación corresponde a una sección rectangular. Por tanto, la inercia del área de flotación se puede calcular mediante la ecuación:

$$I = \frac{1}{12} a^3 \cdot b$$

Donde:

- a es la dimensión del lado perpendicular al eje (m)
- b es la dimensión del lado paralelo al eje (m)

A partir del radio metacéntrico se calculó la altura metacéntrica, esta distancia junto con el desplazamiento conforman el momento restaurador tal como se muestra en la ecuación 2.24. En el cuadro 4.2 se resumen los datos empleados en este cálculo.

Cuadro 4.2: Resumen del cálculo del momento restaurador del prototipo.

Variable	Valor	Unidades
I	0,0034	m ⁴
∇	0,0015	m ³
BM	0,23	m
GM	0,18	m
Δ	1,54	kg

4.1.5. Resultados del ensayo

A partir del resultado del momento de amortiguamiento obtenido del ensayo 1, se resolvió el modelo matemático del prototipo a partir de la ecuación de movimiento planteada en 2.23. El resultado de la ecuación para una condición inicial de 15° se muestra en la figura 4.6.

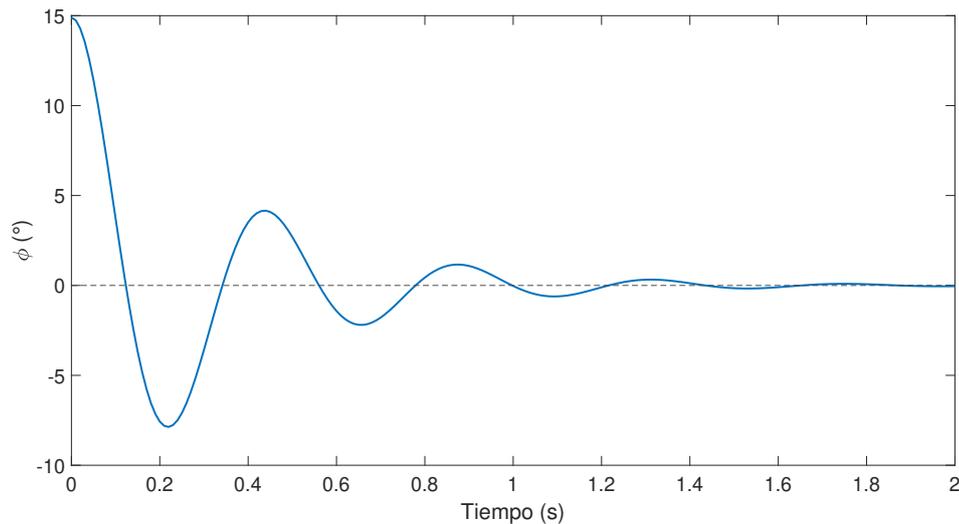


Figura 4.6: Amortiguamiento en el modelo del prototipo a partir del ángulo inicial.

Con el objetivo de comparar los resultados obtenidos en el ensayo respecto a la solución del modelo, se graficaron ambas curvas en la figura 4.7.

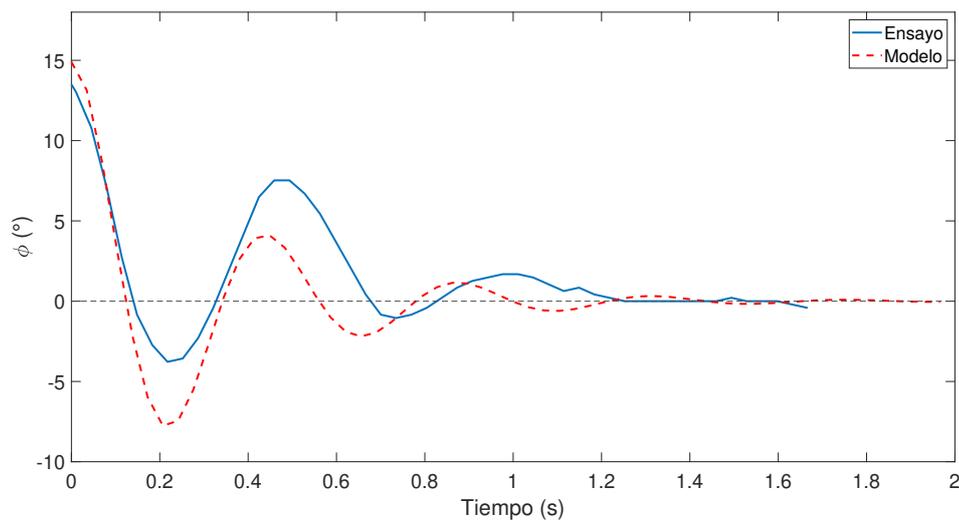


Figura 4.7: Ensayo 1 vs modelo matemático.

En la figura 4.7 se observa un pequeño desfase entre las curvas. Además, la amplitud difiere aproximadamente en 5° . Esta diferencia podría estar relacionada con el error asociado a la toma y procesamiento de datos. A su vez, el modelo que es simplificado y linealizado para ángulos pequeños podría tener injerencia en esta diferencia. Sin embargo, se observa que el periodo en ambas curvas es similar, por lo que la frecuencia natural del modelo coincide con la frecuencia natural del prototipo. A partir de esta premisa se puede inferir que el modelo se comporta como el prototipo bajo la condición de ángulos pequeños.

4.2. Estabilidad

La estabilidad inicial en ángulos pequeños se evaluó en la sección anterior mediante el cálculo de altura metacéntrica. El problema con los ángulos grandes consiste en que la suposición de que el radio metacéntrico se mantiene constante ya no es válida, por tanto se debe realizar un análisis adicional de estabilidad. Este análisis se realizó mediante un complemento de SolidWorks para cálculo hidrodinámico denominado Float Soft, en el cual se resuelve iterativamente la ecuación 2.20 para un rango de ángulos establecidos. De esta forma se obtuvieron los resultados del brazo de palanca o momento restaurador para el plano longitudinal y transversal, como se muestra en las figuras 4.8 y 4.9.

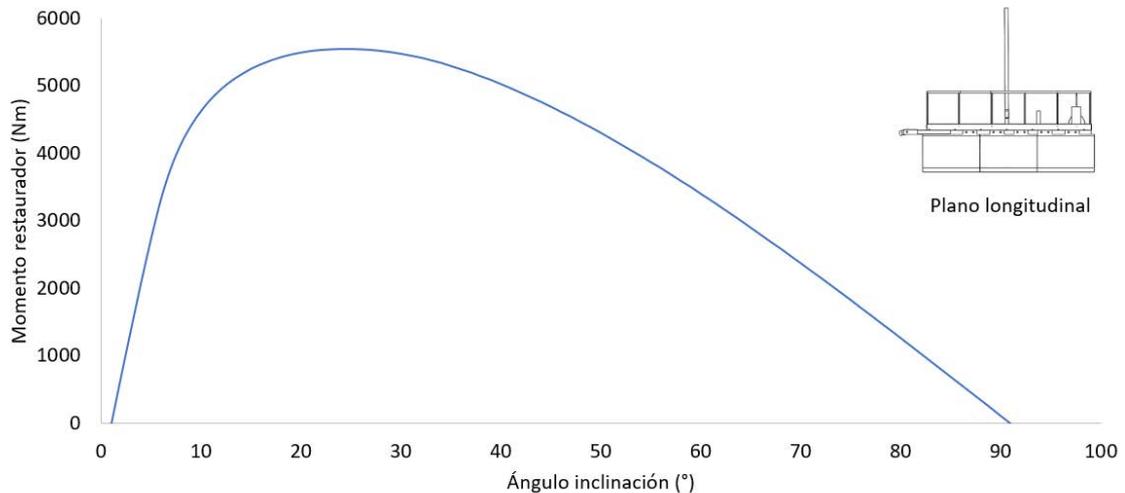


Figura 4.8: Momento restaurador respecto al plano longitudinal. [Elaboración propia]

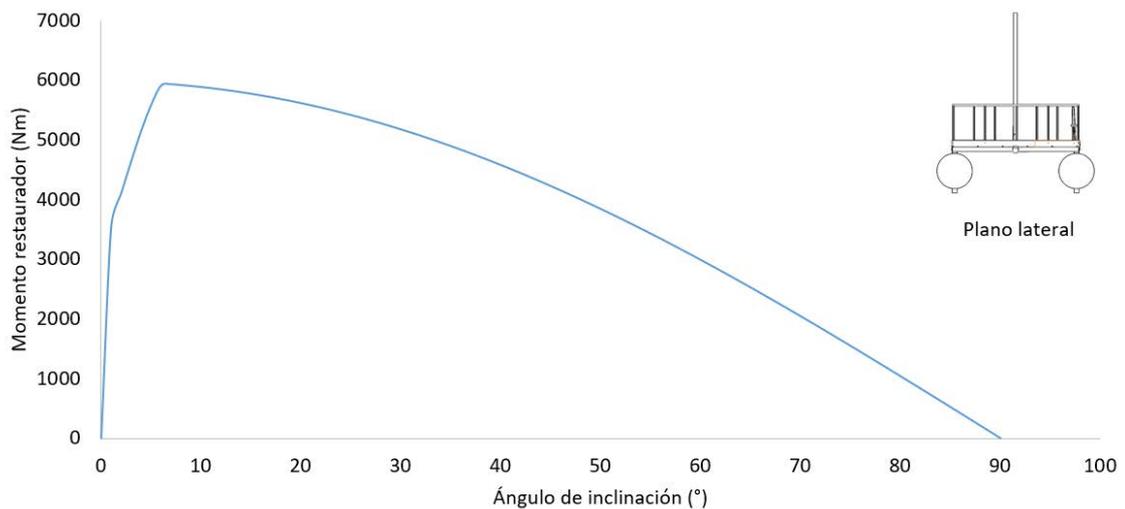


Figura 4.9: Momento restaurador respecto al plano lateral. [Elaboración propia]

En ambos planos, el rango de estabilidad alcanza los 90° . El momento restaurador máximo determina la magnitud admisible del momento escorante máximo constante que puede soportar la plataforma sin volcarse. En el plano lateral el momento restaurador máximo es de 6000 Nm, mayor que el plano longitudinal que alcanza cerca de 5500 Nm. Por tanto, se considera que en el sentido de giro del plano lateral la plataforma es más

estable.

La curva de estabilidad en ambos planos se encuentra localizada hacia la izquierda, es decir, su valor máximo se ubica cerca de los 15° . Esta cualidad es característica de las embarcaciones tipo Pontoon o de doble casco e indica mayor estabilidad en ángulos pequeños. En contraste, la curva de la figura 2.8 corresponde a una curva de un barco de un solo casco y se obtiene el valor máximo cerca de los 45° .

4.3. Modelo de la plataforma

Para verificar el comportamiento angular de la plataforma en las condiciones de oleaje de Golfito, se extrapoló el resultado de factor de amortiguamiento del prototipo obtenido en el ensayo 1. Para ello, se mantuvo el factor de amortiguamiento ζ y mediante la fórmula 2.30 se sustituyó el valor de inercia de la plataforma. Los resultados de este cálculo se detallan en el cuadro 4.3 para ambos planos de interés.

Cuadro 4.3: Resumen del cálculo del factor de amortiguamiento de la plataforma.

Variable	Plano longitudinal	Plano transversal
ν	3,00	3,00
I (kg/m ⁴)	732,46	757,20
I_a (kg/m ⁴)	146,49	151,44
B (kg/m ⁴)	5 268,76	5 466,66

Con el objetivo de mantener un momento restaurador equivalente al del prototipo y por tanto, emular su comportamiento hidrodinámico, se mantuvo, en el diseño de la plataforma, el centro de gravedad en una posición similar al centro de gravedad del prototipo. Para lograr esta similitud se añadieron algunos elementos de peso al diseño que se detallan más adelante. En el cuadro 4.4, se detalla el resultado del cálculo de momento restaurador de la plataforma en ambos planos de interés.

Cuadro 4.4: Resumen del cálculo del momento restaurador de la plataforma.

Variable	Plano longitudinal	Plano transversal
Δ (kg)	488,5	488,5
∇ (m ³)	0,476	0,476
I (m ⁴)	5,0	4,2
BM (m)	10,5	8,7
GM (m)	10,1	8,3

La altura metacéntrica obtenida es positiva, por lo que se cumple con el requisito para estabilidad inicial. En la figura 4.10, se muestra el comportamiento de la plataforma con una condición inicial de 15° de inclinación. La frecuencia natural de la plataforma es de 7,4 rad/s.

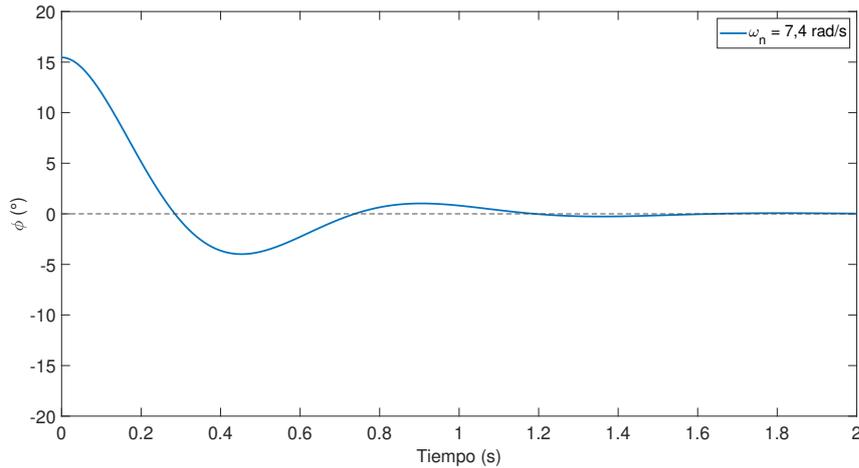


Figura 4.10: Amortiguamiento en el modelo de la plataforma.

4.3.1. Momentos externos

Durante los análisis preliminares se calculó la fuerza del viento sobre la superficie de la lanzadera mediante el término de energía de flujo por velocidad de la ecuación de Bernoulli:

$$F_v = A_t \cdot \rho_a \cdot \frac{v^2}{2} \quad (4.1)$$

Donde:

- F_v es la fuerza del viento (N)
- A_t es el área de la lanzadera perpendicular a la dirección del viento (m^2)
- ρ_a es la densidad del aire a condiciones atmosféricas estándar ($1,2 \text{ kg/m}^3$)
- v es la velocidad promedio del viento ($8,9 \text{ m/s}$)

Al resolver esta ecuación se obtuvo un resultado de $F_v = 5,8 \text{ N}$. Este valor es de un orden de magnitud menor que la magnitud de otras cargas sobre la plataforma, lo cual se podía inferir ya que el área de superficie de la lanzadera expuesta a la fuerza del viento es considerablemente pequeña respecto a las dimensiones de la plataforma. Otro factor influyente es que la velocidad del viento promedio en Golfito es baja. Por tanto, se consideró que la fuerza del viento es despreciable en el análisis del comportamiento hidrodinámico de la plataforma.

La acción del oleaje sobre la superficie de los flotadores es la carga más influyente en el comportamiento dinámico de la plataforma. Bajo la premisa de olas regulares, mediante la ecuación 2.34, se calculó el momento escorante para distintas condiciones de oleaje en Golfito. En el cuadro 4.5, se resumen los parámetros para el cálculo del momento escorante generado por las olas del mar.

Cuadro 4.5: Resumen de datos de olas regulares para el cálculo de momento escorante en cuatro escenarios de oleaje.

Variable	Oleaje promedio	Oleaje por embarcaciones grandes	Oleaje corto	Resonancia
a (m)	0,25	0,5	0,1	0,08
T (s)	4	2,18	1,5	0,85
λ (m)	24,9	7,41	3,51	1,13
k (rad/m)	0,25	0,85	1,8	5,6
ω_o (radian/s)	1,57	2,88	4,18	7,40
α_m (rad)	0,063	0,42	0,18	0,45

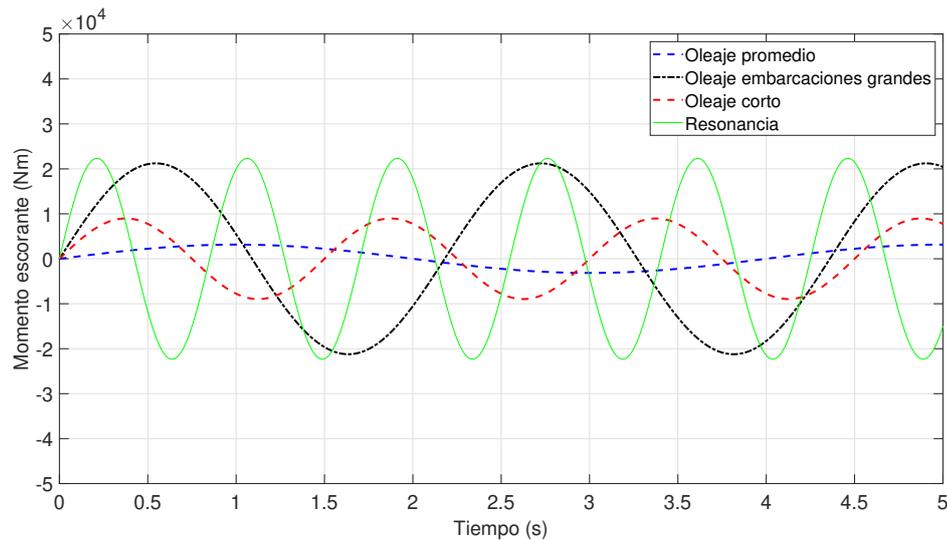


Figura 4.11: Momento escorante en los cuatro escenarios de oleaje.

De la figura 2.34, se concluye que la condición de oleaje promedio presenta la menor magnitud de momento escorante de las condiciones analizadas. Por otro lado, el oleaje por embarcaciones grandes y el oleaje que genera resonancia, presentan las magnitudes mayores de momento escorante, mientras que el oleaje con periodo corto debido al efecto del viento genera una magnitud intermedia entre los escenarios.

4.3.2. Respuesta del sistema plataforma

De acuerdo con la información obtenida en el capítulo 2.2.6, sobre las condiciones de Golfito se plantearon cuatro casos que se consideraron de interés para verificar el comportamiento de la plataforma. En cada caso se realizó un estudio a partir del supuesto de olas regulares.

El primer caso fue considerar las condiciones de oleaje promedio, es decir, una amplitud de olas 0,25 m con un periodo de 4 s. De acuerdo a los datos recolectados estas condiciones son las predominantes en Golfito y el oleaje es generado principalmente por la estela de embarcaciones pequeñas.

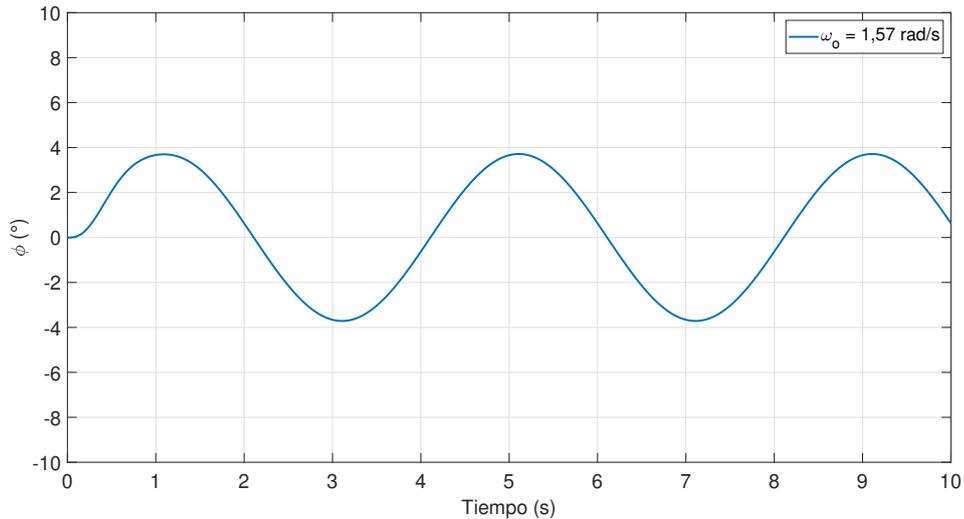


Figura 4.12: Respuesta del sistema en condiciones promedio.

En la figura 4.12 se muestra la respuesta del sistema respecto a la inclinación de la plataforma. Se observa que el ángulo de inclinación oscila con un punto máximo cerca de los 4° . De acuerdo con los requerimientos de seguridad para el lanzamiento de cohetes de alta potencia el ángulo de inclinación no debe sobrepasar los 30° . Por tanto, bajo las condiciones promedio de oleaje en Golfito, la plataforma cumple con estos requerimientos.

En el segundo caso se consideraron condiciones de oleaje ocasionado por la estela de embarcaciones grandes. Con una amplitud de 0,50 m y periodo de 2,18 s. Esta condición requiere barcos con esloras superiores a 12 m y una velocidad de 5,1 m/s.

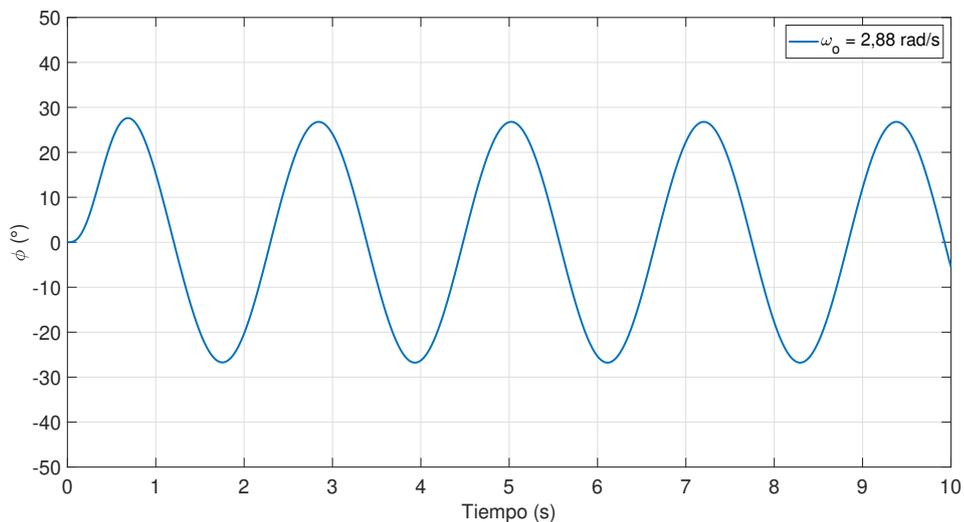


Figura 4.13: Respuesta del sistema en condiciones de oleaje por embarcaciones grandes.

En la figura 4.13 se muestra la respuesta del sistema respecto a la inclinación de la plataforma bajo las condiciones de oleaje por embarcaciones grandes. En este caso las oscilaciones alcanzan ángulos por debajo de los 30° . Por tanto, en estas condiciones se cumple con los requerimientos de seguridad para lanzamiento. Sin embargo, dado que el modelo se linealizó para ángulos pequeños, no se consideran confiables los resultados en ángulos mayores a 20° .

En el tercer caso se consideraron condiciones de oleaje corto por viento. Se tomó la velocidad de viento promedio de Golfito y se disminuyó el periodo de las olas, simulando un caso de oleaje más crítico para embarcaciones pequeñas.

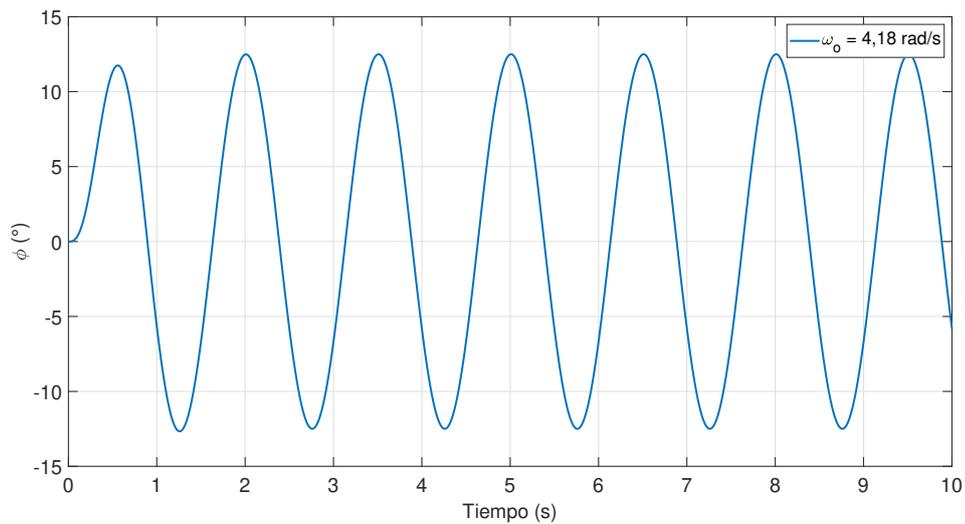


Figura 4.14: Respuesta del sistema en condiciones oleaje corto por viento.

En la figura 4.14 se muestra la respuesta del sistema respecto a la inclinación de la plataforma bajo las condiciones de oleaje corto. En este caso, el ángulo alcanza los 12° . Por tanto, en estas condiciones la plataforma cumple con los requerimientos de seguridad para el lanzamiento de cohetes.

En el cuarto caso se consideró un periodo de oleaje donde la frecuencia natural del sistema coincide con la frecuencia de las olas. Este caso es de particular interés ya que se presenta el fenómeno de resonancia, en el cual la amplitud de las opilaciones se maximiza.

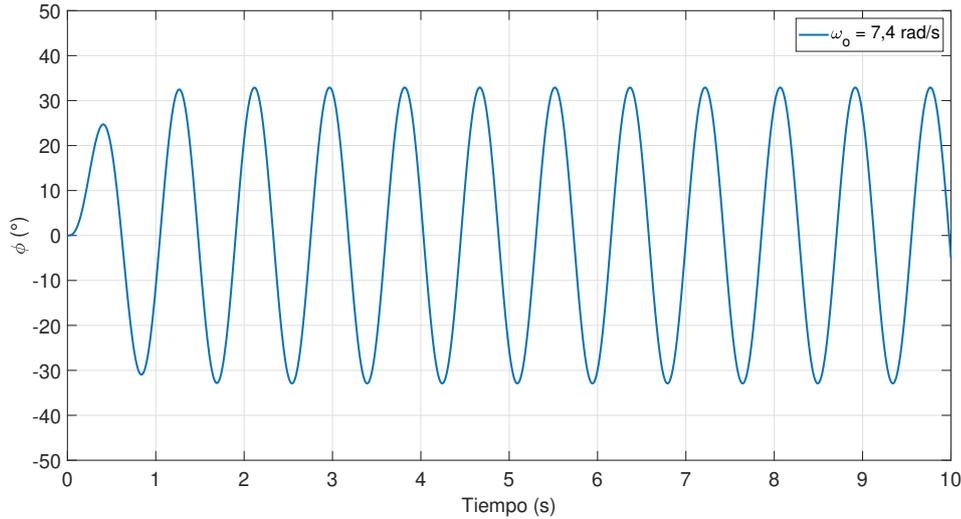


Figura 4.15: Respuesta del sistema cuando la frecuencia del oleaje coincide con la del sistema.

En la figura 4.15 se muestra la respuesta del sistema respecto a la inclinación de la plataforma. En este caso, la amplitud de las oscilaciones supera los 30° de inclinación, es decir, se estaría superando el límite de inclinación de la lanzadera especificado en el requerimiento de seguridad. Sin embargo, este caso ocurre cuando el periodo de las olas del mar es de 0,85 s. Estas condiciones no son usuales en la zona, el periodo de diseño corresponde a 4 s, como se mencionó anteriormente. Por tanto, se considera que es poco probable que se presente este comportamiento. Además, el modelo se linealizó para ángulos pequeños, por lo que no se puede predecir con certeza el comportamiento en este caso.

4.4. Análisis de esfuerzos

Se realizó un análisis de esfuerzos de los elementos más críticos para apoyar la propuesta de diseño y selección de materiales. Las ecuaciones empleadas en esta sección fueron tomadas de [34].

Se analizaron los elementos sujetos a dos tipos de carga. Por un lado la carga distribuida sobre la estructura base que es equivalente a la suma de: el peso del piso, el peso de la lanzadera y el peso estimado de dos personas. La carga distribuida sobre la estructura base se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$w = \frac{C}{L_T} \quad (4.2)$$

Donde:

- w es la carga distribuida (N/m)
- C es la carga correspondiente a la suma del peso de los elementos sobre la estructura base (N)
- L_T es el largo total correspondiente a la suma del largo de las vigas de la estructura base (m)

La magnitud de la fuerza puntal sobre la viga de interés esta dada por:

$$F_w = w \cdot L \quad (4.3)$$

Donde:

- F_w es la fuerza puntal debido a la carga distribuida (N)
- L es el largo de la viga (m)

Se consideró que la estructura base se soporta sobre un apoyo fijo, esta consideración abarca el caso más crítico ya que la plataforma estará apoyada sobre el agua, al no ser un apoyo fijo habrá un amortiguamiento de las fuerzas sobre la plataforma. Además, se analizó la carga distribuida sobre la viga más larga, ubicada en el centro de la estructura, dado que este es el elemento más crítico en la falla por flexión debido a su extensa longitud en comparación con las demás vigas.

El momento flector que ejerce la fuerza sobre la viga esta dado por:

$$M = \frac{F_w \cdot L}{4} \quad (4.4)$$

El esfuerzo permisible por flexión está definido por:

$$\sigma_{perm} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (4.5)$$

Donde:

- σ_{perm} es el esfuerzo permisible (Pa)
- c es la distancia desde la superficie externa del perfil al eje neutro (m)
- I es el momento de inercia de área del perfil respecto al eje de rotación (m⁴)

La sección transversal de la viga corresponde a un cuadrado hueco. El momento de inercia de área para un perfil de este tipo se calcula mediante la siguiente relación:

$$I = \frac{1}{12}a \cdot a^3 - \frac{1}{12}b \cdot b^3 \quad (4.6)$$

Donde:

- a es el ancho externo del perfil (m)
- b es el ancho interno del perfil (m)

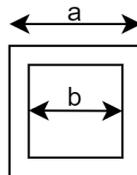


Figura 4.16: Sección transversal del perfil

La deflexión máxima de la viga debida a la fuerza aplicada esta dada por:

$$\delta = \frac{F_w \cdot (L/2)^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (4.7)$$

Donde:

- δ es la deflexión máxima de la viga (m)
- E es el módulo de elasticidad del material (Pa)

De acuerdo a [36], la resistencia a la fluencia de la aleación 6063 en perfiles con espesor menor a los 10 mm es $S_y = 215$ MPa y resistencia última en tensión es $S_{ut} = 241$ MPa. En el cuadro 4.6 se muestran los resultados calculados mediante las ecuaciones descritas anteriormente para el análisis por flexión.

Cuadro 4.6: Resumen del cálculo de esfuerzo por flexión en el perfil de la estructura base.

Variable	Valor
F_w (N)	509
L (m)	2,88
I (m ⁴)	$2,0 \times 10^7$
M (N · m)	366,4
c (m)	0,03
σ_{perm} (Pa)	$54,9 \times 10^6$
S_u (Pa)	241×10^6
E (Pa)	$71,7 \times 10^9$
δ (m)	0,06
η	4,0

Con base en la resistencia mínima del material y el criterio de esfuerzo cortante máximo se obtuvo un factor de seguridad de 4,0. Por tanto, la estructura base no fallará por flexión de acuerdo al criterio de falla de esfuerzo cortante máximo. Además, se estima una deflexión máxima de 6 cm.

Las uniones de las vigas en la estructura se analizaron bajo la consideración de que se comportan como voladizos soldados. La soldadura en estos elementos se consideró un punto crítico de análisis por carga estática. Por tanto, se calculó el esfuerzo cortante en la soldadura debido a la flexión originada por la carga distribuida y debido a la fuerza del remolque.

La fuerza del remolque está determinada por la resistencia del agua sobre el área sumergida de la superficie de los flotadores. Se consideró que los flotadores se sumergen una distancia de 0,35 m, que corresponde al radio del cilindro. Por tanto el área sumergida corresponde a:

$$A = \frac{\pi \cdot r^2}{2} \quad (4.8)$$

La fuerza de remolque esta dada por:

$$F_R = 2 \cdot \rho \cdot g \cdot r \cdot A \quad (4.9)$$

El esfuerzo en cortante por flexión en la soldadura se determina de la siguiente relación:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (4.10)$$

Donde:

- τ es el esfuerzo cortante (Pa)
- τ_1 es el esfuerzo cortante primario (Pa)
- τ_2 es el esfuerzo cortante secundario (Pa)

El esfuerzo cortante primario está dado por:

$$\tau_1 = \frac{F}{A_s} \quad (4.11)$$

Donde:

- F es la fuerza aplicada (N)
- A_s es el área de la garganta de la soldadura (m)

El área de la garganta de la soldadura se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$A_s = 1,414 \cdot h \cdot (b + d) \quad (4.12)$$

Donde:

- h es la garganta de soldadura (m)
- b es el ancho del área de la garganta de soldadura (m)
- d es el largo del área de la garganta de soldadura (m)

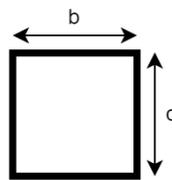


Figura 4.17: Geometría de la soldadura

El esfuerzo cortante secundario se define como:

$$\tau_2 = \frac{M_s \cdot r}{I_s} \quad (4.13)$$

Donde:

- M_s es el momento flector aplicado a la soldadura (N · m)
- r es la distancia al eje neutro del área de la garganta de la soldadura (m)
- I_s es el segundo momento de área de la soldadura (m⁴)

El segundo momento de área de la soldadura depende de la geometría del área de la garganta, para el caso de la soldadura como se muestra en la figura 4.17 se determina como:

$$I_s = 0,707 \cdot h \cdot I_u \quad (4.14)$$

Donde:

$$I_u = \frac{d^2 \cdot (3b + d)}{6} \quad (4.15)$$

La resistencia del metal de aporte se obtuvo de la norma AWS A5.10. De acuerdo con la normativa para realizar la unión de la aleación de aluminio 6063 se debe utilizar electrodo ER4043. Este presenta una resistencia a la tensión de 199 MPa [37].

En el cuadro 4.7 se muestra un resumen del cálculo de esfuerzos cortantes en la soldadura para el caso de la flexión por carga distribuida y la fuerza del remolque. En las figuras 4.18 y 4.19 se muestra un diagrama de fuerzas para cada caso.

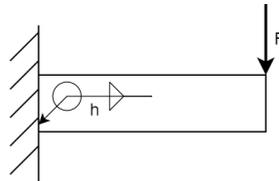


Figura 4.18: Diagrama para el caso de cortante por flexión por carga distribuida

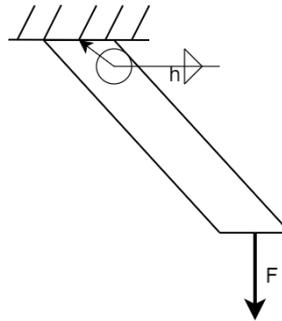


Figura 4.19: Diagrama para el caso de cortante por fuerza de remolque

Cuadro 4.7: Resumen del cálculo de esfuerzos cortantes en el metal de aporte.

Variable	Cortante por la carga distribuida	Cortante por fuerza de remolque
F (N)	509	1353
h (m)	0,002	0,003
τ_1 (Pa)	$7,50 \times 10^5$	$1,33 \times 10^6$
τ_2 (Pa)	$54,0 \times 10^6$	$83,1 \times 10^6$
τ (Pa)	$54,0 \times 10^6$	$83,1 \times 10^6$
S_y (Pa)	199×10^6	199×10^6
η	2,1	1,4

Con base en la resistencia mínima del metal de aporte y aplicando el criterio de energía de distorsión, se obtuvo un factor de seguridad de 2,1 y 1,4 para la carga distribuida y la fuerza de remolque respectivamente. Por tanto, se puede prever que la soldadura no

presentará fallo por carga estática para las condiciones de carga y la selección de materiales establecidos.

Capítulo 5

Diseño Biomimético

Paralelo al desarrollo de este trabajo final de graduación, en la Sede del Sur de la Universidad de Costa Rica se realizó un proyecto de investigación denominado: C1461 Laboratorio móvil de acción y pensamiento en artes biomiméticas. Uno de los prototipos desarrollados en este proyecto está vinculado con la plataforma acuática que se diseñó en este trabajo final de graduación. Esta relación surge debido a la colaboración del GIA en el proyecto de investigación, así como la participación como asistente de una de las ponentes de este trabajo final. La propuesta del proyecto consiste en implementar la herramienta de diseño biomimético para proponer recomendaciones sobre el diseño de la plataforma.

Este capítulo tiene como objetivo dar a conocer los avances alcanzados en el proyecto y proporcionar un aporte al diseño original de este trabajo desde una metodología de diseño innovadora, sostenible e interdisciplinar. Se considera que los resultados de este proceso son de gran interés para los lectores ya que se plantean soluciones para algunos desafíos importantes a resolver en este trabajo que son muy familiares desde el punto de vista de diseño en ingeniería mecánica. Estas soluciones alternativas se plantearon a partir de la identificación de estrategias biológicas de varias especies y se presentan como recomendaciones que pueden sembrar interés para ampliar el alcance en futuras investigaciones.

En este apartado se presenta una base teórica para comprender la motivación de utilizar esta herramienta como complemento al desarrollo de este diseño. Además, se describe la metodología que se siguió mediante la ejemplificación de los resultados de cada fase. Al final del capítulo se muestra una matriz que permite visualizar los resultados más importantes del proceso.

5.1. ¿Qué es biomímesis?

La biomímesis es una herramienta de diseño que busca aprender y emular estrategias (adaptaciones biológicas) que se encuentran en la naturaleza para generar ideas y definir soluciones a desafíos de diseño de crucial interés para nuestras sociedades humanas. Busca la interdisciplinariedad al integrar conocimientos provenientes del estudio de la naturaleza, la tecnología, la innovación, la ingeniería y el diseño con el objetivo de crear soluciones ambientalmente responsivas y compatibles con la vida. Los elementos esenciales que representan fundamentalmente a la biomímesis son: **ethos**, engloba la ética, intención y filosofía de la motivación de practicar la biomímesis y representa el respeto, responsabilidad y gratitud por el entorno que nos rodea (relación moralista y naturalista), considerando así a la naturaleza como una fuente de conocimientos y no solamente un insumo a nuestra disposición (relación utilitaria); **(re)conectar**, trata de reforzar la comprensión de que

los humanos estamos interconectados con la naturaleza; **emular**, aporta los principios, patrones, estrategias y funciones encontradas en la naturaleza para informar un diseño. [38]

5.2. Metodología

El pensamiento biomimético propone las siguientes áreas en las cuales se agrega mayor valor al proceso de diseño, estas etapas se muestran en la figura 5.1.

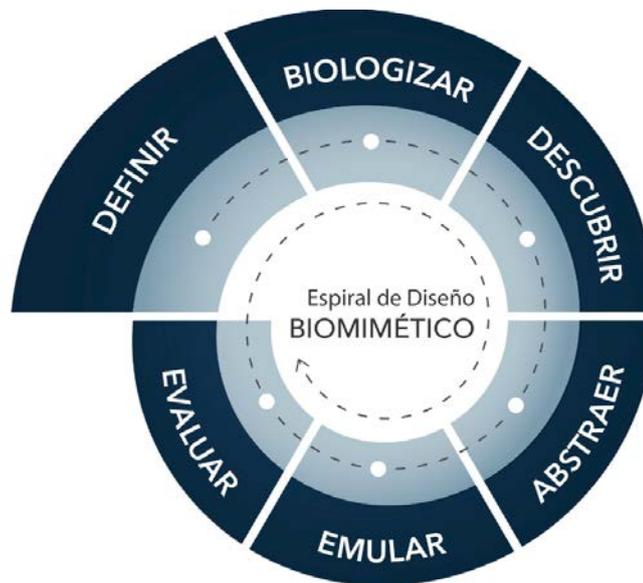


Figura 5.1: Metodología de diseño biomimético [38]

Las actividades relacionadas a cada etapa descritas en [38], son las siguientes:

- **DEFINIR** Determinar el impacto que se espera el diseño tenga en el mundo y los criterios y limitaciones que definen el éxito, en esta fase también se reconoce el entorno biológico y las especies que lo circunscriben. Dicho contexto será el que “habe el diseño”, por lo que la comprensión detallada del mismo, genera un diseño responsivo y no invasivo (en total desconexión de las condiciones bióticas y abióticas de su alrededor).
- **BIOLOGIZAR** Analizar las funciones y el contexto que debe incluir la solución de diseño. Definirlos en términos biológicos, para “preguntar a la naturaleza” en busca de soluciones.
- **DESCUBRIR** Buscar modelos naturales (adaptaciones biológicas de organismos y ecosistemas) que aborden funciones similares. Identificar las estrategias biológicas que sustentan su supervivencia y éxito.
- **ABSTRAER** Estudiar cuidadosamente las características o mecanismos esenciales que hacen que las estrategias biológicas sean exitosas. Utilizar lenguaje sencillo para escribir su comprensión de cómo funcionan las características, usando bocetos para garantizar una comprensión precisa.
- **EMULAR** Desarrollar conceptos de diseño basados en estas estrategias.

- **EVALUAR** Evaluar la propuesta de diseño para ver qué tan bien cumplen con los criterios y las limitaciones del desafío de diseño y qué tan bien encajan en los sistemas de la Tierra. Iterativamente y a lo largo del proceso, evaluar el diseño comparando con los principios de vida de la naturaleza para garantizar que se toma en cuenta el elemento **ethos** de la biomímesis.

La naturaleza actúa siguiendo algunos principios que parecen ser constantes y repetitivos en todo sistema u organismo natural. En esta metodología, estos principios se denominan “principios de vida”, y constituyen una parte del **ethos** que se definió anteriormente y que debe formar parte de la evaluación del diseño que se propone. De acuerdo con [39] los principios de vida son los siguientes:

- Utiliza solo la energía y recurso necesario para su función, y únicamente la energía disponible.
- Implementa diseño multifuncionales.
- Adapta la forma a la función.
- Combina elementos modulares y anidados.
- Recicla todos los materiales.
- Resiliente ante perturbaciones, involucra diversidad, descentralización y auto renovación.
- Optimiza en lugar de maximizar
- Autoorganización.
- Las interacciones con el entorno producen beneficios mutuos.
- La sintonía con el entorno se basa en la comunicación constante y receptiva.
- Utiliza materiales y procesos químicos que son compatibles con la vida.
- Construye usando recursos abundantes en el entorno, incorporando recursos raros solo con moderación.
- Responde al entorno local.
- Usa la forma para determinar funcionalidad, en lugar de agregar material o energía, para cumplir requisitos.

Existen dos enfoques para comenzar el proceso de biomímesis: *del reto a la biología*, en el cual se parte de un problema específico y se buscan soluciones biológicas, *de la biología al diseño*; se inicia con la inspiración biológica y es ideal para descubrir estrategias y conducir innovaciones. En este caso se emplea el camino del reto a la biología. Además, dado que se tiene una propuesta de diseño desde el enfoque tradicional de la ingeniería mecánica, la etapa de contexto y definición del problema se definió en capítulos anteriores.

5.2.1. Fase 1: Definición y contexto

Se plantea el reto de diseñar una plataforma que pueda ser utilizada en el mar de Golfito para el lanzamiento de cohetes de alta potencia. La plataforma debe cumplir criterios de estabilidad para embarcaciones así como oscilaciones que no superen los 30° de inclinación de acuerdo con los requerimientos de seguridad de las normas para lanzamiento de cohetes. El reto de diseño en cuanto flotabilidad, estabilidad y resistencia de materiales se toman como punto de partida del problema.

5.2.2. Fase 2: Transposición de la naturaleza

Durante esta etapa se fusiona la función biológica en una pregunta hacia la naturaleza para posteriormente investigar cómo resuelve este objetivo. Las preguntas surgieron a partir de las necesidades o problemas de diseño relacionadas con el funcionamiento adecuado del dispositivo. La primera interrogante que surgió fue el tema de la resistencia a la corrosión. Dado que la plataforma es diseñada para el entorno marino, los materiales deben enfrentar el crecimiento de organismos en la superficie y resistir el desgaste por corrosión, el cual es un tema crítico en el entorno marino. Así mismo, la integridad estructural se tomó en consideración dentro de las preguntas de investigación. Por otro lado, si bien con el principio de Arquímedes se puede resolver con relativa facilidad las características que debe tener un cuerpo para flotar en un fluido, resulta pertinente cuestionar los mecanismos empleados por la naturaleza para cumplir con este principio si se toma en cuenta que la optimización de recursos es un factor de interés. Por esta razón, el tema de la flotabilidad forma parte de los cuestionamientos. Finalmente, la respuesta de la plataforma ante la acción de fuerzas externas. Dado la función principal por la cual fue diseñada la plataforma, el tema de estabilidad resulta un factor crítico para su correcto funcionamiento. En la figura 5.2 se muestran las preguntadas que fueron planteadas y que dan paso a la investigación biológica posterior, en la cual se buscó un mentor (organismo, fenómeno o proceso biológico que resuelve dicha función o estrategia en el mundo natural) que responda por medio de un mecanismo evolutivo natural.

Materiales	Flotabilidad	Estabilidad
¿Cómo la naturaleza protege superficies?	¿Cómo la naturaleza modifica la boyacidad ?	¿Cómo la naturaleza responde a los cambios del entorno?
¿Cómo la naturaleza previene la acumulación de organismos?	¿Cómo la naturaleza retiene el aire ?	¿Cómo la naturaleza estabiliza oscilaciones ?
¿Cómo la naturaleza impermeabiliza ?	¿Cómo la naturaleza cambia de densidad ?	¿Cómo la naturaleza responde a fuerzas externas?
¿Cómo la naturaleza previene deformación (Buckling)?		

Figura 5.2: Preguntas planteadas sobre las funciones de interés [Elaboración propia]

Mediante la consulta de literatura primaria y la herramienta de búsqueda Ask Nature (asknature.org), se encontraron mentores que poseen características biológicas que les permite resolver situaciones similares a las funciones de interés descritas en la figura 5.2. Además, se sintetizó la información relacionada a la adaptación biológica de cada mentor. Durante esta fase se consideraron un total de nueve mentores que posteriormente pasaron por un filtro de selección. Esta etapa se detalla en los cuadros 5.1, 5.2 y 5.3.

Cuadro 5.1: Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores

Mentor	Adaptación biológica
 <p data-bbox="316 692 620 757">Plantas de carnívoras del género <i>Nepenthes</i> [40]</p>	<p data-bbox="675 344 1086 374">Función: Protección de superficies.</p> <p data-bbox="675 387 1390 786">Los bordes de la planta son extremadamente resbaladizos debido a varios factores: Por un lado, el borde está conformado por crestas microscópicas que se dirigen al interior de la jarra. Las crestas están hechas de células están sobrepuestas como las tejas en un techo. Esto le proporciona dirección a la textura de la superficie, de modo que es más fácil resbalarse hacia el interior que hacia el exterior de la planta. Además, en presencia de agua se forma una película delgada en la superficie que reduce la fricción entre la planta y el insecto. A diferencia de ser repelente del agua, los bordes parecen humedecerse fácilmente, lo que lo convierte en una superficie resbaladiza altamente efectiva. [41]</p>
 <p data-bbox="395 1263 539 1292">Corales [42]</p>	<p data-bbox="675 810 1086 840">Función: Protección de superficies.</p> <p data-bbox="675 853 1390 1391">Tienen propiedades de anti ensuciamiento que evitan el crecimiento y proliferación de organismos en la superficie. Esto se debe a los siguientes factores. Antiaherencia: Propiedades inherentes los compuestos químicos del coral, incluyendo: toxinas, inhibición del crecimiento, interferencia de vías neurales, antiadhesivos y repelentes. Efecto de liberación de suciedad: La piel del coral posee baja energía de superficie, es decir, baja atracción molecular y por tanto es difícil adherirse. Efecto desprendimiento: El coral tiene mecanismos de auto renovación mediante recubrimientos degradables. Tentáculos suaves: El balanceo de los tentáculos del coral con el agua forma una superficie inestable alrededor. Efecto fluorescente: La fluorescencia es capaz de resistir la unión de diatomeas. Los corales fluorescentes son capaces de emitir luz débil que inhibe la el asentamiento de las mismas. [43]</p>
 <p data-bbox="304 1783 632 1848">Plantas del género <i>Salvinia</i> [44]</p>	<p data-bbox="675 1460 1257 1489">Función: Protección de superficies y flotabilidad.</p> <p data-bbox="675 1503 1390 1803">La superficie de las hojas está cubierta de pequeños cabellos, y cada uno está cubierto de cristales de cera hidrofóbicos (repelentes al agua) desde la base hasta casi la punta. La punta de cada cabello carece de cera hidrofóbica y en cambio es hidrofílica, lo que significa que atrae moléculas de agua. Estas puntas hidrofílicas las que ayudan a retener bolsas de aire cuando la planta está sumergida. Permiten atrapar una fina capa de aire entre la superficie de la hoja y el agua que atraen. [45]</p>

Cuadro 5.2: Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores. (Continuación del cuadro 5.1)

Mentor	Adaptación biológica
 <p data-bbox="347 757 571 790">Pasto flotante [46]</p>	<p data-bbox="667 499 1334 533">Función: Modularidad ante cambios del nivel del agua.</p> <p data-bbox="667 539 1390 640">Una forma de hacer frente a las fluctuaciones del nivel freático es simplemente seguir la superficie del agua mediante la modularidad. [47]</p>
 <p data-bbox="387 1205 531 1238">Bambú [48]</p>	<p data-bbox="667 842 1390 909">Función: Resistencia al pandeo. Flexibilidad. Optimización de materiales.</p> <p data-bbox="667 916 1390 1189">El bambú resiste la fuerzas externas con gran capacidad a pesar de estar conformado por secciones huecas que suelen ser menos resistentes a cargas transversales. Los tubos de sección transversal circular, se vuelven un poco ovalados justo antes de pandearse, y eso reduce la fuerza crítica necesaria para provocar una ruptura en la estructura. Prevenir esa ovalización en los tallos del bambu puede ser uno de los roles de los mamparos transversales periódicos tan notables. [49]</p>
 <p data-bbox="304 1675 619 1738">Mangle Rojo (<i>Rhizophora mangle</i>) [50]</p>	<p data-bbox="667 1350 922 1384">Función: Estabilidad</p> <p data-bbox="667 1391 1390 1626">Los árboles de mangle rojo se basan en rhizophora, zancos especializados hechos del mismo material que el tallo principal que absorben y transportan agua y oxígeno y también brindan apoyo al árbol en una superficie inestable. Hacen que el área de apoyo del organismo sea mucho más grande, manteniendo baja la cantidad total de tejido necesaria para la estabilidad. [51]</p>

Cuadro 5.3: Síntesis de las adaptaciones biológicas de los mentores. (Continuación del cuadro 5.2)

Mentor	Adaptación biológica
 <p data-bbox="343 719 576 748">Algas coralinas [52]</p>	<p data-bbox="667 461 1388 524">Función: Respuesta a cambios del entorno, a fuerzas externas.</p> <p data-bbox="667 539 1388 636">Las articulaciones geniculares proporcionan flexibilidad lo que le permite responder a las fuerzas de las corrientes marinas sin sufrir daños en su estructura. [53]</p>
 <p data-bbox="295 1167 624 1234">Diversos géneros de palmas de mar [54]</p>	<p data-bbox="667 770 1388 833">Función: Respuesta a cambios del entorno, a fuerzas externas.</p> <p data-bbox="667 848 1388 1218">Las palmeras marinas sobreviven a las cambiantes condiciones intermareales adoptando varias posturas, gracias a un conjunto único de propiedades mecánicas. A diferencia de cualquier árbol, responde a la fuerza lateral doblándose hasta casi postrarse y luego volviéndose a poner en pie. “La flexibilidad que permite que esta palma resista las olas es proporcionada por el bajo módulo elástico (5-10 MPa) de tejido estípite; a pesar de la debilidad (esfuerzo de rotura bajo, 1 MPa) de este tejido, se requiere una gran cantidad de energía (100 kJ/m³) para romper un estípite porque pueden extenderse un 20-25 % antes de romperse.” [55]</p>
 <p data-bbox="320 1659 598 1722">Lirio acuático <i>Victoria amazónica</i> [56]</p>	<p data-bbox="667 1245 1091 1274">Función: Resistencia y flotabilidad.</p> <p data-bbox="667 1290 1388 1780">Debajo de cada hoja hay una estructura de soporte acanalada que ayuda a la hoja a soportar pequeñas cargas y mantener la rigidez, que le permite maximizar la exposición de la superficie para la fotosíntesis. La estructura consta de un nervio principal que corre a lo largo del centro de la hoja, con nervios adicionales que irradian desde el centro y se bifurcan a lo largo de la hoja. Estos nervios son estructuras planas en forma de pared, y su grosor disminuye hacia el borde de la hoja. Todas las nervaduras están llenas de aire, lo que ayuda a reducir el peso total de la estructura y también ayuda a mantener la hoja a flote. Los nervios están conectados entre sí por un patrón de membranas radiales que forman círculos concéntricos sueltos que emanan del centro de la hoja. Esta membrana brinda soporte estructural adicional sin agregar peso excesivo. [57]</p>

Dado que el alcance de esta investigación es proponer soluciones alternativas al diseño original de la plataforma, se decidió reducir las preguntas planteadas en la fase dos y seleccionar algunos de los mentores descritos anteriormente. A partir de esta selección se redujo la cantidad de mentores escogidos. La planta *Victoria amazónica* resultó ser un mentor muy completo en relación con las preguntas de investigación sobre flotabilidad y resistencia por lo que se escoge como mentor principal en estas cuestiones.

Por otro lado, la planta *Victoria amazónica* resultó ser un mentor muy completo en relación con las preguntas de investigación sobre flotabilidad y resistencia por lo que se escoge como fuente de conocimiento biológico principal en estas cuestiones.

5.2.3. Fase 3: Abstracción de los principios de diseño

En esta fase se realiza la abstracción de la estrategia natural que consiste en comprender el funcionamiento de los modelos naturales seleccionados y separarlos de la entidad natural. Para ello se utilizaron metodologías de analogías funcionales y síntesis para realizar una transición directa de la naturaleza a la tecnología siendo, la combinación de varias estrategias naturales vital para resolver el problema inicial a través de un modelo funcional.

Mentor: Victoria Longwood Hybrid

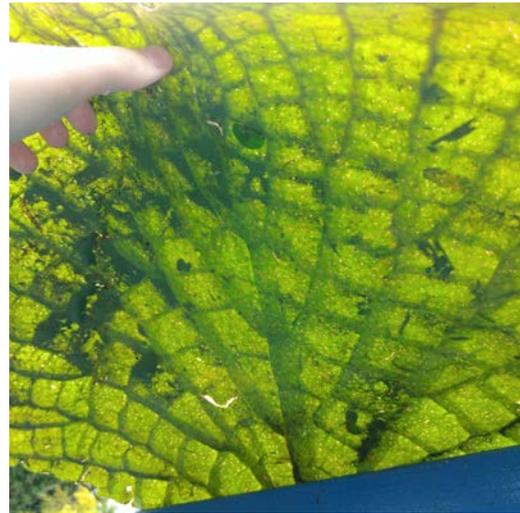
Para abstraer los principios de diseño es fundamental tener contacto con el mentor y su entorno. La planta *Victoria amazónica* es de origen Suramericano, sin embargo, se encontró en país el centro turístico “Los Chocuacos” ubicado en las Vueltas de Potrero Grande del cantón de Buenos Aires, en el cual poseen un híbrido entre *Victoria cruziana* y *Victoria amazónica* denominada Victoria Longwood Hybrid. En este lugar se recolectaron algunas hojas de la planta de diferentes tamaños para su observación.



Figura 5.3: Victoria Longwood Hybrid en centro turístico “Los Chocuacos”



(a) Hoja de tamaño pequeño.



(b) Tejido verde en hoja de tamaño grande.



(c) Ramificación de la venación.



(d) Porosidad de la venación.

Figura 5.4: Fotografías de algunas hojas recolectadas. [Elaboración propia]

Además, mediante la colaboración del Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA) se realizó una observación microscópica del tallo o venación principal que se observa en la figura 5.4(d). Para ello se realizaron cortes transversales de espesor milimétrico de la venación y se colocaron las muestras en un microscopio trinocular (Eclipse LV200ND, Nikon). Mediante una cámara acoplada al dispositivo se tomaron las fotografías que se muestran en la figura 5.5.

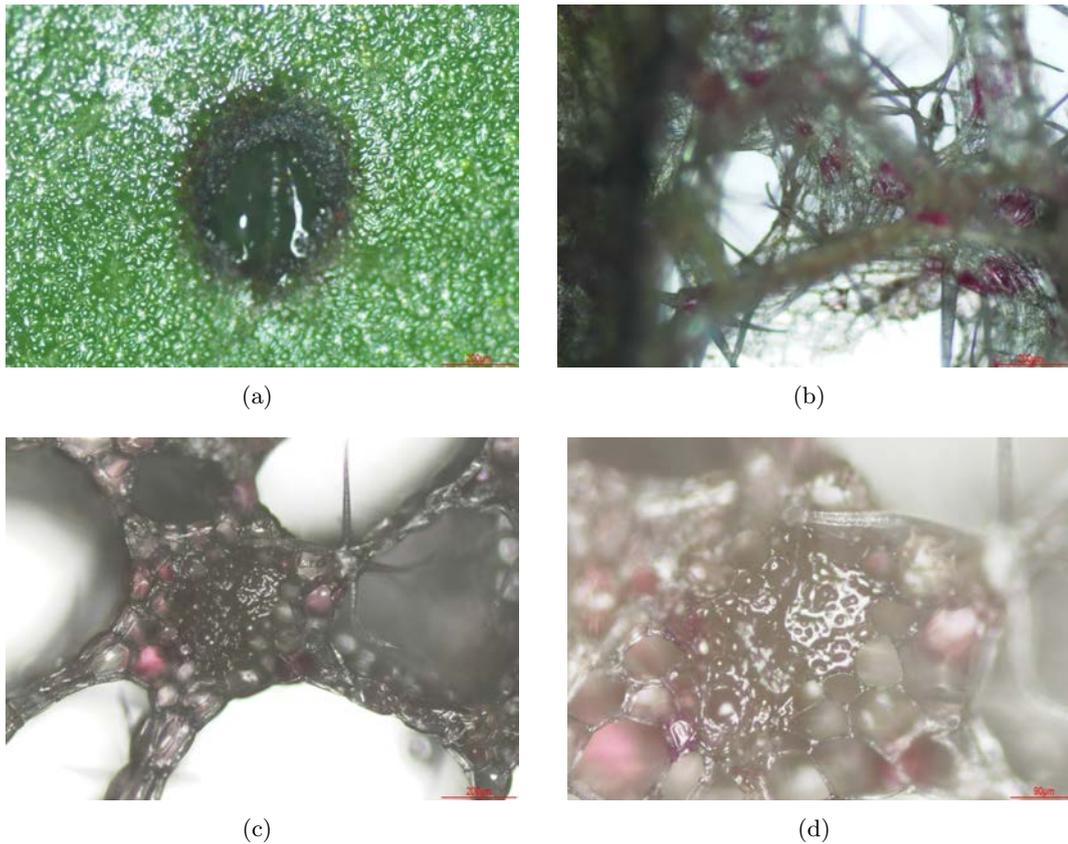


Figura 5.5: Micrografías del tejido vegetal de la planta. (a) estomatodos (poros) en la hoja, (b),(c) y (d) geometrías y jerarquización del tejido parenquimático. [58]

Las fotografías 5.4a,b,c y d y las micrografías 5.5b, 5.5c, 5.5d muestran algunos aspectos interesantes de esta planta: la parte inferior de la hoja tiene un espectacular sistema de vigas cubiertas de espinas que irradia desde el peciolo. Estas vigas son presagiadas por más pequeñas. Los sistemas de vigas más pequeñas y delgadas cruzan las grandes en ángulo recto, dividiendo la hoja en aproximadamente segmentos iguales. Las vigas no son rígidas, sino lo suficientemente flexibles para dar soporte elástico. Internamente, las vigas y la lámina principal flotante, están divididos por paredes parenquimatosas, llenas de cámaras irregulares con geometrías esféricas y hexagonales, y numerosos túbulos pequeños atraviesan estas paredes. Estas esferas y/o hexágonos parecen ser espacios vacíos o burbujas de aire, es decir, se observó una porosidad en fractal. A partir de esta observación, se infiere que dada esta porosidad en escalas tan pequeñas, la planta aprovecha su espacio interno maximizando su capacidad de flotabilidad en el agua. La lámina foliar principal es sorprendentemente delgada para una hoja tan grande. La capa de parénquima tipo empalizada ocupa aproximadamente la mitad del espesor laminar. En la micrografía 5.5(a), se observan los estomatodos, poros que miden unos 0,5 mm de diámetro y están separados de 3 a 6 mm. No ocurren sobre venas secundarias o principales, funcionan como drenajes para el agua de lluvia para prevenir el hundimiento de la hoja. Además, se discutió la posibilidad de que estas estructuras podrían permitir la entrada de un poco de luz a la parte inferior de la hoja, lo cual podría favorecer la vida de algunos organismos que habitan debajo de la hoja y que podrían colaborar en su regeneración, higiene y cuidado ante depredadores. [59][57]

De acuerdo a las observaciones y el estudio de las funciones biológicas del mentor, se reconocieron los siguientes principios de diseño:

1. Geometría circular con ramificación y repetibilidad de la estructura soporte.
2. Decrecimiento de la ramificación en función del radio.
3. Doble estructura: capa flexible + estructura base.
4. Porosidad macroscópica y microscópica en la estructura base.
5. Fibras flexibles, concéntricas, con sección transversal que aumenta el momento de inercia y reduce la flexión.

El principio de doble estructura (capa flexible + estructura base) no se abordó en esta investigación, ya que se consideró que está incorporado en el diseño original, en el sentido que la plataforma posee un piso que distribuye uniformemente el peso sobre la estructura base. Mientras que la cualidad de flexibilidad que tiene la hoja no se tomó como una ventaja para este diseño. Análogamente, las fibras concéntricas no se toman en cuenta en el diseño. Sin embargo, se considera relevante el principio de diseño que tienen estas fibras respecto a que su sección transversal aumenta el momento de inercia de la viga, por tanto, reduce la flexión. Esta característica se utiliza en el ámbito de ingeniería y es usual que las vigas o estructuras que soportan cargas se fabrican y se coloquen de modo que su momento de inercia sea favorable para reducir la flexión. La geometría circular se replicó mediante datos encontrados en [57] respecto a dimensiones, ángulos y otros parámetros de la hoja. A partir de estas relaciones geométricas se creó un modelo paramétrico en Rhyno y se obtuvo la geometría que se muestra en la figura 5.6.

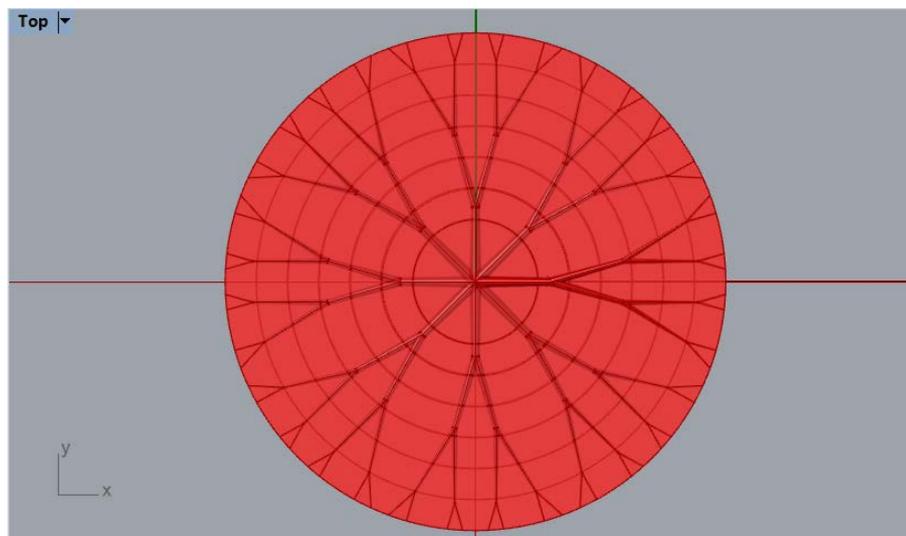


Figura 5.6: Modelo de la geometría principal de la hoja. [60]

Para emular la geometría de la hoja se tomaron algunas simplificaciones, entre ellas que la hoja es un círculo perfecto, que las ramificaciones brotan exactamente desde el centro del círculo y que la hoja inicia con ocho venas principales que se van ramificando a lo largo del radio del círculo. A partir este modelo se pueden generar diseños de distintos tamaños manteniendo las relaciones geométricas características encontradas en la hoja. El decrecimiento de la ramificación en función del radio fue evaluado desde el punto de vista de resistencia mecánica. Surgió la incógnita respecto a si esta característica le aporta un beneficio a la planta en cuanto a resistencia mecánica o si se debe al proceso de fabricación del material de la planta conforme la hoja crece. Para evaluar esta cualidad se diseñaron dos modelos tipo "probetas", que consisten en una sección similar a una parte de la hoja,

en el que se tiene un soporte de viga que en un caso es de sección transversal constante y en el otro la sección transversal decrece respecto al radio. El peso y las propiedades mecánicas del material son las mismas en ambas probetas, de modo que la única variación entre los diseños fue esta característica en la ramificación. Los modelos se muestran en las figuras 5.7 y 5.8.

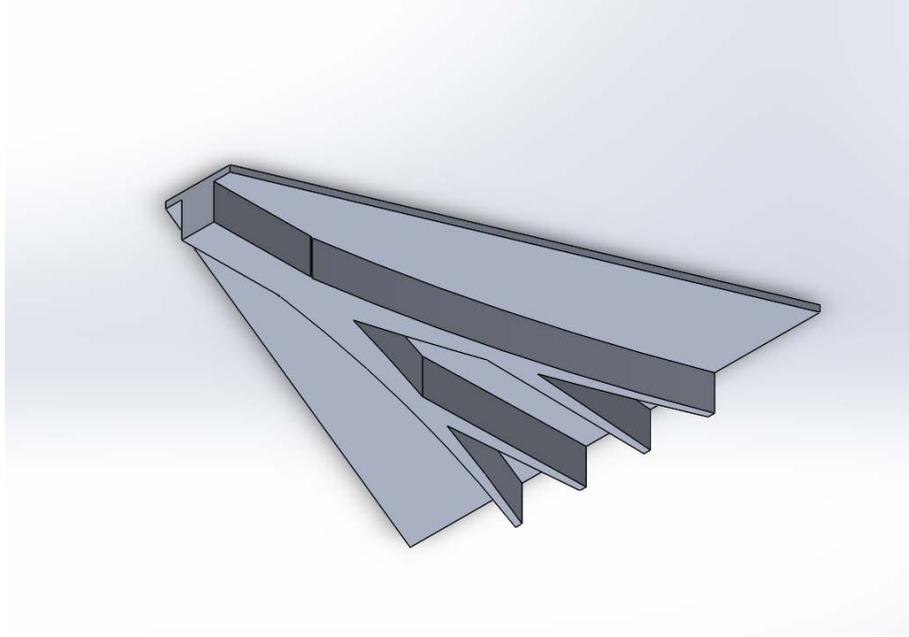


Figura 5.7: Probeta con sección transversal constante. [Elaboración propia]

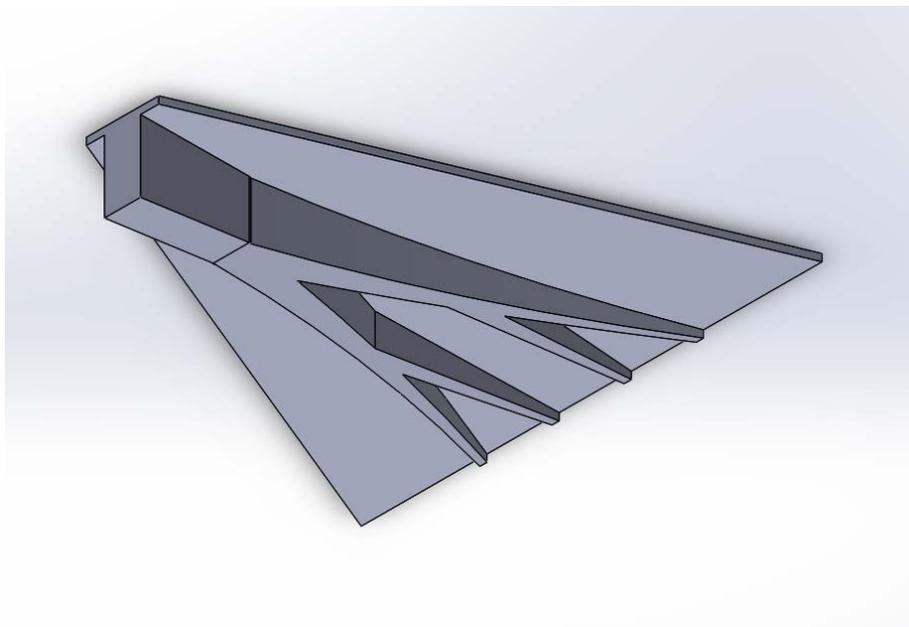


Figura 5.8: Probeta con sección transversal variable. [Elaboración propia]

Se realizó un análisis de deflexión en SolidWorks, en el cual se colocó una fuerza en el extremo de los modelos con el objetivo de conocer la deflexión de las probetas. Los resultados de este análisis se muestran las figuras 5.9 y 5.10.

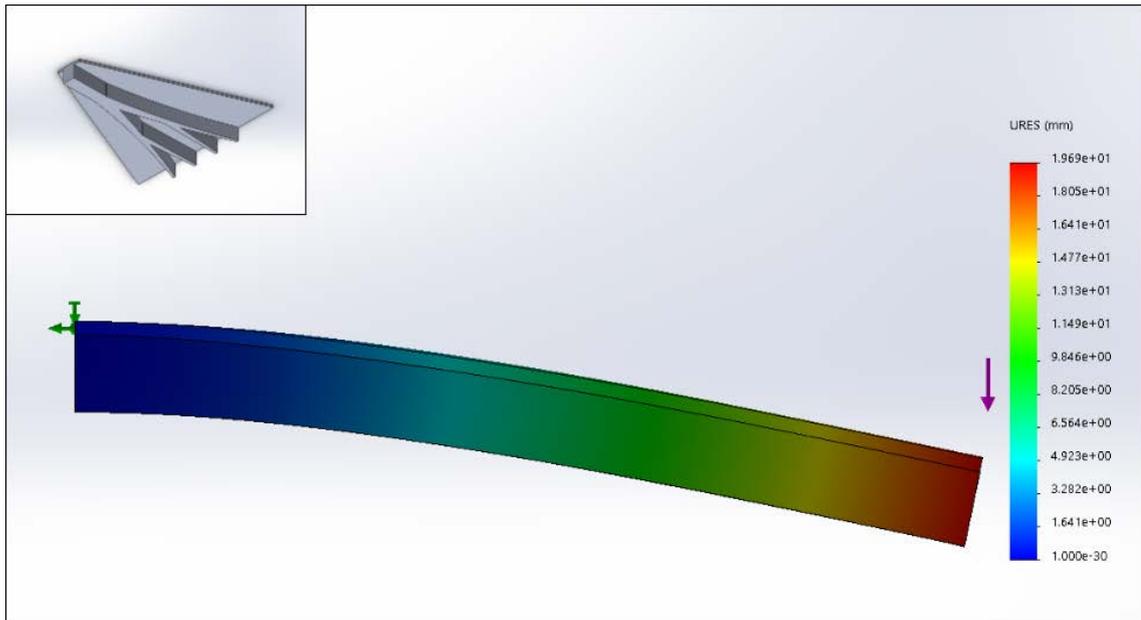


Figura 5.9: Deflexión en la probeta con sección transversal constante. [Elaboración propia]

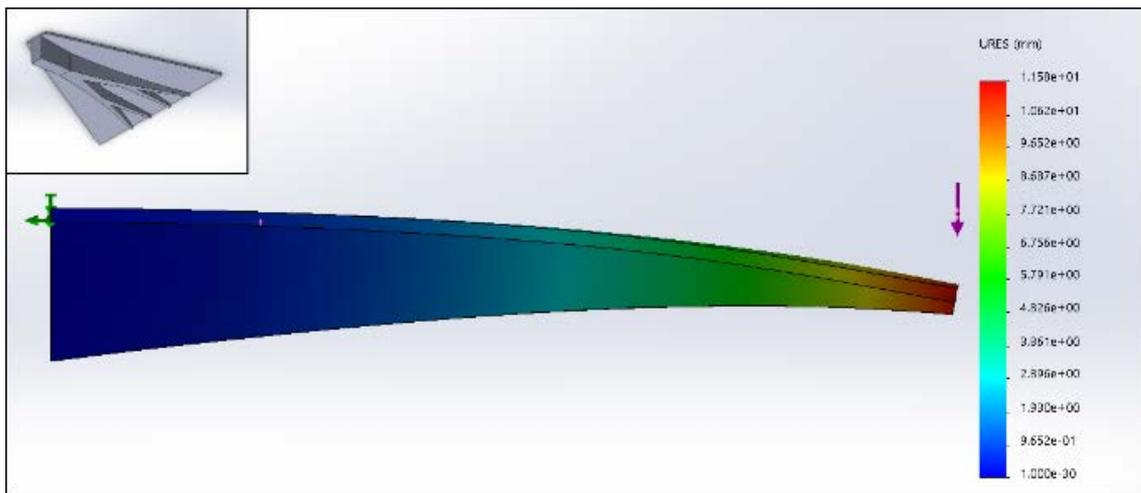


Figura 5.10: Deflexión en la probeta con sección transversal variable. [Elaboración propia]

Los resultados muestran que para el caso de la viga con ramificación constante, la deflexión máxima es de 19,6 mm. Mientras que para la viga con ramificación decreciente la deflexión máxima es de 11,5 mm. Además, la deflexión en la ramificación decreciente se localiza en el extremo de la probeta, mientras que en la ramificación constante la deflexión ocurre desde el centro de la probeta. A partir de estos resultados se infirió que la planta si tiene un beneficio en cuanto a resistencia mecánica al fabricar la venación con esta forma, dado que reduce la deflexión y la ubica en el extremo de la hoja. Esta cualidad es una ventaja para prevenir la inundación de agua sobre la hoja, al mantener la mayor cantidad de agua ubicada en el extremo de la hoja se facilita su drenaje. Además, dado que la deflexión es menor, el volumen de agua que puede estar sobre la hoja también es menor, por tanto, ejerce menos peso sobre la hoja.

5.2.4. Fase 4: Emulación y evaluación

En la siguiente matriz se resumen los aportes de esta investigación en el desarrollo de un modelo preliminar de plataforma, basado en algunos principios de diseño aprendidos a partir del mentor.

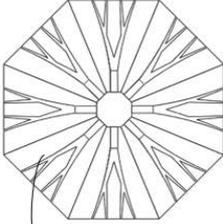
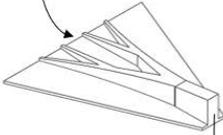
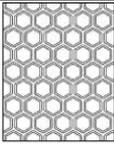
Función	Principio de diseño abstraído	Sketch/Diagrama inicial	¿Qué partes potencia? ¿Cómo?	Ventajas y desventajas	Consideraciones para su ensamblaje futuro	Principios de vida incorporados
Soportar pequeñas cargas y mantener la rigidez para maximizar el aprovechamiento de la luz solar.	Geometría circular con ramificación y repetibilidad de la estructura soporte.		Flotadores y estructura base: Mayor área de cubierta, así como un mayor desplazamiento de agua con un calado menor.	Ventajas: Menor peso Mayor área de cubierta. Desventajas: Se debe hacer análisis de estabilidad para verificar su comportamiento hidrodinámico.	La geometría simétrica hexagonal podría facilitar un ensamble y desensamble modular para favorecer el transporte.	Ser eficiente con el uso de recursos (material y energéticamente) Subprincipio: Usar diseño multifuncional. La estructura base proporciona flotabilidad.
Generar una estructura que soporte cargas mientras maximiza el uso del recurso vegetal. Es decir, genera el grosor necesario, no más que eso.	Decrecimiento de la ramificación en función del radio.		Estructura base: Menor deflexión por carga transversal con menos cantidad de material.	Ventajas: Menor peso y menor deflexión. Desventajas: Manufactura complicada	Mantener una sección transversal que favorezca el momento inercia para reducir la flexión a lo largo de toda la viga.	
Reducir el peso total y mantener la hoja a flote.	Porosidad macroscópica y microscópica en la estructura base.		Flotadores: Menor peso.	Ventajas: Maximizar flotabilidad y reducir peso Desventaja: Manufactura complicada.	Considerar la implementación de espumas metálicas. Tomar en cuenta recubrimiento, impermeabilización, protección y mantenimiento de la superficie.	

Figura 5.11: Matriz de resultados. [Elaboración propia]

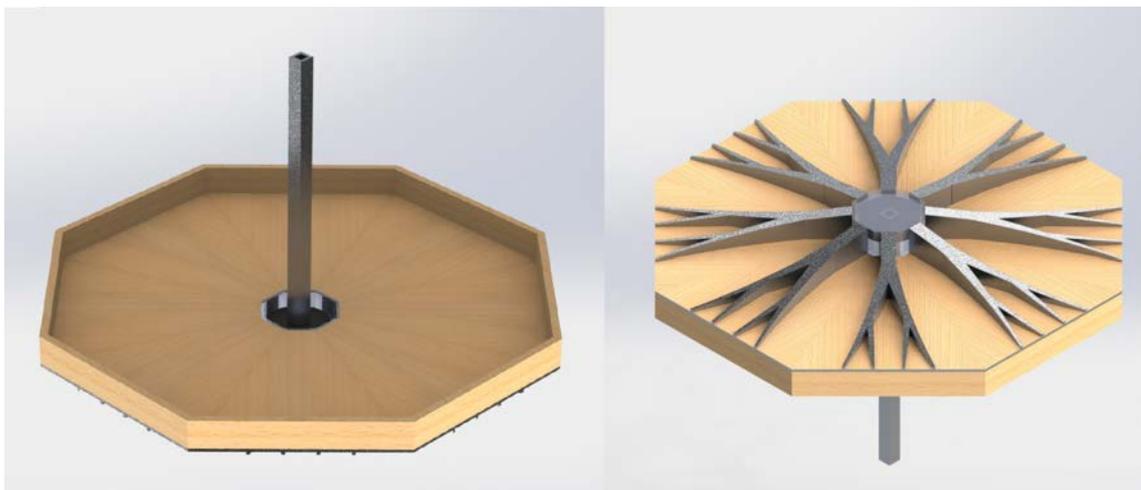


Figura 5.12: Diseño preliminar de plataforma bio-inspirada. [Elaboración propia]

Capítulo 6

Diseño Final

En general y por lo expuesto en la sección de selección de materiales del capítulo Diseño Preliminar, se selecciona el uso de aluminio grado marino 5083 para las partes que tienen mayor exposición al mar, como los flotadores, también aluminio grado marino 6083 y las aleaciones de aluminio 1060 y 110 para otros componentes de la plataforma.

En el caso del piso de la plataforma, se usan 4 láminas y media de Jordomex de aleación de Aluminio 110 con un espesor de 2 mm. En este caso se propone darle mantenimiento preventivo al Jordomex usando pintura anticorrosiva, con el fin de alargar su vida útil y que la velocidad de corrosión sea más lenta.

6.1. Dimensiones finales

Con base en los análisis expuestos en las secciones anteriores, se logró realizar iteraciones sobre el diseño inicial hasta lograr obtener una plataforma que cumpla con los requisitos flotabilidad, estabilidad y seguridad. Las dimensiones son adecuadas para los parámetros requeridos y expuestos en el diseño preliminar, es posible contar con 2 personas sobre la plataforma sin que exista algún riesgo que atente contra su integridad física. A continuación se muestran las dimensiones y especificaciones finales generales de la plataforma, para mayor detalle se pueden consultar los planos anexados al final de este documento:

Cuadro 6.1: Dimensiones finales de la plataforma

Elemento	Valor	Unidad	Material
Estructura de la Base	3 x 2,5	m	Al 6083
Flotadores	0,7	m	Al 5083
Baranda de seguridad	3,5 x 2,5	m	Al 6083
Lanzadera	0,9 x 2,4	m	Al 1060

Además de los elementos listados en el Cuadro 6.1, se agregan al diseño pletinas tipo rodapié de seguridad, las cuales ayudan a sujetar por medio de pernos la baranda de seguridad. Esta baranda cuenta con un punto de ingreso a la plataforma, para facilitar el ingreso de las personas, además con una sección que ayuda al anclaje de la plataforma en la parte trasera, en el cual se distancian un poco más los perfiles de la baranda para lograr arrojar el ancla al mar.

La estructura base, tiene una sección de remolque en la parte delantera, para ayudar

al traslado de la plataforma a la zona de lanzamiento por medio de una lancha. Para el piso de la plataforma, se seleccionó el uso de láminas de jordomex de aluminio con un espesor de 2 mm, el cual funciona muy bien para la aplicación. Estas láminas son soldadas a las pletinas y a la estructura base. En la Figura 6.1 se presenta el diseño final de la plataforma, en el cual se incorporan todos los elementos necesarios para el desarrollo del proyecto. Es importante mencionar que, según la información obtenida por medio del software de diseño, el peso final de la plataforma es de 474 kg y de 503 kg con la lanzadera.

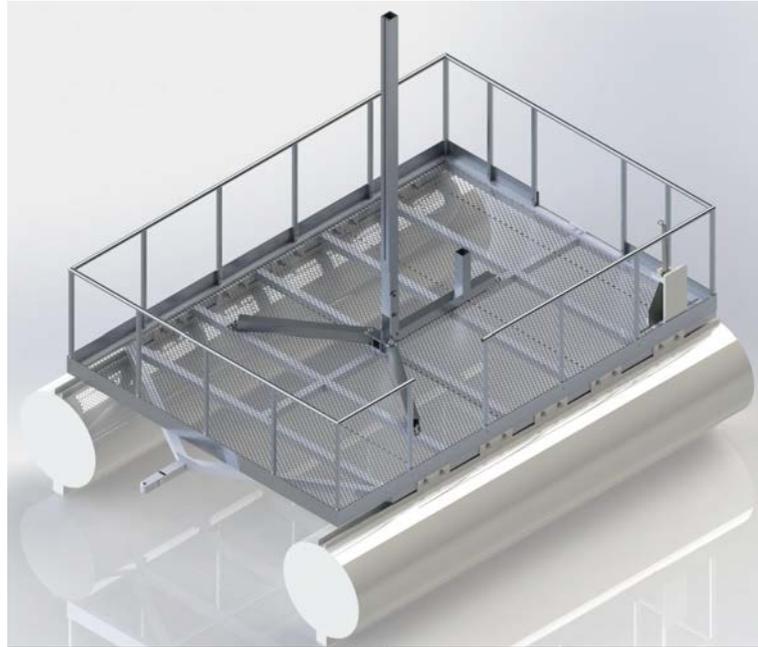


Figura 6.1: Renderizado de la Plataforma. [Elaboración propia]

6.2. Diseño de los flotadores

Como se puede observar en la Figura 6.1, se colocan dos cilindros grandes en la parte inferior de la plataforma, estos son los dispositivos que funcionan como flotadores. Se mantuvo la geometría tipo Pontoon, como se mencionó en la sección de diseño preliminar, ya que esta geometría es muy estable como se comprobó en el análisis de resultados. además, no se requiere un alto desempeño en velocidad, por lo que para la aplicación que se está desarrollando en este trabajo es una geometría idónea.

La resistencia mecánica de estos elementos no fue un factor trascendental en el diseño, debido a las características propias de su función y contexto en el que se utilizan. En cambio, la durabilidad en el entorno si fue una consideración sustancial. Ya que estos dispositivos estarán en contacto directo con el agua de mar, se elige como material la aleación de aluminio de grado marino 5083, el cual es conocido por su alta durabilidad en entornos agresivos con presencia de cloruros, así como su buena soldabilidad, siendo la industria naval la aplicación más importante de este material.

Se propone que los flotadores diseñados se fabriquen a partir de láminas de aluminio 5083 de 3 mm espesor. Estas láminas se doblan y se sueldan en los extremos de para obtener la geometría cilíndrica deseada. Además, se agrega un perfil soldado en la parte inferior del cilindro. Este elemento cumple la función de quilla estabilizadora, que brinda mayor

estabilidad al la plataforma, además desciende el centro de masa del conjunto, con lo que se mejora el comportamiento dinámico. Además, en el interior de los cilindros, se colocan estructuras tipo pared o “costillas” con el objetivo de seccionar el flotador y proporcionar rigidez en la estructura y modularidad. De modo que en caso de alguna fisura en los flotadores, estas divisiones evitan la inundación en todo el flotador. Esta característica se muestra con mayor detalle en los planos adjuntos. Finalmente, se adjuntan placas soldadas en la parte superior como elementos de sujeción, de modo que se sujeten los flotadores a la estructura base mediante uniones pernadas que facilitan el ensamble y desensamble de estos elementos. Los flotadores tienen un diámetro de 0,7 m y una masa de 167 kg.



Figura 6.2: Renderizado del flotador. [Elaboración propia]

6.3. Ancla

Dadas las características de suelo marino registradas en Golfito, se selecciona un ancla tipo Danforth que presenta cualidades favorables para el suelo lodoso. Además, es un ancla plegable y muy utilizada comercialmente. Dado que la plataforma tiene una eslora de 3.5 m, se escogió un ancla de 5 lbs de acuerdo con los tamaños estándar del fabricante.

Con respecto a la línea de fondeo, se seleccionó cuerda de nylon de 10 mm de diámetro según las especificaciones del cuadro 2.3. El largo de la línea se calcula con la ecuación 2.15. Dado que la profundidad máxima registrada en golfito es de 13 metros, la distancia francobordo es de 0,5 m y el cuadro 2.5 establece un alcance mínimo de 7 al utilizar únicamente cuerda, se obtiene un largo de línea de fondeo de 135 m.

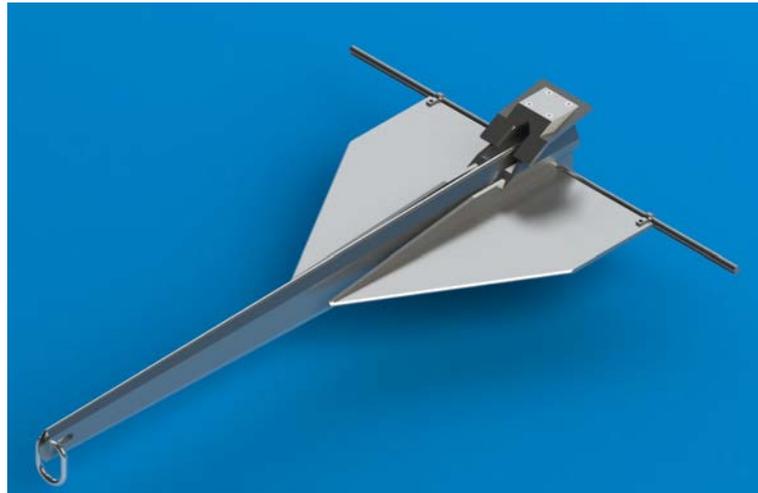


Figura 6.3: Renderizado del ancla Danforth.[26]

6.4. Diseño de la estructura base

La estructura base consiste en la unión de 16 perfiles de 60 x 1,5 mm de Aluminio grado marino 6083. Esta estructura brinda el soporte requerido al modelo y fue el punto de partida de este proyecto. En la parte frontal se cuenta con 2 perfiles inclinados y un perfil final con una unión que tienen la función de ser el punto de remolque para el traslado de la plataforma al punto de lanzamiento, esta unión cuenta con un pin y seguros, para darle la función de giro y adaptación con respecto al remolque de la otra embarcación. En los perfiles laterales se cuenta con agujeros por medio de los cuales se apertan los flotadores a la base. En esta base también se cuenta con agujeros tipo ojo chino para sujetar la lanzadera por medio de pernos. Las dimensiones finales de la estructura base, desde el remolque hasta el perfil final trasero, son 4 m por 2,5 m y tiene una masa de 26,3 kg. A continuación se presenta un resumen de los perfiles usados para ensamblar la base, para ver el detalle de la unión del remolque, se recomienda consultar los planos constructivos anexados al final de este documento:

Cuadro 6.2: Resumen de perfiles de la estructura base.

Elemento	Cantidad	Material
Perfiles de 3 m por 60 mm	3	Al 6083
Perfiles de 1,16 m por 60 mm	8	Al 6083
Perfiles de 2,5 m por 60 mm	2	Al 6083
Perfiles de 1,39 m por 60 mm	2	Al 6063



Figura 6.4: Renderizado de la estructura base. [Elaboración propia]

6.5. Selección de la lanzadera

La lanzadera seleccionada tiene una geometría tipo trípode, cuenta con un mástil de 2,4 metros que tiene un riel guía por medio del cual se realiza el lanzamiento del cohete brindándole una salida en posición vertical. Además, en este mástil se cuenta con una junta en la parte inferior con el fin de poder doblar el mástil para facilitar el ensamble del cohete, luego por medio de un perno se azoca el mástil para darle estabilidad. Los 3 perfiles inferiores se apenan a la estructura base. Toda la lanzadera es desarmable, por lo cual es de fácil traslado de un sitio a otro y también puede funcionar para lanzamientos en tierra, ya que se puede desprender de la plataforma. El peso final de la estructura completa de lanzadera es de aproximadamente 30 kg y los perfiles son de aleación de aluminio 1060.



Figura 6.5: Renderizado de la lanzadera. [Elaboración propia]

6.6. Estimación de presupuesto

En la presente sección se pretende hacer una estimación de los costos de fabricación de la plataforma. El estudio económico parte de dos premisas:

- La adquisición de los materiales necesarios para poner en marcha el proyecto como metales y las partes que se venden de forma estándar como tornillos, tuercas y arandelas.
- La manufactura y ensamblaje final de los conjuntos son realizadas en un taller de mecánica de precisión.

Las partes se cotizaron con diferentes proveedores, intentando procurar el mejor precio posible, además se cotizó con un taller la manufactura de la plataforma. En las cotizaciones no se contempla la lanzadera ni en materiales ni en manufactura ya que el GIA cuenta con una lanzadera igual a la propuesta, que se puede implementar en la plataforma. En el siguiente cuadro se presenta el resumen de los costos enumerados anteriormente:

Cuadro 6.3: Costos estimados del diseño final de la Plataforma.

Material	Cantidad	Monto (CRC)
Lamina AL 5083	7	1 398 721,03
Jordomex 2 mm AL 110	5	230 169,30
Pintura anticorrosiva	1	20 000,00
Tornillo Hexagonal M20X2.5X130	20	46 931,16
Arandela plana 20 mm	24	2 418,56
Tuerca hexagonal M20X2,5	20	10 059,49
Tornillo mariposa 13x4	3	7 500,00
Perfiles AL 6063	5	113 033,90
Pletinas AL 6063	6	71 074,74
Tornillo hexagonal M5x0.8x45	19	745,01
Tuerca hexagonal M5x0.8	19	187,43
Arandela plana 5 mm	8	43,57
Arandela FW 0.5	6	900,00
Tornillo 20x4.25x1.25	3	6 000,00
Tuerca 20 mm	11	12 872,86
Tornillo 20x4x0.45	4	8 000,00
Ancla 14 lb	1	40 743,00
Abrazadera	1	11 820,00
Manufactura	N/A	1 914 220,00
	Total	3 895 441

Capítulo 7

Especificaciones de Uso

Con el fin de que se realice un uso adecuado y seguro de la plataforma, se desarrolla el presente capítulo. La plataforma fue diseñada para soportar el ingreso de 2 personas de 80 kg cada una, con el fin de que entre las dos se realice una correcta colocación del cohete en la lanzadera. El diseño de la plataforma permite que la lanzadera se pueda ensamblar y desensamblar en suelo firme, ya que cuenta con pernos de sujeción al piso de la misma. A continuación se enumeran los pasos que se deben seguir para el uso de la plataforma:

1. Trasladar la plataforma al sitio de lanzamiento con una lancha por medio del sistema de remolque.
2. Acercarse al borde lateral de la plataforma que cuenta con un espacio de ingreso.
3. En el piso de la plataforma se cuenta con algunos pernos de sujeción, mantener cuidado al caminar dentro de la plataforma.
4. Ancle la plataforma por medio del sistema de anclaje instalado en la plataforma siguiendo las recomendaciones de anclaje de cualquier embarcación.
5. Por medio del sistema de la junta inferior de la lanzadera, doble el mástil y coloque el cohete en el riel.
6. Regrese la lanzadera a la posición vertical y asegúrese de apretar el tornillo para fijar el mástil.
7. Retírese de la plataforma de manera cuidadosa.
8. Aleje la lancha hasta el perímetro recomendado de acuerdo a la norma de seguridad y al tamaño de cohete que vaya a lanzar.
9. Una vez finalizado el lanzamiento, acérquese a la plataforma, ingrese, desancla la misma, sujétela a la lancha por medio del sistema de remolque y retírela hasta la orilla.

Para hacer uso de la plataforma, es necesario que se cumplan las siguientes condiciones del entorno para asegurar un correcto lanzamiento y salvaguardar la integridad de las personas:

- La velocidad del viento no debe ser mayor a 5,7 km/h, debido a que es indispensable que no se genere alto oleaje para que la plataforma se mantenga dentro del rango de ángulo de inclinación permitido.

- Asegurarse de que no transiten otras embarcaciones dentro del perímetro de seguridad establecido por la norma NFPA 1127 durante el lanzamiento.
- Antes de hacer uso de la plataforma, se recomienda hacer una revisión visual de las condiciones mecánicas de los elementos de la plataforma, con el fin de determinar si existe algún deterioro que pueda poner en riesgo la seguridad de las personas. Prestar especial atención a los flotadores, ya que los golpes o degradación en el material puede resultar en el ingreso de agua y disminuir considerablemente su flotabilidad.

Capítulo 8

Conclusiones

- Mediante la revisión de la normativa internacional para cohetes de alta potencia, se logró determinar los tipos y especificaciones de los cohetes de alta potencia que serían lanzados en la zona de Golfito, estos son los tipos H, I y J, ya que en el país se cuenta con personas certificadas para el lanzamiento de estos tipos de motor.
- Utilizando la información obtenida en la normativa internacional de seguridad para cohetes de alta potencia, se requiere desde 0,5 km hasta 1,6 km para lanzar los cohetes seleccionados. En algunas zonas, la bahía de Golfito tiene un ancho que ronda los 2 km a 3 km, dado que este espacio es marino no presenta riesgo de incendio por presencia de pasto seco, de manera que, se logra cumplir con los requerimientos de seguridad.
- De acuerdo con la información encontrada en la normativa internacional de seguridad para el lanzamiento de cohetes de alta potencia, se requiere que la velocidad del viento en el lugar de lanzamiento no supere los 32 km/h para prevenir desvíos en la trayectoria del cohete. En Golfito se registran condiciones climáticas favorables en cuanto al cumplimiento de los requerimientos de seguridad. La velocidad promedio registrada por el IMN es de 5,7 km/h.
- Se decidió usar una configuración de lanzadera tipo trípode que permite el fácil ensamble del cohete y despegue del mismo, ya que cuenta con un riel guía. Debido a que la configuración seleccionada tiene una forma simple, es fácil de colocar y quitar de la plataforma. El material seleccionado para esta lanzadera es aluminio 1060, por lo que cuenta con un peso de 29 kg.
- Como parte del análisis para la selección de los materiales, se determinó que el uso de aleaciones de aluminio de grado marino resulta el más favorable para esta aplicación. A partir de la iteración del modelo con diferentes materiales, se obtuvo que con el aluminio la masa final de la plataforma con la lanzadera es de 503 kg.
- Se diseñó una plataforma cuyas características cumplen los criterios de estabilidad requeridos en el diseño de embarcaciones marinas. Respecto a la estabilidad inicial, la altura metacéntrica es positiva en ambos planos de interés. Además, se realizó un análisis de estabilidad en ángulos grandes y se determinó que el rango de estabilidad es de 90° en ambos sentidos de giro y el momento escorante permisible por la plataforma es de 5 500 Nm y 6 000 Nm para el plano longitudinal y lateral respectivamente.
- Mediante un modelo de cuerpo rígido se analizó el comportamiento hidrodinámico de la plataforma con el objetivo de evaluar sus propiedades inerciales respecto a la

interacción con el oleaje de Golfito. Mediante la simplificación de olas regulares, se analizó con el oleaje promedio o de diseño de Golfito, las oscilaciones de la plataforma no superan los 5° de inclinación. Dado que el requerimiento de seguridad estipula que no se debe superar los 30° de inclinación en la lanzadera, se puede concluir que la plataforma cumple con este requisito de seguridad bajo las condiciones de oleaje promedio en Golfito.

- Con el objetivo de complementar la simplificación de olas regulares del análisis hidrodinámico, se analizaron tres casos de oleaje adicionales, en los cuales las condiciones de oleaje son inusuales, pero de interés para abarcar otros comportamientos. En el oleaje por viento se abarcó una ola de amplitud pequeña y periodo corto, los resultados de las oscilaciones de la plataforma alcanzan los 12° de inclinación. En este caso aún se mantiene por debajo de límite permitido en la normativa. Para el caso de oleaje por estela de embarcaciones grandes, la respuesta del sistema se encuentra por debajo de los 30° . Si bien este resultado se encuentra debajo del límite de la normativa, el modelo fue linealizado para ángulos pequeños, por lo que no se consideran confiables las oscilaciones superiores a 20° . Caso similar ocurre con el escenario de resonancia, en este se emplean olas con un periodo muy corto y los resultados indican oscilaciones por encima de los 30° .
- El costo total aproximado de la plataforma es de 3 895 441 colones, procurando los mejores precios del mercado.

Capítulo 9

Recomendaciones

Este campo de estudio representó un gran reto debido a la alta complejidad de la terminología naval, es un campo muy especializado y el tema es muy amplio en el cual se encuentran muchos factores de por medio, el más importante es la naturaleza del medio, el mar es un fluido complejo y poco predecible, es por esto que se vuelve indispensable contar con todas las herramientas y conocimientos necesarios en el tema, en este caso se debieron realizar varias suposiciones y simplificaciones que se desarrollan a lo largo del análisis de este proyecto, para obtener un resultado lo más aproximado a la realidad. Con base en esto es que se listan las siguientes recomendaciones con el fin de que en un futuro se logre llevar este diseño a su materialización.

- Los resultados del comportamiento hidrodinámico son favorables, sin embargo, el comportamiento del mar no se puede considerar completamente predecible y las simplificaciones empleadas en este análisis pueden resultar poco conservadoras. Por tanto, se recomienda realizar ensayos en sitio para predecir con mayor exactitud el comportamiento del mar en Golfito. Posteriormente, si es requerido, se puede ampliar el análisis mediante el método de superposición de olas regulares con los datos experimentales para obtener un patrón de incidencia irregular en el modelo matemático.
- A partir de la premisa anterior se recomienda realizar una revalorización del uso de un sistema estabilizador para la lanzadera. Particularmente, investigar el uso de mecanismos electrónicos para el sistema estabilizador de la lanzadera, ya que facilitaría la recolección de datos necesarios para asegurar que el dispositivo se mantenga en la posición deseada.
- Si bien la resistencia de los materiales fue considerada, un análisis más detallado de las cargas que recibirá la estructura se considera beneficioso para evitar problemas de fatiga, ya que este es un factor relevante en el análisis estructural de embarcaciones. Puede ser de utilidad hacer uso de los diferentes software para análisis de elementos finitos.
- Como una mejora a la operación de la plataforma, se podrían instalar instrumentos de medición para monitorear datos en tiempo real de algunos parámetros de interés, por ejemplo la velocidad del viento y el ángulo de inclinación de la plataforma. Esto con el objetivo de garantizar condiciones idóneas justo al momento del lanzamiento y prevenir el efecto negativo de alguna eventualidad particular que no pueda ser prevista.
- La investigación mediante la herramienta biomimética se considera un punto de partida para continuar el desarrollo y construcción de esta plataforma, ya que su

aporte puede complementar este diseño. Cabe destacar, que al implementar algún aspecto de diseño discutido en esta sección se deben realizar nuevamente los estudios de estabilidad e hidrodinámicos para comprobar el comportamiento de la plataforma y asegurar que se cumplan los requisitos de la normativa de seguridad.

- Respecto a los materiales de la tornillería, se recomienda considerar la interacción entre los metales en unión debido al fenómeno de corrosión galvánica en las cercanías de las uniones. La solución a esta eventualidad no se limita a la selección de un único material para los pernos, por lo que la propuesta de este tema en este diseño queda a disposición de la manufactura. Lo anterior basado en la idea de aprovechar la amplia oferta en el mercado de estos elementos. Por tanto, la solución puede abarcar también el uso de aislantes poliméricos en caso de que el material de los pernos tenga una interacción negativa, que genere corrosión galvánica, con el material de la unión.
- Antes de llevar este modelo a una etapa de manufactura, se recomienda agregar un mecanismo que facilite el ingreso de las personas a la plataforma de forma segura, para ejemplificar, considérese un tipo de escalera. También es importante analizar el uso de amortiguadores alrededor de los flotadores con el fin de protegerlos contra golpes que puedan dañar la estructura.

Bibliografía

- [1] NASA, “La evolución del cohete,” 2001, Accesado el 17 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: <https://pwg.gsfc.nasa.gov/stargaze/Mrockhis.htm>.
- [2] NASA, “Brief history of rockets,” 2014, Accesado el 17 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/TRC/Rockets/history_of_rockets.html.
- [3] C. Rodríguez, “Lanzan Cluster Aeroespacial en Costa Rica,” *Seminario Universidad*, 2016, Accesado el 16 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: <https://semanariouniversidad.com/ultima-hora/lanzan-cluster-aeroespacial-costa-rica/>.
- [4] L. de Lemos, *Entrevista virtual sobre antecedentes de cohetería*, Marzo 2021.
- [5] F. Pomareda, “Diputados aprueban creación de Agencia Espacial cuestionada por la Contraloría,” *Seminario Universidad*, 2021, Accesado el 16 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: <https://semanariouniversidad.com/pais/diputados-aprueban-creacion-de-agencia-espacial-cuestionada-por-la-contraloria/>.
- [6] Z. Song, Z. Xie, L. Qiu, D. Xiang y J. Li, “The prospects of sea launches for Chinese cryogenic liquid-fueled medium-lift launch vehicles,” *Chinese Journal of Aeronautics*, 2020.
- [7] A. Buhrig, S. Cox, T. Alexander, D. Krenitsky y C. Huebner, “Sea Launch program overview,” en *Dynamics Specialists Conference*, 1996, pág. 1186.
- [8] W. Furlow, “Space launch planned for floater before year-end,” *Offshore-Mag*, 1998, Accesado el 16 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: <https://www.offshore-mag.com/rigs-vessels/article/16756544/space-launch-planned-for-floater-before-yearend>.
- [9] T. Burghardt, “SpaceX acquires former oil rigs to serve as floating Starship spaceports,” *NASASpaceFlight*, 2021, Accesado el 16 de mayo, 2021 [En línea]. dirección: <https://www.nasaspaceflight.com/2021/01/spacex-rigs-starship-spaceports/>.
- [10] J. M. Recuento, *Modelismo Espacial: Manual del constructor de modelos espaciales*. 2008.
- [11] NFPA, *NFPA 1127: Code for high power rocketry*, 2002.
- [12] G. Sutton y O. Biblarz, *Rocket propulsion elements (7 ed)*. A Wiley Interscience Publication, 2001.
- [13] NAR, *Standard motor codes (Inf.Tec.)* Accesado el 8 de junio, 2021 [En línea], 2000. dirección: <http://www.nar.org/standards-and-testing-committee/standard-motor-codes/>.
- [14] NFPA, *NFPA 1122: Code for model rocketry*, 2002.

- [15] FAA, *Código Electrónico de Regulaciones Federales [CFR] [Electronic Code of Federal Regulations]*, Accesado el 30 de julio, 2021 [En línea], 2008. dirección: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?rgn=div5&node=14:2.0.1.3.15#se14.2.101_11.
- [16] S. C. Misra, *Design principles of ships and marine structures*. CRC Press, 2015.
- [17] J. Journée y W. Massie, *Offshore hydromechanics*. Delft University of Technology, 2001.
- [18] A. Rodriguez Marijuan, "Offshore Floating Platforms : Analysis of a solution for motion mitigation," Tesis de mtría., Kungliga Tekniska Högskolan, 2017.
- [19] J. Calderón, *Grado en Arquitectura Naval HBII: Comportamiento en la Mar*, Universidad Politécnica de Madrid.
- [20] INCOP, *Profundidades y mareas Golfito*, Accesado el 3 de abril, 2023 [En línea]. dirección: <https://incop.go.cr/terminal-golfito/#1481919697241-5ce61087-ba42>.
- [21] G. Govaere, *Mapa de velocidades máximas en un ciclo de mareas Golfito*, IMARES.
- [22] IMN, *Promedios mensuales de datos climáticos*, Departamento de información.
- [23] G. Govaere, *Cálculo del oleaje generado por embarcaciones*, IMARES.
- [24] Promonautica, *Guía De Los Pesos Del Ancla Según La Eslora*, Accesado el 10 de febrero, 2023 [En línea], 2022. dirección: https://www.promonautica.com/blog/57-post/57_guia-de-los-pesos-del-ancla-segun-la-eslora?page_type=post.
- [25] E. R. Hinz, *The complete book of anchoring and mooring*. Cornell Maritime Press/-Tidewater Publishers, 1986.
- [26] UNE, *Embarcaciones menores. Cadenas de ancla*, 24565:1992, 1992.
- [27] S. Buckles, *The Illustrated Guide To Boat Hull Types (11 Examples)*, Accesado el 3 de abril, 2023 [En línea]. dirección: <https://improvesailing.com/guides/boat-hull-types>.
- [28] E. A. Avallone, T. Baumeister III y A. Sadegh, *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. McGraw-Hill Education, 2007.
- [29] E. V. Lewis, "Principles of Naval Architecture, Second Revision. Volume 1: Stability and Strength. Chapter 1 Hamlin, NA, Ship Geometrie, Chapter 2 Golberg, LL, Intact Stability, Chapter 3 Nickum, GC, Subdivision and damage Stability, Chapter 4 Pauling, JR, Strength of Ships," *EV Lewis, editor, Published by: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, SNAME, Jersey City, New York, ISBN: 0-939773 00 7, Printed in the USA*, 1988.
- [30] E. C. Tupper, *Introduction to naval architecture*. Butterworth-Heinemann, 2013.
- [31] B. Balachandran y E. B. Magrab, *Vibrations*. Cengage Learning, 2009.
- [32] N. C. Townsend y R. A. Shenoi, "Control strategies for marine gyro stabilizers," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 39, n.º 2, págs. 243-255, 2013.
- [33] K. Kula, "An overview of roll stabilizers and systems for their control," *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, vol. 9, n.º 3, 2015.
- [34] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill, 2015.

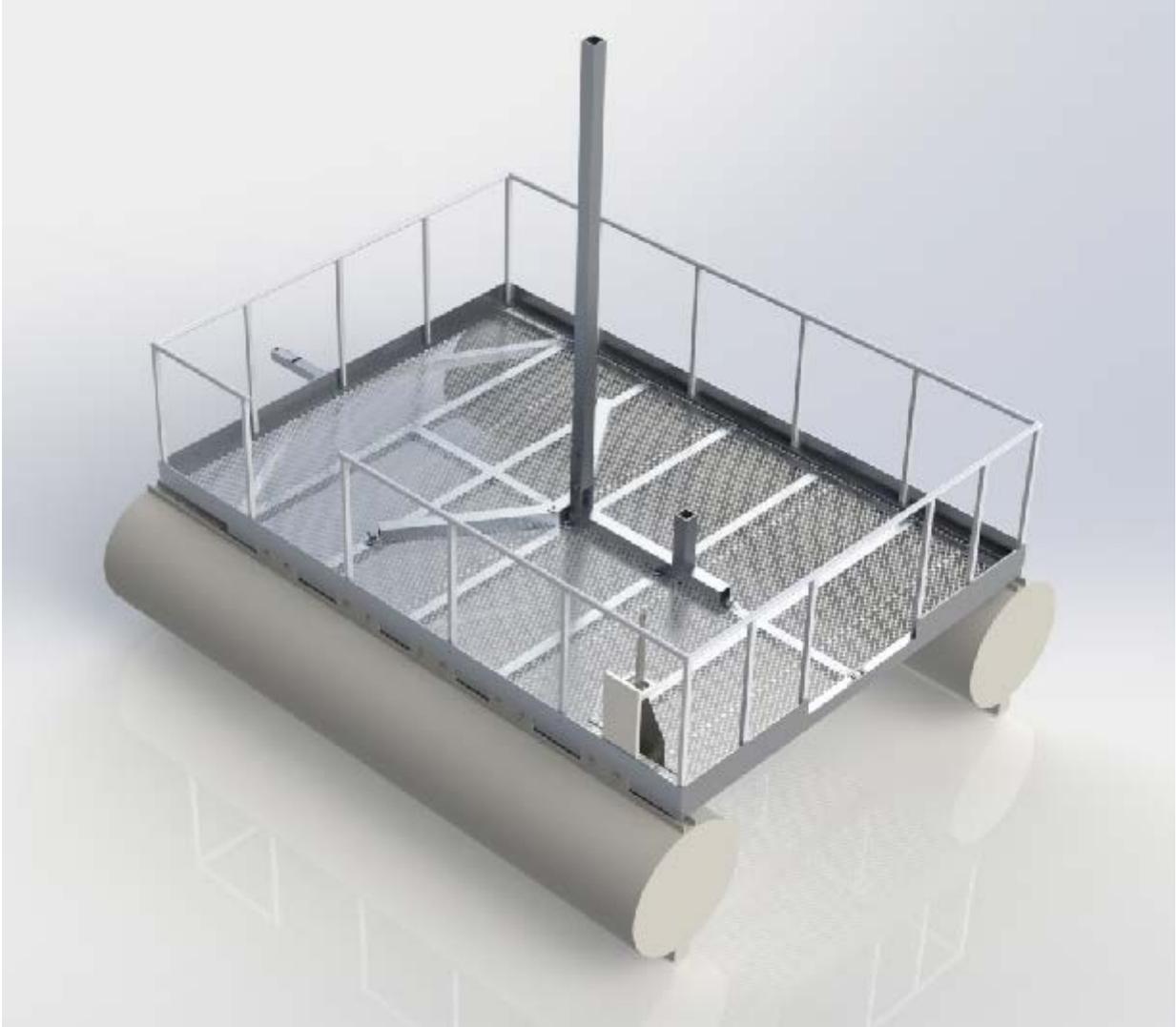
- [35] O. Salas, “Estudiantes del GIA-UCR obtienen Certificación Nivel II en cohetes,” *Universidad de Costa Rica*, (28 de Octubre de 2016). dirección: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2016/10/28/estudiantes-del-gia-ucr-obtienen-certificacion-nivel-ii-en-cohetes.html>.
- [36] A. Metals, *Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6063 - T6 Extrusions-Datasheet*, Accesado el 24 de marzo, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.aalco.co.uk/datasheets/>.
- [37] AWS, *Specification for Bare Aluminum and Aluminum-Alloy Welding Electrodes and Rods*, A5.10/A5.10M:1999, 1999.
- [38] BiomimicryInstitute, *El proceso de diseño biomimético*, Accesado el 3 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://toolbox.biomimicry.org/es/metodos/el-proceso-biomimetico/>.
- [39] BiomimicryInstitute, *Nature’s Unifying Patterns*, Accesado el 3 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://toolbox.biomimicry.org/core-concepts/natures-unifying-patterns/>.
- [40] A. Sokolik, *IMG.0353*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/asokolik/7988500186/in/faves-191538957@N07/>.
- [41] H. F. Bohn y W. Federle, “Insect aquaplaning: *Nepenthes* pitcher plants capture prey with the peristome, a fully wettable water-lubricated anisotropic surface,” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 101, n.º 39, págs. 14 138-14 143, 2004. DOI: 10.1073/pnas.0405885101. eprint: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.0405885101>. dirección: <https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.0405885101>.
- [42] M. Kieffer, *Stony Coral close up*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/mattkieffer/5287409683/in/set-72157625285559796>.
- [43] L. Tian, Y. Yin, H. Jin, W. Bing, E. Jin, J. Zhao y L. Ren, “Novel marine antifouling coatings inspired by corals,” *Materials Today Chemistry*, vol. 17, pág. 100 294, 2020.
- [44] dogtooth77, *Salvinia minima (water spangles) frond detail*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/53817483@N00/23302558960/in/photolist-JToWvs-s33pQm-29sNuAx-Q9Jcr3-2NProk-iUqHxh-GU8i3r-GKQh1A-GR7ySd-GNaUdK-2frK2bY-73Rge-29mkgiV-2iCW5Ss-2iCTnSN-dgS1YG-2NProx-xJGFzw-tCqJ7d-o4sFub-xpw2fk-nP2vzB-2ivUQVZ-BvaGVW-CLhzse-3isSfF-bY59fE-kcoCw-L6p8ss-6j6kMw-6j6kXu-2ivUQC9-2iHb5c-CLhzKZ-8Rj8Px-VThvAp-CYrh7G-MeGRbC-3CCkQp-2iJvvPR-bW5EKQ/>.
- [45] A. Meyers, *Leaf Structure Retains Air Layer Underwater*, Accesado el 3 de febrero, 2022 [En línea]. dirección: <https://asknature.org/strategy/leaf-structure-retains-air-layer-underwater/>.
- [46] M. Hows, *White Beaked Sedge*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/markhow/48586714066/in/photolist-2h2rBmE-7Nvh3Q-2kWur3k-sdLxpU-GQ9FSe-2kvHwtp-eVSCtA-fn1fsB-HWvE4C-NGixyf-NzJPkb-NHvjAN-BC3tcf-eUcJtx-NVzzcp-2jHHJYA-NZT16S-ND7SPf-ahk5xT-NURBi1-2gh4Tt7-NSR3Dn-eXHSAd-P6XRa3-2jHjkt5-CU2i2c-2nEyKZk-2nEvRsL-NjX74C-eUcJrp-2jJmEvA-a5oiPK-a9Db9o-eWZY3o-a9Db9j-a5oiPB-a5Hmus-27gNjW7-eXKd6v-8nYSF9-eU3L7N-2jHo6f7-2jHJsk9-2kvHwEX-8oaFgk-2nui9W3-a9kczU-8oaFgg-eVSCvj-2j8Eehi>.

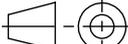
- [47] H. Rydin, J. K. Jeglum y K. D. Bennett, *The biology of peatlands, 2e*. Oxford university press, 2013.
- [48] J. Rahona, *Bambu*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/164291077@N06/49137747223/in/photolist-2hS8Njk-26baEF-5nRGWx-2y2RYz-6tXnGR-4DQLzt-BUSkf-6HvxSu-G3MHJM-HFB18q-p2ryNd-4t8YcA-sbHXQ8-2kUZAhj-9SrSM-CK4WAY-CSj4Nd-KgDH1M-r7wLn8-2fY5V9M-Sr3Jfb-kLwZH-HwePWD-CMjyJK-5a3HqW-BXebDH-CK4XaE-9BfqNc-CK4Wmq-pxgjja-6mjKFX-7EZPuz-9rfDsy-7SqSwG-8znMH4-6Fdm4s-9HfHsu-4mLB79-6tX3Di-n6YXUu-Nug74-9HcPia-BX6XgL-4QbUVG-8y7Bex-bDBjzw-qhf3ps-8NnWCm-6kycLX-9HfGyQ>.
- [49] S. Vogel, *Comparative biomechanics: life's physical world*. Princeton University Press, 2013.
- [50] J. Rahona, *Bambu*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/82995800@N06/19529374478/in/photolist-vKK9D5-PxXbWD-2hMeRa7-2hsKQg1-Gok4cr-7Dg3VV-yJ71Nz-QuH551-bUHGni-q9Z96S-aeE3kU-zg6dYx-2jtTJQR-67CLaN-bRanGa-b4k1FX-bCgJcw-4vVGG9-2mLfbAV-acNQck-bRagSV-bCfBxm-2gYREtg-bRaqye-bCgjpf-bCfD1q-nwLjn-ndjEG-2e12dAA-27CcEsS-5X2QEZ-fq9aKz-bCgdNs-2moBMD9-2imtkQR-81wAKG-AZiVbG-2FCmri-2aAhYD1-4Eacd-sLZLE4-6gmDux-2jCfufN-9bMBFE-7zYSVH-7b4yr-nF4qWp-3Q3JWT-7Ly7Q1-ayhw4q>.
- [51] R. Méndez-Alonzo, C. Moctezuma, V. R. Ordoñez, G. Angeles, A. J. Martínez y J. López-Portillo, "Root biomechanics in *Rhizophora mangle*: anatomy, morphology and ecology of mangrove's flying buttresses," *Annals of Botany*, vol. 115, n.º 5, págs. 833-840, 2015.
- [52] P. Martone, *Morphology of Calliarthron Thalli*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://asknature.org/strategy/genicular-joints-allow-for-flexibility/>.
- [53] P. T. Martone y M. W. Denny, "To bend a coralline: effect of joint morphology on flexibility and stress amplification in an articulated calcified seaweed," *Journal of Experimental Biology*, vol. 211, n.º 21, págs. 3421-3432, 2008.
- [54] S. McCoy, *NOAA Photo Library*, Accesado el 2 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://www.flickr.com/photos/noaaphotolib/26150782918/>.
- [55] N. M. Holbrook, M. W. Denny y M. Koehl, "Intertidal "trees": consequences of aggregation on the mechanical and photosynthetic properties of sea-palms *Postelsia palmaeformis* Ruprecht," *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 146, n.º 1, págs. 39-67, 1991.
- [56] TheoRivierenlaan, *Pixabay*, Accesado el 3 de febrero, 2023 [En línea]. dirección: <https://pixabay.com/photos/victoria-amazonic-water-lily-lily-2830216/>.
- [57] F. Box, A. Erlich, J. H. Guan y C. Thorogood, "Gigantic floating leaves occupy a large surface area at an economical material cost," *Science Advances*, vol. 8, n.º 6, eabg3790, 2022.
- [58] R. Mora, *Trabajo en colaboración*, Centro de Investigación en Ciencia e Ingeniería de Materiales (CICIMA), 2021.
- [59] R. B. Kaul, "Anatomical Observations on Floating Leaves," *Faculty Publications in the Biological Sciences*, 1976. dirección: <https://digitalcommons.unl.edu/bioscifacpub/461/>.

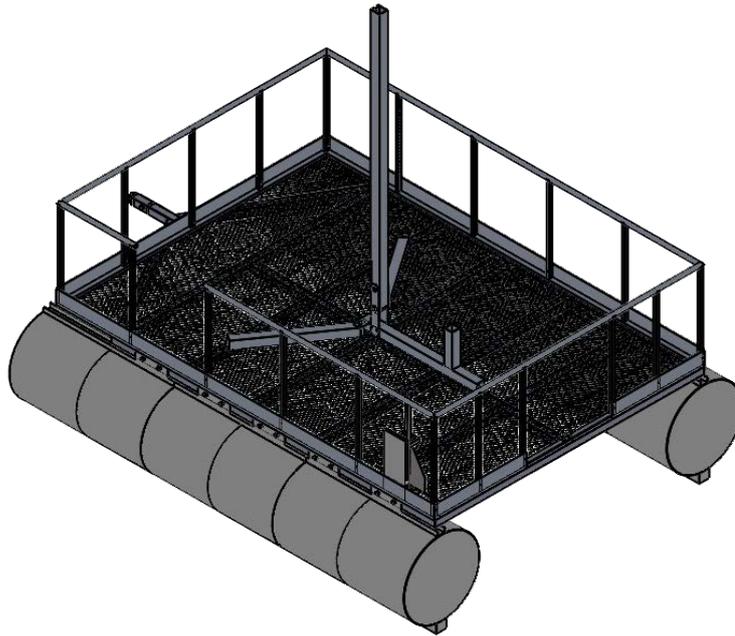
[60] C. Vargas, *Trabajo en colaboración*, 2021.

Anexos

Anexo A.1. Diagramas de construcción

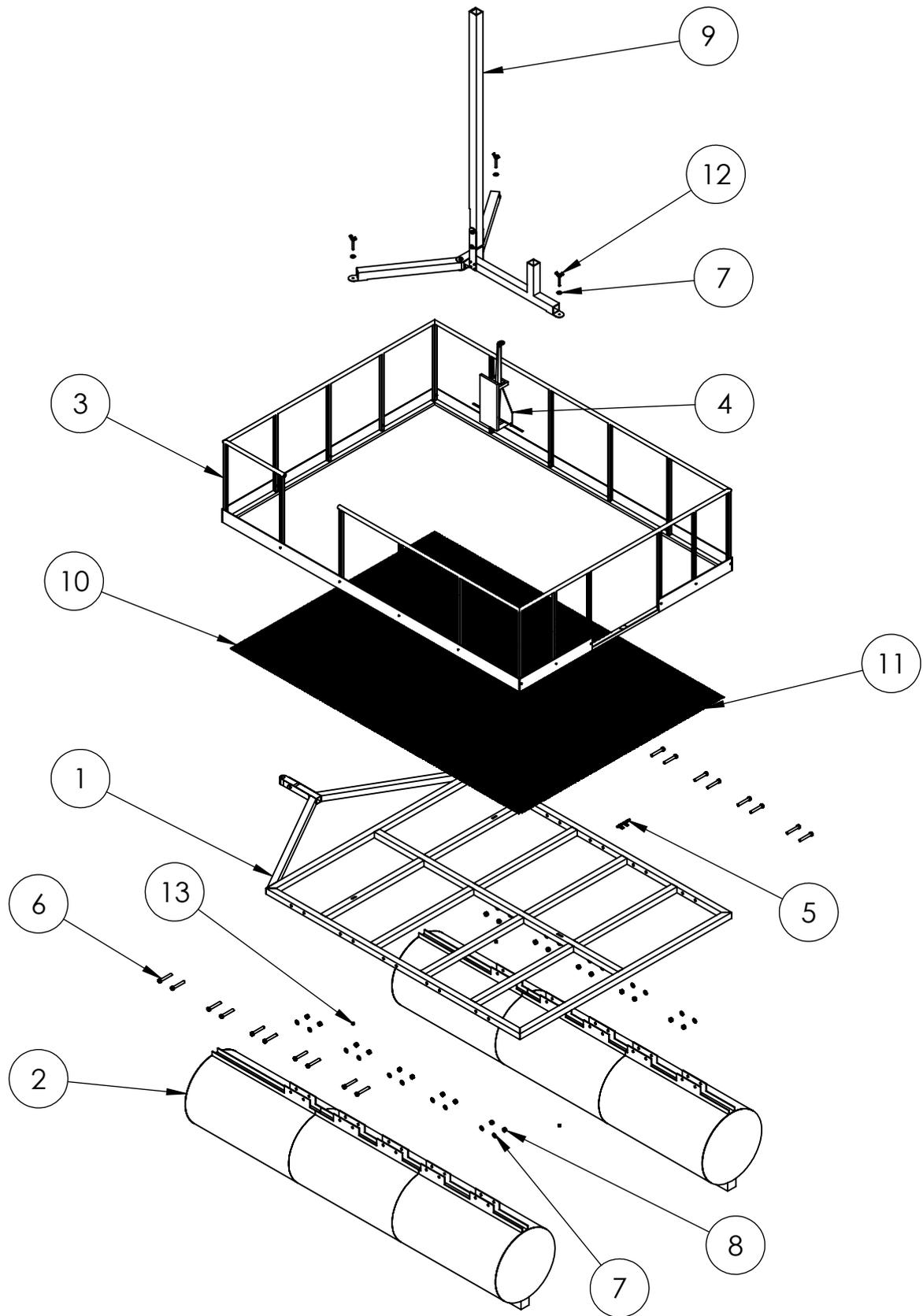


Título	Proyecto Final de Graduación Plataforma acuática para lanzamiento de cohetes	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	1	
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023	
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	Revisión	A

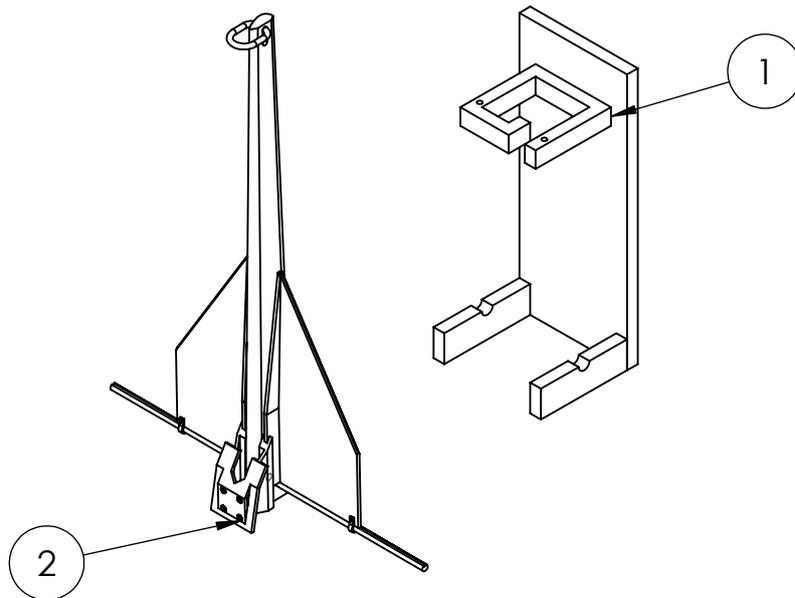


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BASE METAL	AL 6063	1
2	FLOTADOR	AL 5083	2
3	ESTRUCTURA DE SEGURIDAD	AL 6063	1
4	ANCLA	AISI 316	1
5	ABRAZADERA	AISI 316	1
6	TORNILLO HEXAGONAL	M20 x 2.5 x 130 --52WN	20
7	ARANDELA PLANA	20 mm	23
8	TUERCA HEXAGONAL	M20 X 2.5 --D-N	20
9	LANZADERA	AL 1060	1
10	JORDOMEX	AL 110	4
11	JORDOMEX PEQUEÑO	AL 110	1
12	TORNILLO DE MARIPOSA PESADO	0.5-13x4	3
13	TUERCA 0.5000	20-D-N	3

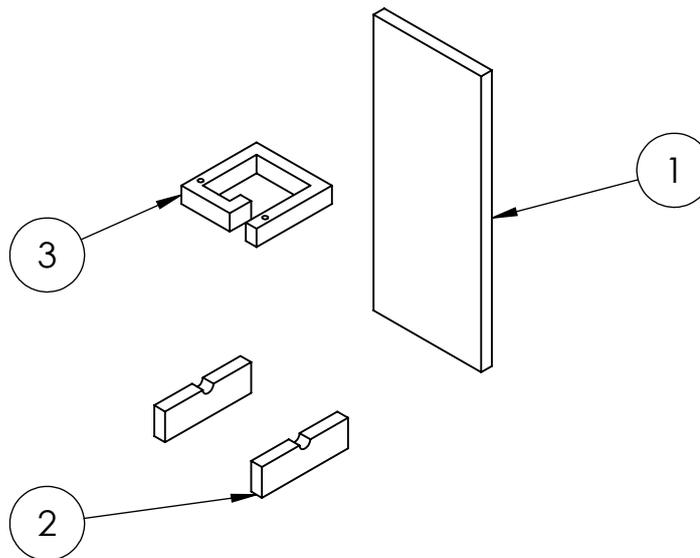
Título	Proyecto Final de Graduación Lista de partes	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	2
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha 4/24/2023	
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A		



Título	Proyecto Final de Graduación Despiece	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	3
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			

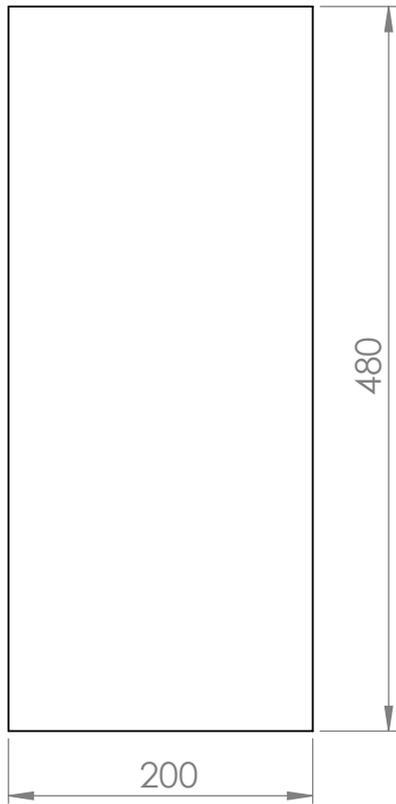


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	SOPORTE ANCLA	Roble	1
2	ANCLA DANFORTH		1

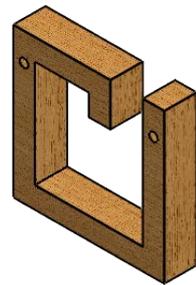
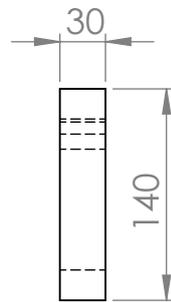
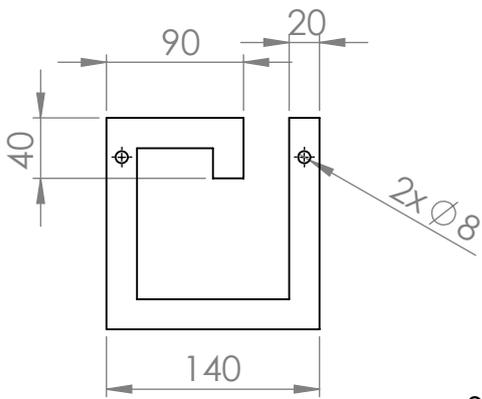


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	PARED	ROBLE	1
2	SOPORTES INFERIORES DEL ANCLA	ROBLE	2
3	SUJETADOR ANCLA	ROBLE	1

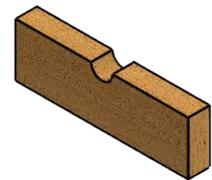
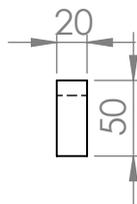
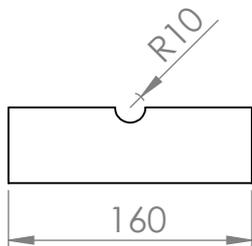
Título	Proyecto Final de Graduación Lista de Partes del Ancla	Escala	1:10	Acotación	mm	Página	4
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha	
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A		



PARED
ESPESOR: 20 mm

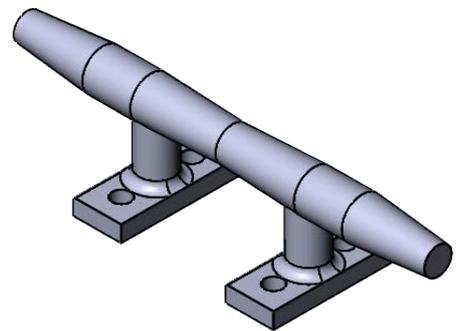
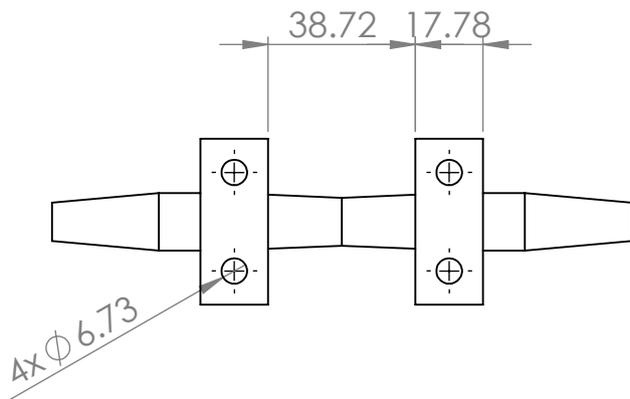
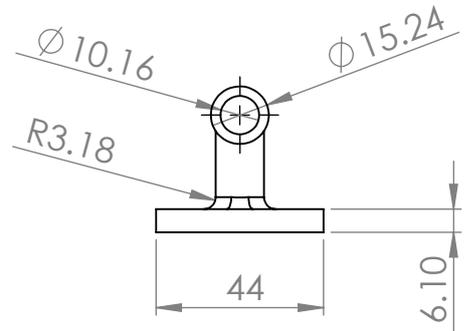
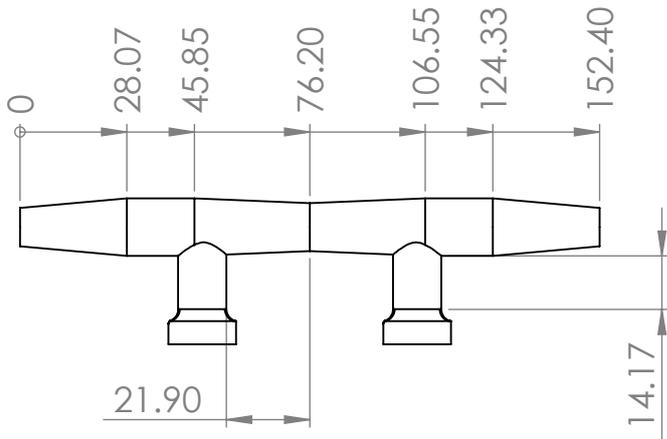


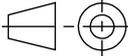
SUJETADOR ANCLA

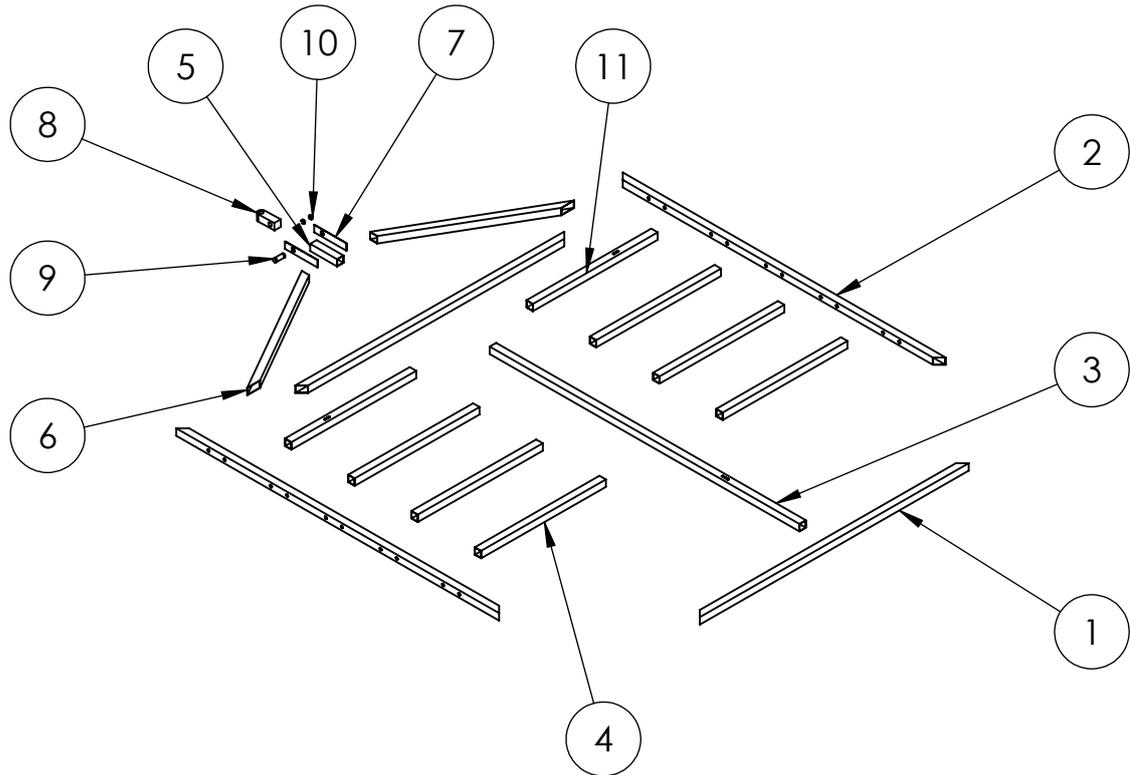


SOPORTES INFERIORES DEL ANCLA

Título	Proyecto Final de Graduación Soporte del Ancla	Escala	1:5	Acotación	mm	Página	5
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			

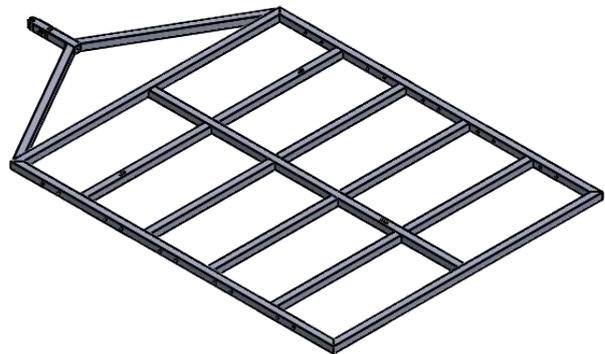
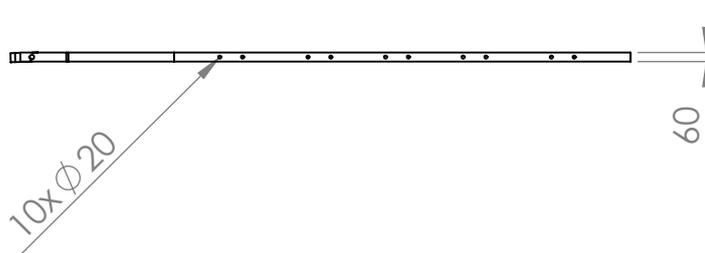
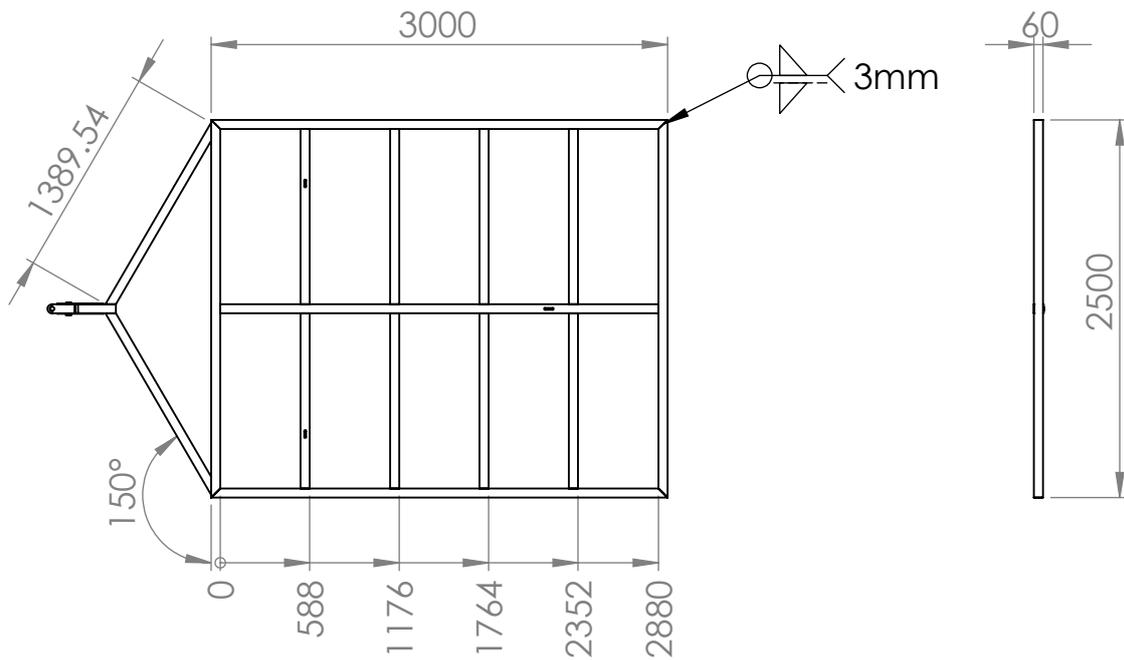


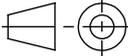
Título	Proyecto Final de Graduación Abrazadera	Escala	1:2	Acotación	mm	Página	6
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ± 0.1 .xx = ± 0.02 .xxx = ± 0.005			



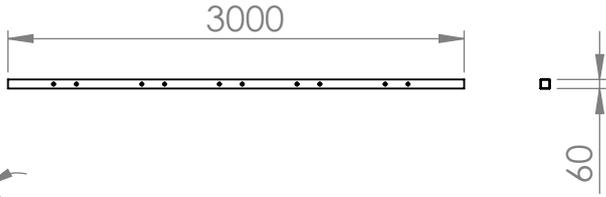
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	PERFIL B	AL 6063	2
2	PERFIL A	AL 6063	2
3	PERFIL INTERNO	AL 6063	1
4	PERFIL DIAGONAL INTERNO A	AL 6063	6
5	PERFIL CENTRAL REMOLQUE	AL 6063	1
6	PERFIL DIAGONAL REMOLQUE	AL 6063	2
7	PLACA DEL REMOLQUE	AL 6063	2
8	UNIÓN REMOLQUE	AL 6063	1
9	PIN	AL 5083	1
10	SEGURO	AL 5083	2
11	PERFIL DIAGONAL INTERNO B	AL 6063	2

Título	Proyecto Final de Graduación Lista de partes base metálica	Escala	1:100	Acotación	mm	Página	7
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	Revisión	A
					.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005		

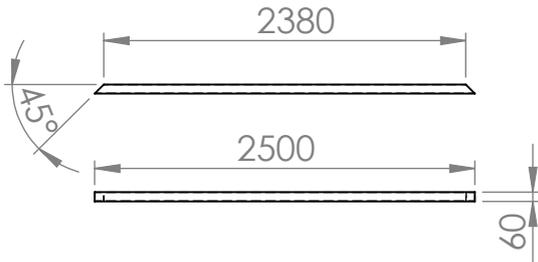


Título	Proyecto Final de Graduación Base Metálica	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	8
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			

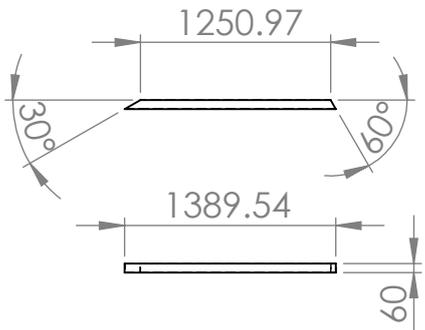
NOTA:
El espesor de pared de los perfiles es de 1.5 mm



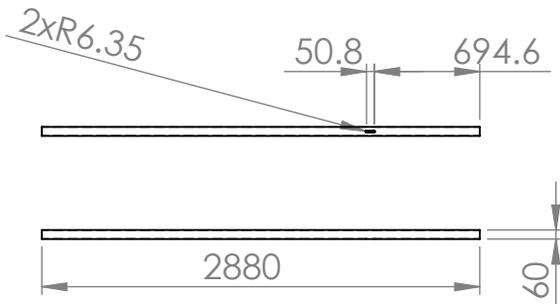
PERFIL A



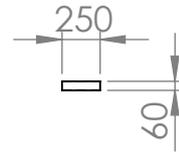
PERFIL B



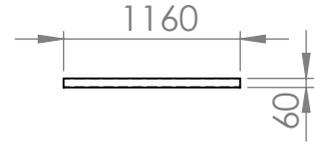
PERFIL DIAGONAL REMOLQUE



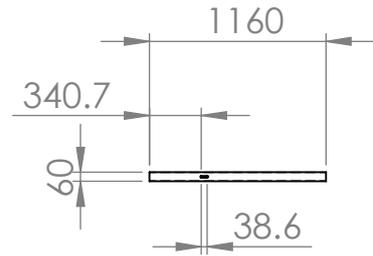
PERFIL INTERNO



PERFIL CENTRAL REMOLQUE



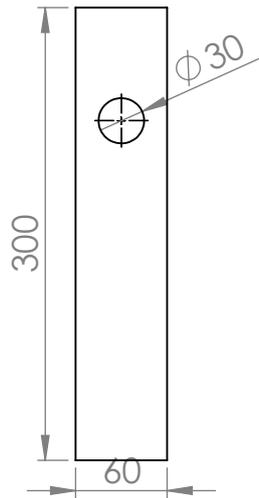
PERFIL DIAGONAL INTERNO A



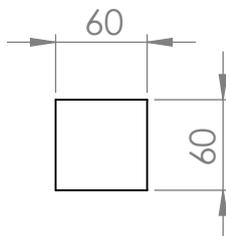
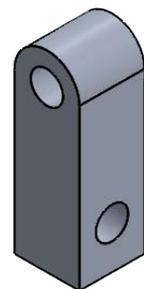
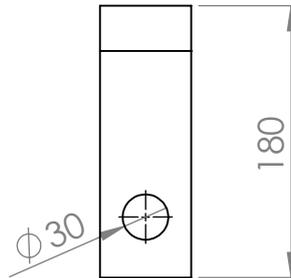
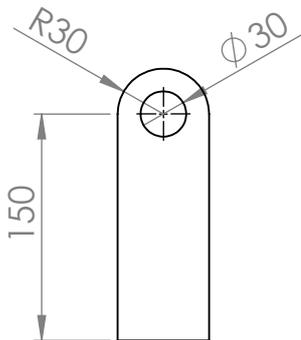
PERFIL DIAGONAL INTERNO B



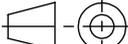
Título	Proyecto Final de Graduación Perfil Base	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	9
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	Revisión	A
					.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005		

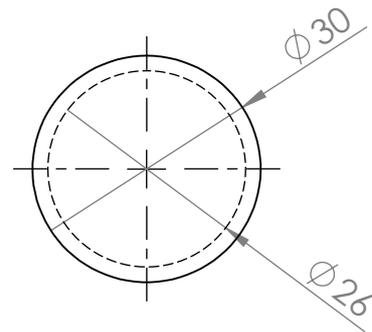
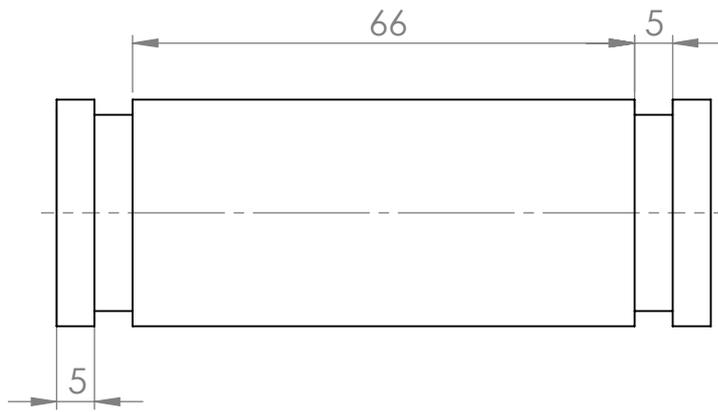


PLACA DEL REMOLQUE
ESPEJOR: 3 mm

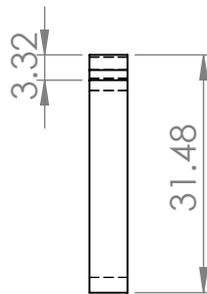
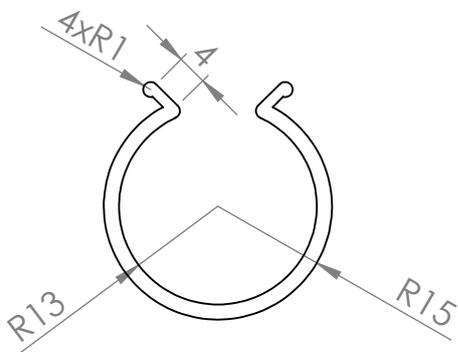
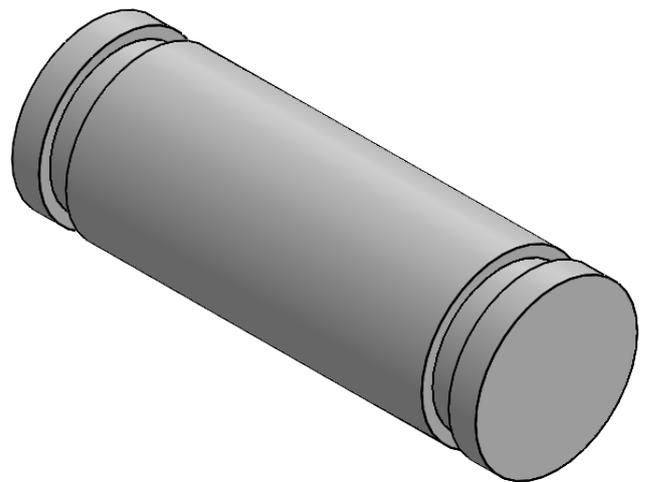


UNIÓN DEL REMOLQUE

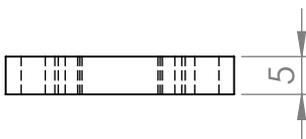
Título	Proyecto Final de Graduación Placa y Unión del Remolque	Escala	1:5	Acotación	mm	Página	10
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	Revisión	A
					.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005		



PIN



SEGURO



Título **Proyecto Final de Graduación**
Pin y Seguro

Escala **1:1**

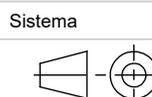
Acotación **mm**

Página **11**

Autores **Angely Selenia Dittel Meza**
Stephanie Rodríguez Vargas

Fecha **4/24/2023**

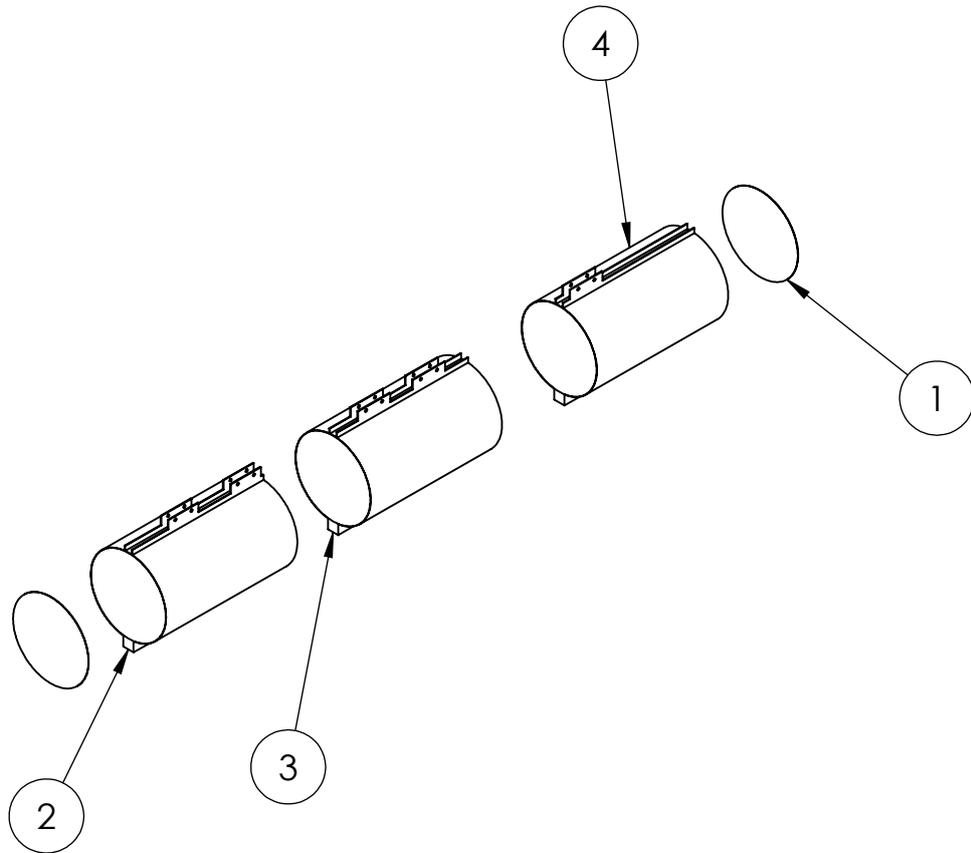
Institución **Universidad de Costa Rica**
Escuela de Ingeniería Mecánica



Tolerancias
.x = ±0.1
.xx = ±0.02
.xxx = ±0.005

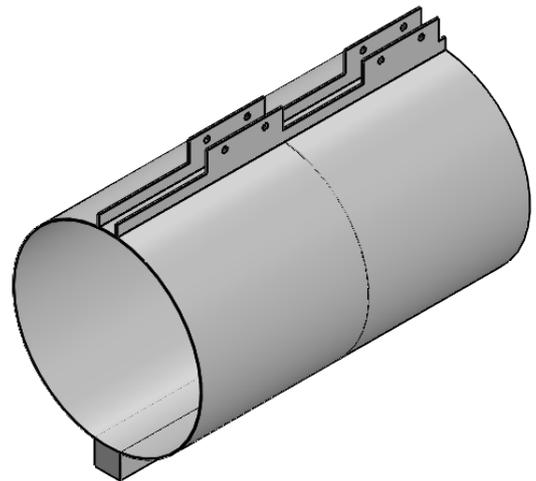
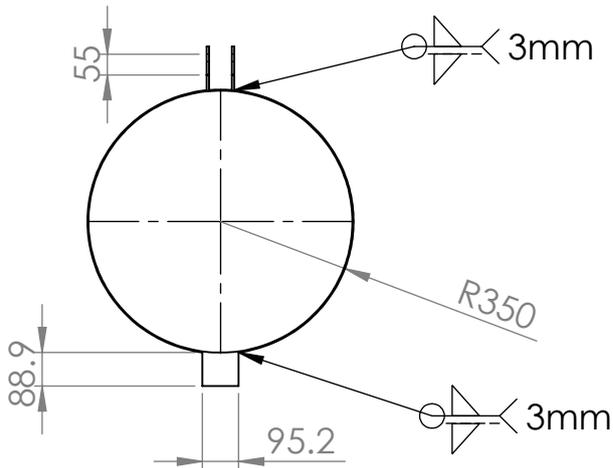
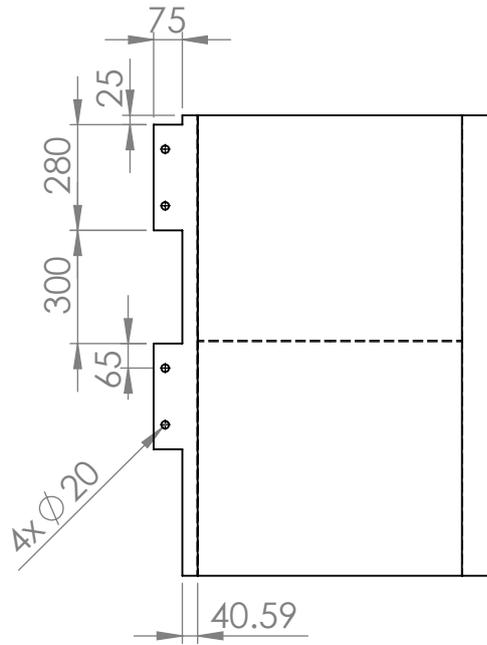
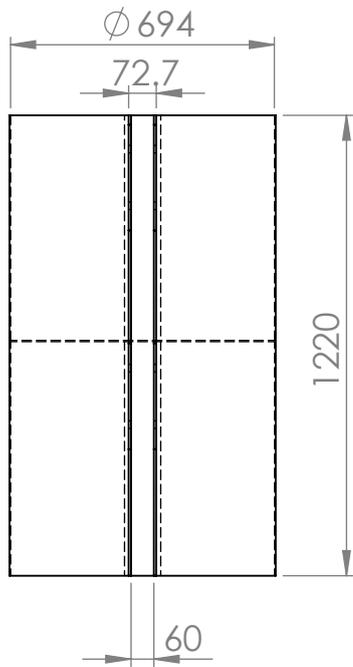
Revisión

A

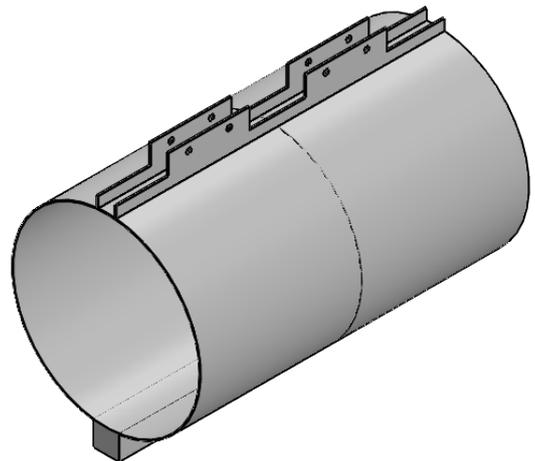
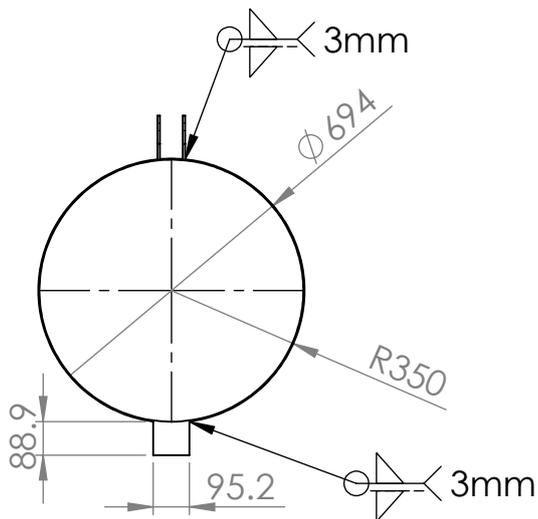
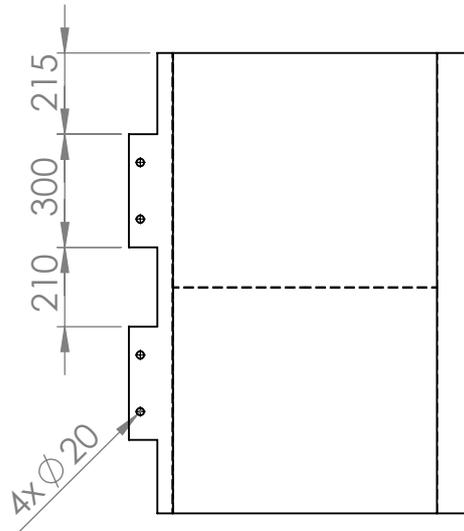
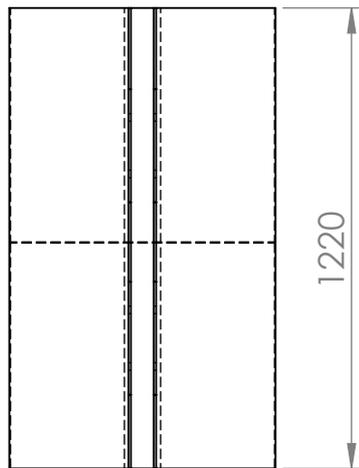


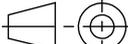
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	TAPA CILINDRO	AL 5083	2
2	CILINDRO A	AL 5083	1
3	CILINDRO B	AL 5083	1
4	CILINDRO C	AL 5083	1

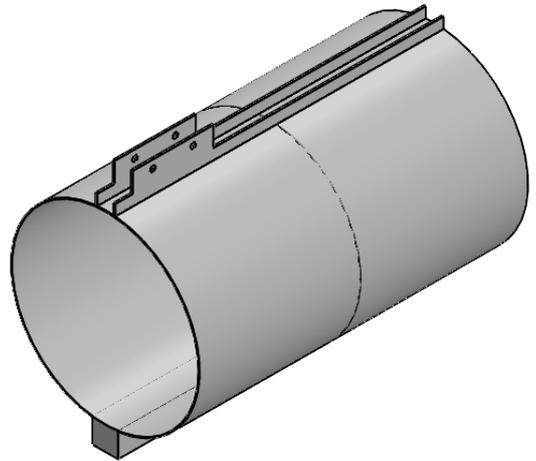
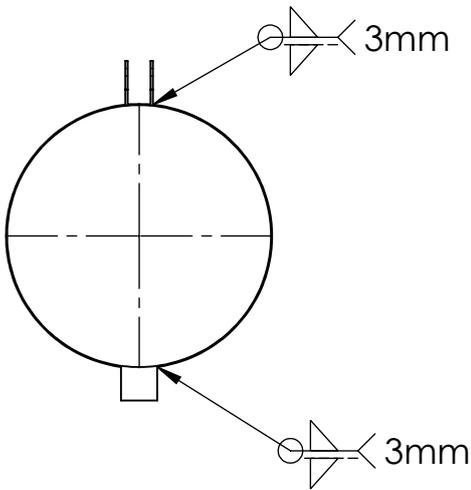
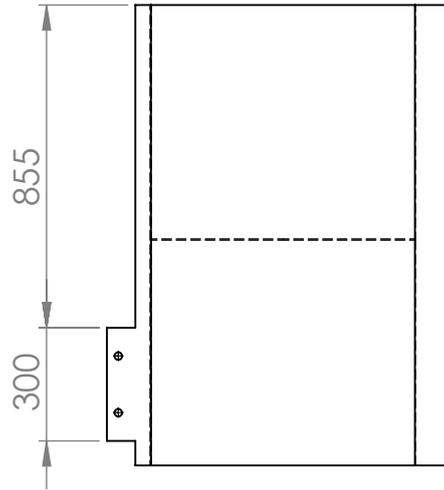
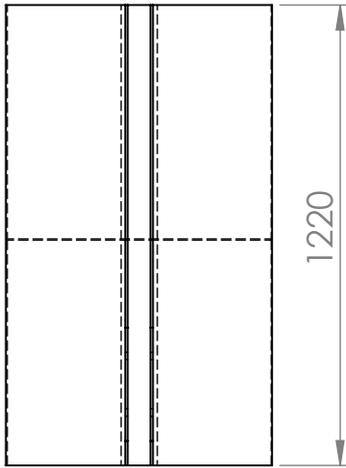
Título	Proyecto Final de Graduación Lista de partes flotador	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	12
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema		Tolerancias	.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	Revisión	A



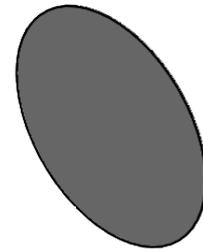
Título	Proyecto Final de Graduación Cilindro A	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	13
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			



Título	Proyecto Final de Graduación Cilindro B	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	14
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			

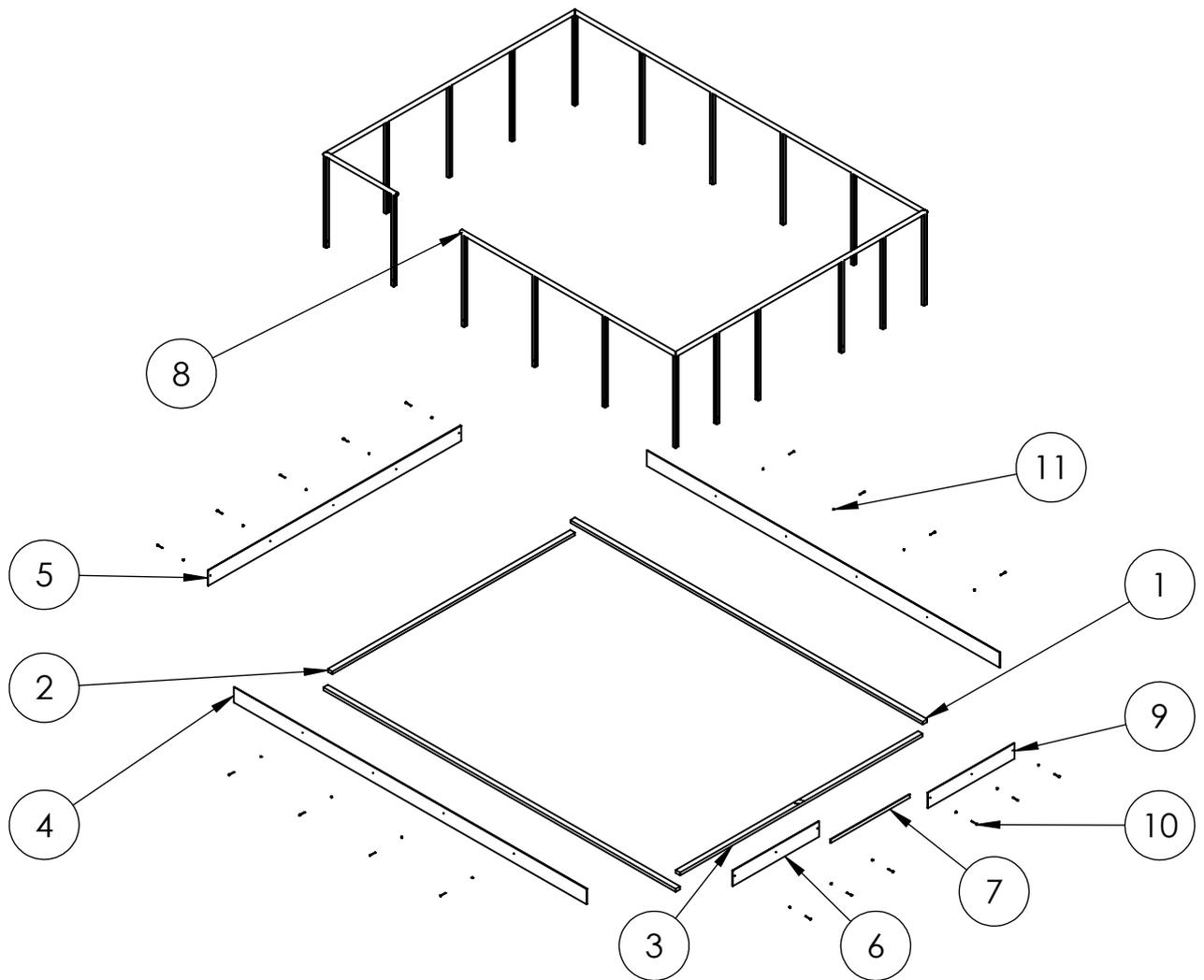


CILINDRO C



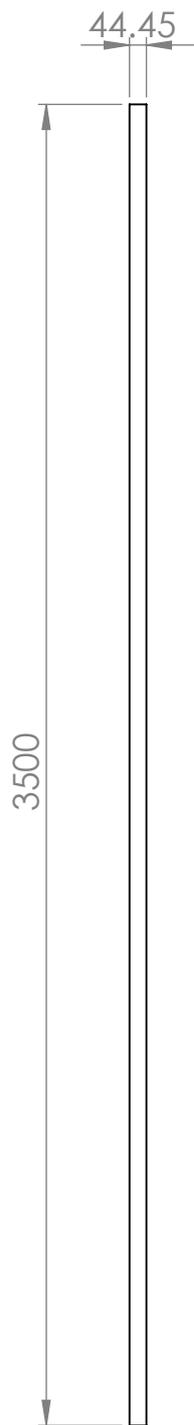
TAPA DEL CILINDRO
ESPESOR: 3 mm

Título	Proyecto Final de Graduación Cilindro C y Tapa del Cilindro	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	15
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha 4/24/2023	
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A		

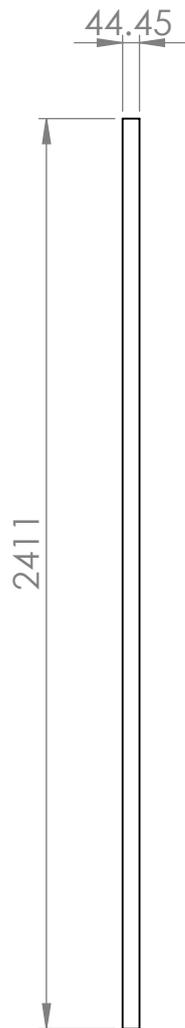


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	PLETINA PISO A	AL 6063	2
2	PLETINA PISO B	AL 6063	1
3	PLETINA PISO B-2	AL 6063	1
4	PLACA BARANDA A	Al 6063	2
5	PLACA BARANDA B	Al 6063	1
6	PLACA BARANDA D	Al 6063	1
7	PLACA BARANDA E	Al 6063	1
8	BARANDA SEGURIDAD	AL 6063	1
9	PLACA BARANDA C	Al 6063	1
10	TORNILLO HEXAGONAL	M5 X 0.8 X 45 --16WN	19
11	TUERCA HEXAGONAL	M5 X 0.8 --D-N	19

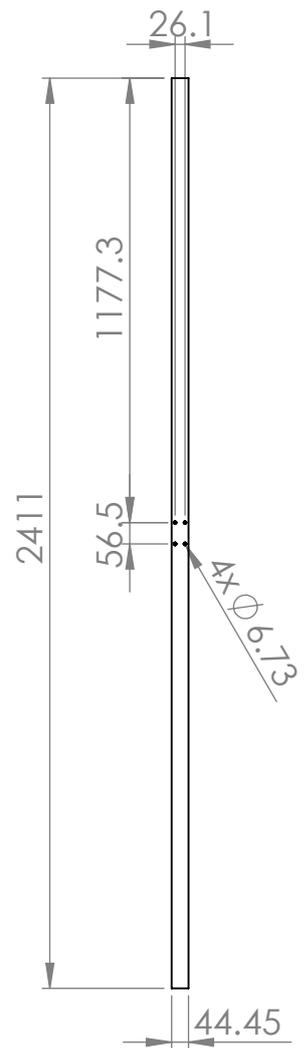
Título	Proyecto Final de Graduación	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	16
		Lista de partes estructura de seguridad					Autores
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005			



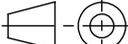
PLETINA PISO A
ESPESOR: 25.4 mm

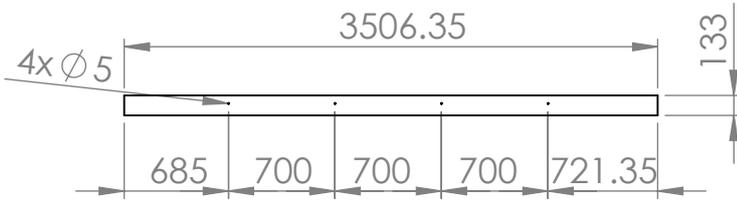


PLETINA PISO B
ESPESOR: 25.4 mm

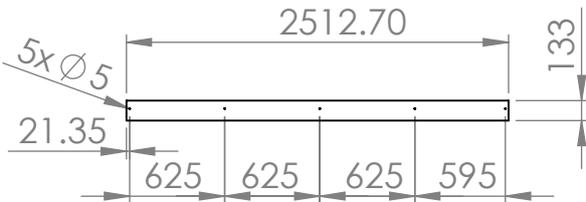
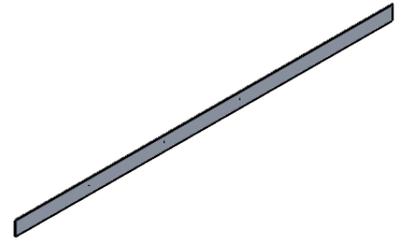


PLETINA PISO B-2
ESPESOR: 25.4 mm

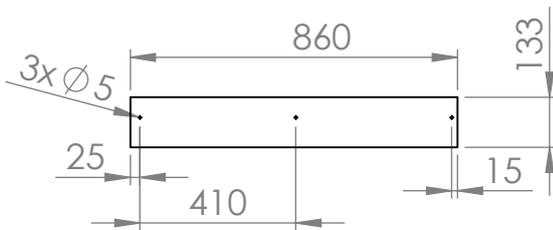
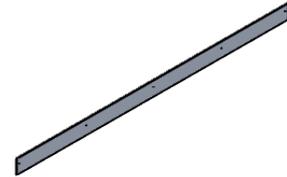
Título	Proyecto Final de Graduación Pletina de Piso	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	17
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	Revisión	A
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005				



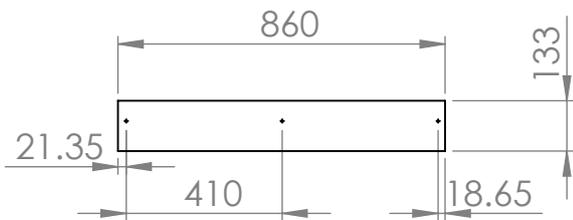
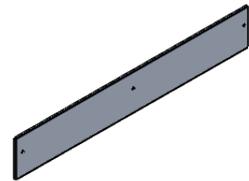
PLACA BARANDA A
 ESPESOR: 6.35 mm
 ESCALA 1:50



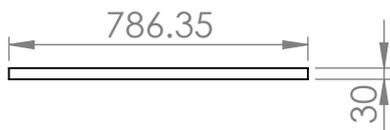
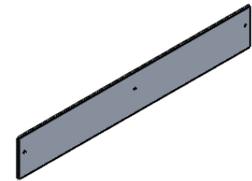
PLACA BARANDA B
 ESPESOR: 6.35 mm
 ESCALA 1:50



PLACA BARANDA C
 ESPESOR: 6.35 mm



PLACA BARANDA D
 ESPESOR: 6.35 mm



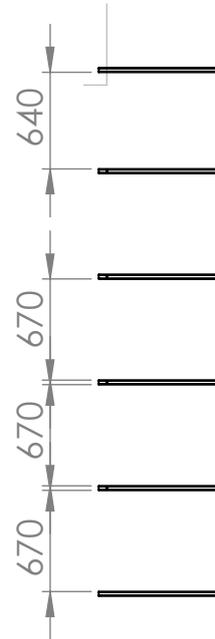
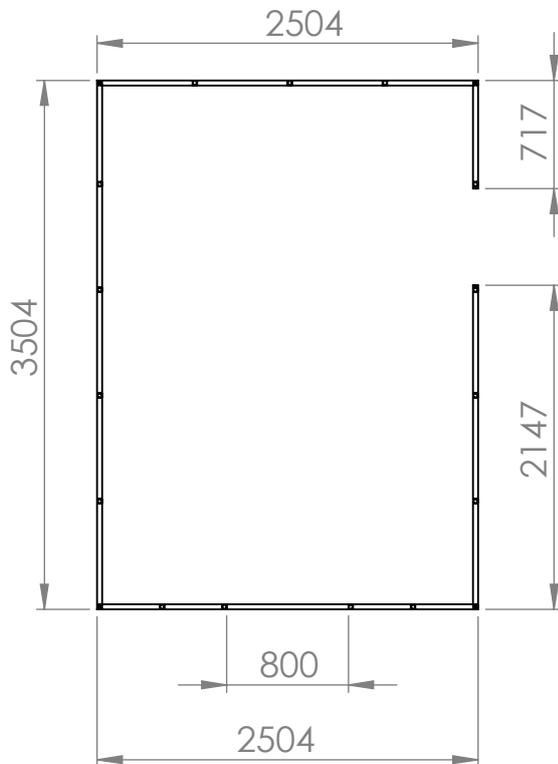
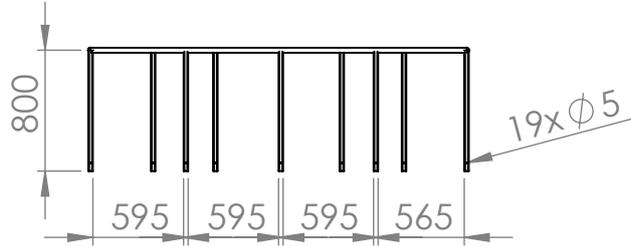
PLACA BARANDA E
 ESPESOR: 6.35 mm



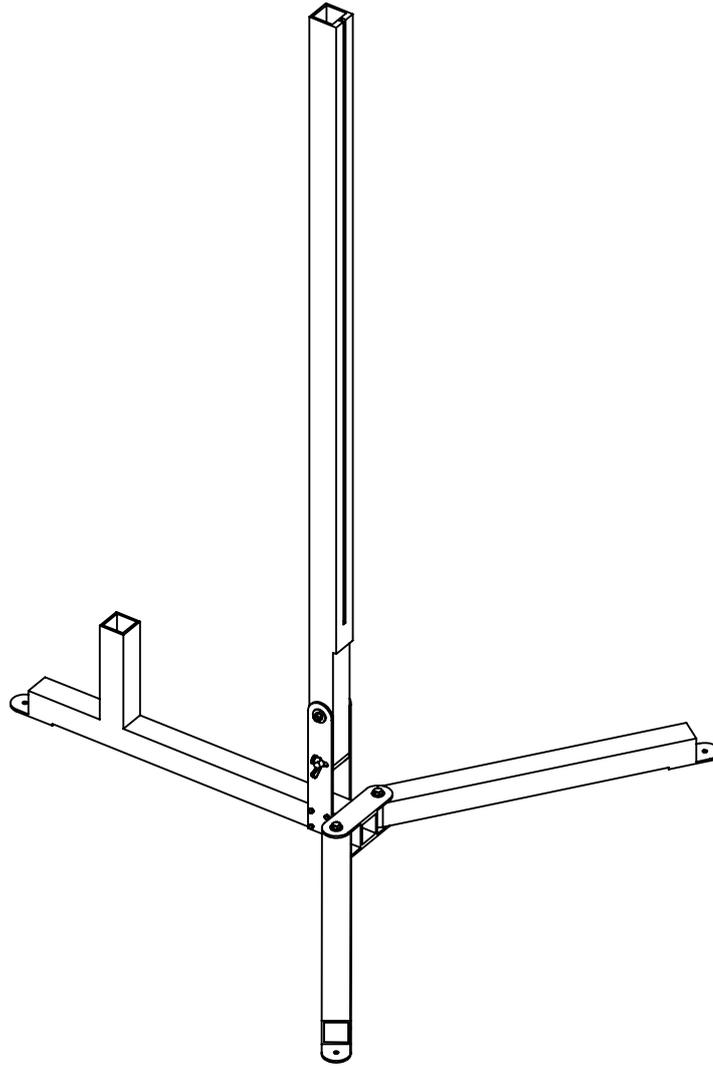
Título	Proyecto Final de Graduación Placa Baranda	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	18
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema			Tolerancias	Revisión	A
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005				

NOTA:

La baranda de seguridad corresponde a un miembro estructural que consiste de 19 perfiles cuadrados de 30x30x2.6 y tubo redondo de 32.7x4.

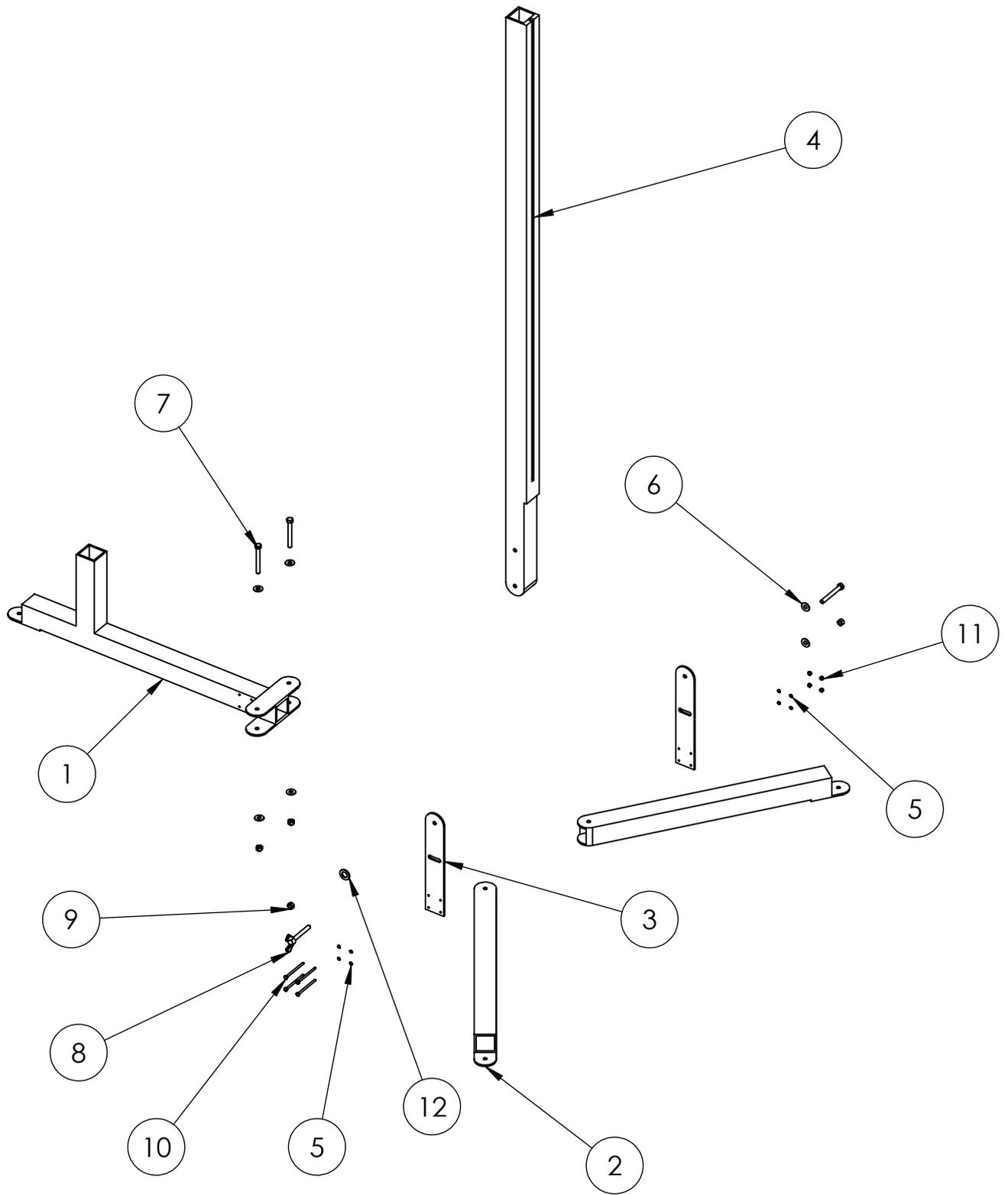


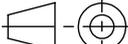
Título	Proyecto Final de Graduación Baranda de Seguridad	Escala	1:50	Acotación	mm	Página	19
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	A	
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005				



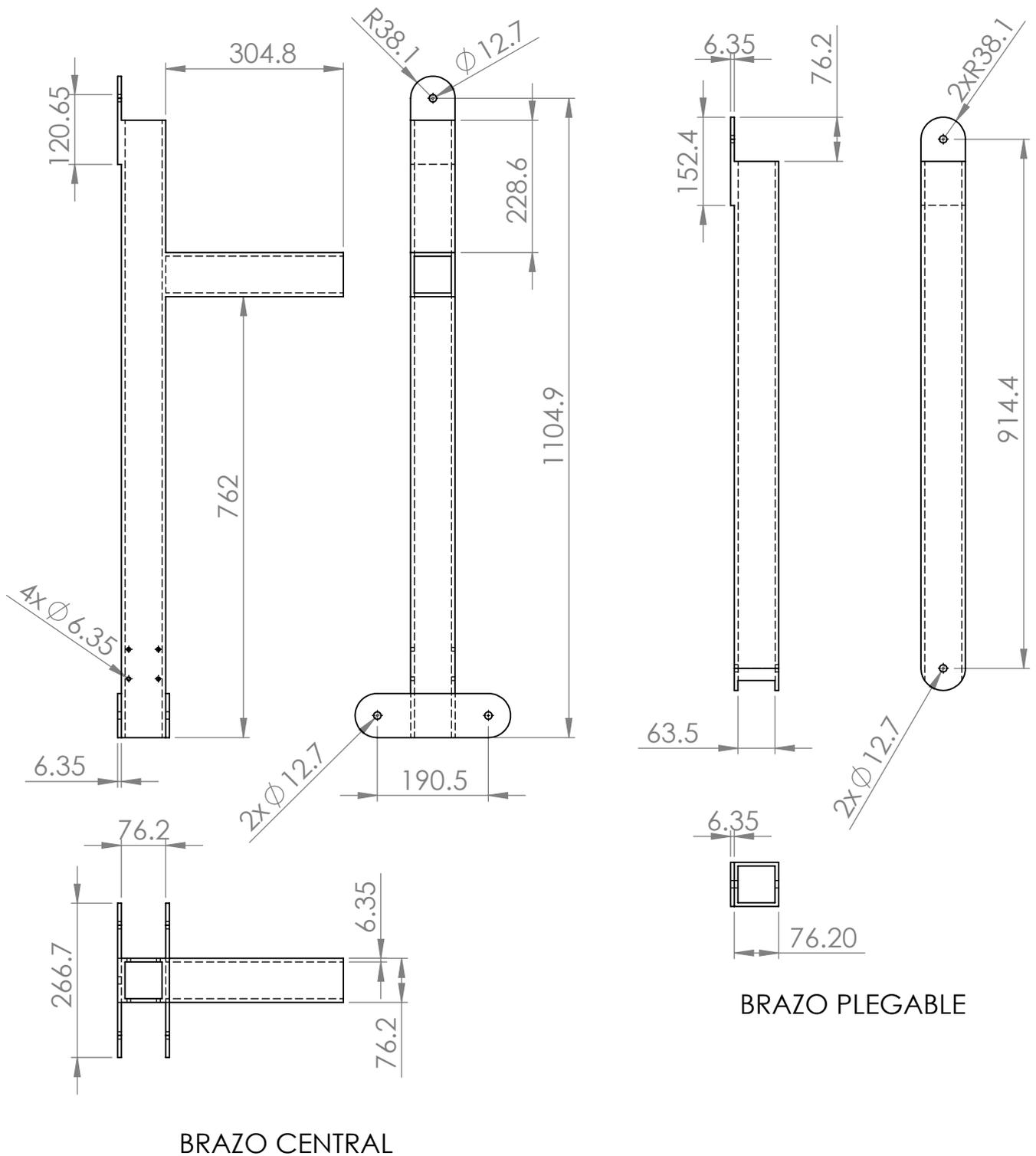
N.º DE ELEMENTOS	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BRAZO CENTRAL	AL 1060	1
2	BRAZO PLEGABLE	AL 1060	2
3	SOPORTES DE MÁSTIL	AL 1060	2
4	MÁSTIL	AL 1060	1
5	ARANDELA PLANA ESTRECHA	5 mm	8
6	ARANDELA	FW 0.5	6
7	TORNILLO 0.5000	20X4.25X1.25-N	3
8	TORNILLO DE MARIPOSA PESADO	0.5-13X4	1
9	TUERCA 0.5000	20-D-N	4
10	TORNILLO 0.2500	20X4X0.75-N	4
11	TUERCA 0.2500	20-D-N	4
12	ARANDELA PLANA	20 mm	1

Título	Proyecto Final de Graduación Lista de partes Lanzadera	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	20
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
				.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A		

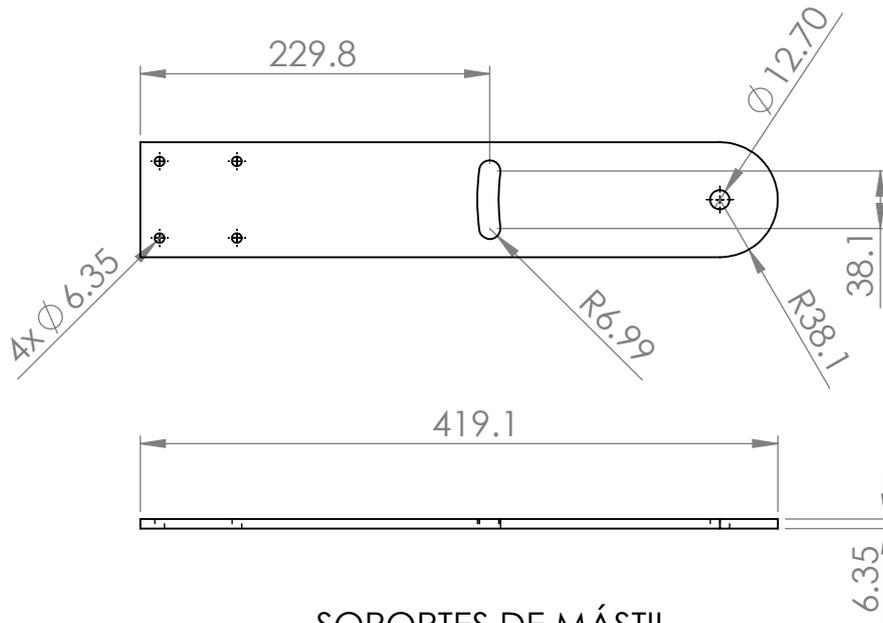


Título	Proyecto Final de Graduación Despiece de la Lanzadera	Escala	1:20	Acotación	mm	Página	21
		Autores		Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas		Fecha 4/24/2023	
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A			

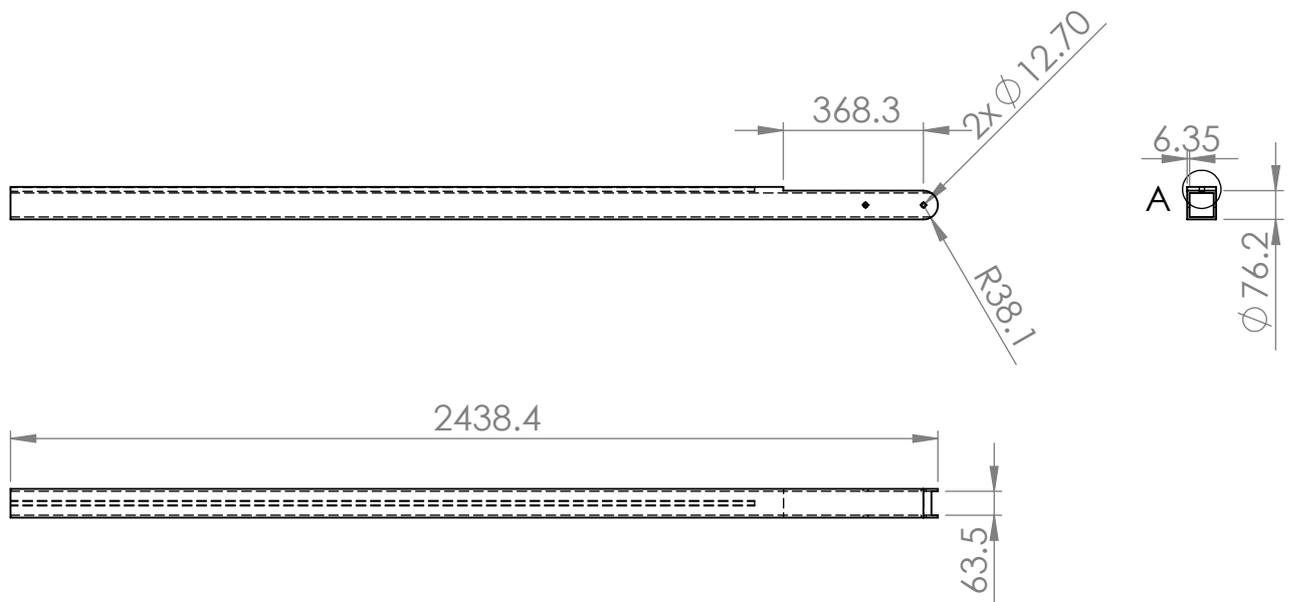
NOTA:
El espesor de pared de los perfiles es de 6.35 mm.



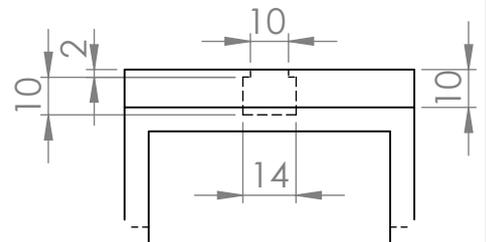
Título	Proyecto Final de Graduación Brazos de la lanzadera	Escala	1:10	Acotación	mm	Página	22
		Autores	Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión		
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A			



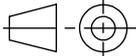
SOPORTES DE MÁSTIL
ESCALA 1:5



MÁSTIL
ESCALA 1:20



DETALLE A
ESCALA 1:2

Título	Proyecto Final de Graduación Mástil y Soportes	Escala Indicada	Acotación	mm	Página	23
		Autores Angely Selenia Dittel Meza Stephanie Rodríguez Vargas			Fecha	4/24/2023
Institución	Universidad de Costa Rica Escuela de Ingeniería Mecánica	Sistema	Tolerancias		Revisión	
			.x = ±0.1 .xx = ±0.02 .xxx = ±0.005	A		

Anexo A.2. Memoria de cálculo

Anexo A.2.1. Seguimiento de objetos

```
1  clc; clear;
2
3  video_entrada = VideoReader('C:\Users\Usuario\Downloads\vid
   -20221208-150443_Yklmo2Ln.mp4');
4  N = video_entrada.NumFrames;
5  t=(0:0.0345:2);
6
7  Cx=[];
8  Cy=[];
9
10 for i = 1:N
11  imagen = read(video_entrada,i);
12  C = deteccion_de_objetos(imagen);
13      if (~isempty(C))
14
15          C=round(C);
16          Cx = [Cx; C(:,1)];
17          Cy = [Cy; C(:,2)];
18
19      end
20 end
21
22
23 X=Cx;
24 Y=Cy;
25 %Eje vertical
26 X1=[];
27 Factor=49.02/73;
28 Op=[];
29 Ady=183; %mm
30 phi_r=[]; %rad
31 phi_d=[]; %grados
32 for i=1:N
33     X1(1,i)=(X(i)-705);
34     Op(1,i)=(X1(i)*Factor);
35     phi_r(1,i)=(atan(Op(1,i)/Ady));
36     phi_d(1,i)=(rad2deg(phi_r(1,i)));
37 end
38
39
40 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
41 %TFG
42 %Resolver ED s de la plataforma
43
44 %clear all
45 %clc
46 %t = (0:0.03:2);
```

```

47 condIni = [0.26;0];
48
49 %Datos Generales
50 L = 2.45; %[m] Largo de la lanzadera
51 Wc = (10/3)*9.8; % [N] Peso de la lanzadera+cohete
52 Fi = 1280/3; % [N] Fuerza de impulso del cohete
53 At= L*0.05; % [m] rea de la lanzadera perpendicular al
    viento
54 rhoaire = 1.2; % [kg/m3] Densidad del aire
55 v = 8.94; % [m/s] Velocidad del viento
56 Fv = At*rhoaire*v^2/2; % [N]Fuerza del viento
57 WL = 460.9; % [N] Peso del contrapeso
58 H = 0.087; % [m] Distancia del contrapeso respecto al pivote
59 mc=1; %[kg]
60 mt=3; %[kg]
61 mm=WL/9.8; %[kg]
62 dc=L/2;
63 dt=L/2;
64 dm=H;
65 mp=90; %[kg]
66 Rm=0.25;
67 Lc=1; % [m]
68 g=9.8; % [m/s^2]
69 Ip=10;
70
71 D = 0.16; %[m] Di metro externo del cohete
72 d = 0.15; %[m] Di metro interno del cohete
73 Ic = (mc*(3*((D/2)^2+Lc^2))/12) - (mc*(3*((d/2)^2+Lc^2))/12); %
    Inercia del cohete
74
75 c1= 0.05; %ancho externo
76 c2= 0.04; %ancho interno
77 a1= L; %largo
78 It = ((mt*(c1^2+a1^2))/12) - ((mt*(c2^2+a1^2))/12); % Inercia
    del tubo/lanzadera
79
80 a=0.4;
81 b=0.05;
82 Im = (mm*Rm^2)/4; % Inercia del contrapeso
83
84 Ia=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2)+(Ip);
85
86 [T,Y] = ode45(@resolverODEModeloDinamicoPlataforma ,t ,condIni)
    ;
87
88
89 theta=Y(:,1);
90 thetaPunto=Y(:,2);
91
92 %M s datos

```

```

93 rho=1000; %kg/m3 densidad del agua
94 %Delta=g*rho*V;
95 Masa=1.54; %[kg]
96 Delta=Masa*9.8; %[N]
97 G=0.001; %[m]
98 M=0.228; % [m]
99 GM=(M-G); %m
100 %Patr n de olas seg n datos IMARES
101 A=0.06; %m
102 T=1.90; %s
103 omega=2*pi*T; %rad/s
104
105 Ola=A*cos(omega*t);
106
107 %Momento escorante por las olas
108 Lambda=1.56*T^2; %aproximaci n
109 k2=2*pi/Lambda;
110 alphas=k2*A;
111
112 Me=Delta*GM*alphas*sin(omega*t);
113
114
115 %subplot(2,2,1)
116 %plot(t,rad2deg(theta),'--r','LineWidth',2);
117 % xlabel('Tiempo (s)',"FontSize",18)
118 % ylabel('\phi ( )',"FontSize",18)
119 % ax=gca;
120 % ax.FontSize = 20;
121 % yline(0,'LineStyle','--','Color','black')
122 % txt = {'\omega_n = 4,6 rad/s'};
123 % text(t(60),theta(1),txt,'FontSize',22);
124
125 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
126
127 %Y=video_entrada.Height - Y;
128 plot((t-0.3),phi_d,'-', 'LineWidth',2);
129
130 hold on
131 plot(t,rad2deg(theta),'--r','LineWidth',2);
132
133 axis([0 2 -10 18])
134 ylabel('\phi ( )',"FontSize",18);
135 xlabel("Tiempo (s)", "FontSize",18)
136 ax=gca;
137 ax.FontSize = 20;
138 yline(0,'LineStyle','--','Color','black')
139 %txt = '\bullet \leftarrow \phi(t)';
140 %text(t(23),phi_d(23),txt)
141 % txt = {'T = 0,5 s', '\omega_n = 7,0 rad/s', '\zeta = 0,43'};
142 % text(t(45),phi_d(1),txt,'FontSize',22);

```

```

143 %legend('\phi(t)=\phi_0e^{-\nu t}\{\cos(\omega_d t)+\nu/\
      \omega_d\sen(\omega_d t)\}')
144 %grid on
145
146
147 legend('Ensayo','Modelo');
148
149 hold off

```

Anexo A.2.2. Detección de objetos

```

1
2 function[centroides] = deteccion_de_objetos(im_entrada)
3
4 %im_entrada = imread("im.PNG");
5
6 imR = double(im_entrada(:,:,1));
7 imG = double(im_entrada(:,:,2));
8 imB = double(im_entrada(:,:,3));
9
10 [N,M,Z]=size(im_entrada);
11 Y=ones(N,M);
12
13 Tr1=185;
14 Tr2=240;
15 Tg1=170;
16 Tg2=230;
17 Tb1=8;
18 Tb2=48;
19
20 for i=1:N;
21     for j=1:M;
22         if(imR(i,j)>Tr1 && imR(i,j)<Tr2 && imG(i,j)>Tg1 &&
           imG(i,j)<Tg2 && imB(i,j)>Tb1 && imB(i,j)<Tb2)
23             Y(i,j)=1;
24         else
25             Y(i,j)=0;
26         end
27     end
28 end
29
30 %imshow(Y);
31
32 se = strel('square',10);
33 imagen_cerrada = imclose(Y,se);
34 %figure
35 %imshow(imagen_cerrada)
36
37 bw = bwareaopen(imagen_cerrada,30);
38 %

```

```

39 %figure
40 %imshow(bw)
41
42 s= regionprops(bw,'centroid');
43 centroides = cat(1,s.Centroid);
44
45 end

```

Anexo A.2.3. Estabilidad inicial

```

1 %TFG
2
3 clear all
4 clc
5
6 t = (0:0.01:10);
7 theta=(0:0.01:pi());
8
9 %Declaracion de variables
10 g=9.8; %m/s2 Aceleracion gravitacional
11 rho=1025; %[kg/m3] agua salada@15
12 Masa=488.46; % [kg] peso muerto
13 D=Masa; % [kg] Displacement=weight
14 V=D/rho; %[m3] Volumen de agua desplazada
15 a=0.7; %[m] Manga/Ancho de los flotadores
16 b=3.5; %[m] Eslora/Largo de la plataforma
17
18 IT=4.17; % [m4] Inercia de area del plano transversal Seg n
   solidworks
19 IL=(1/12)*(b^3)*a*2; % [m4] Inercia de area del plano
   longitudinal x2 cascos
20
21 BMt=IT/V; % [m] Brazo metacentrico transversal
22 BMl=IL/V; % [m] Brazo metacentrico longitudinal
23
24 KB=0.1; % [m] Distancia de la killa a B (h)
25 KG=0.52; % [m] Distancia de la killa a G (aprox)
26
27 GMt=BMt+KB-KG; % [m] Altura metacentrica
28 GMl=BMl+KB-KG; % [m] Altura metacentrica
29
30
31 GZt= GMt*sin(theta); % [m] Brazo de palanca
32 GZl= GMl*sin(theta); % [m] Brazo de palanca
33
34 MGZt=D*GZt; %[Nm] Momento restaurador
35 MGZl=D*GZl; %[Nm] Momento restaurador
36 I=732.46; %kgm2
37 Ia=I*0.2;
38

```

```

39 GMp=0.171; %m
40 Dp=1.54; %kg
41 Ip=0.01; %kgm2
42 Iap=0.2*Ip;
43 omegan1=sqrt(GMp*Dp/(Ip+Iap)); %frecuencia natural del
    prototipo
44 omegan2=sqrt(GMl*D/(I+Ia)); %frecuencia natural de la
    plataforma
45 wd=12;
46 v=3;
47 o=sqrt(wd^2+v^2);
48 %v=0.2*omegan2;
49 figure
50 subplot(2,2,1)
51 plot(theta,MGZt);
52 xlabel(' ngulo ')
53 ylabel('Momento restaurador transversal')
54 subplot(2,2,2)
55 plot(theta,MGZl);
56 xlabel(' ngulo ')
57 ylabel('Momento restaurador longitudinal')

```

Anexo A.2.4. Modelo Dinámico de la Plataforma

```

1
2 %TFG
3 %Resolver E D s de la plataforma
4
5 clear all
6 clc
7 t = (0:0.01:10);
8 condIni = [0.27;0];
9
10 %Datos Generales
11 L = 2.45; %[m] Largo de la lanzadera
12 Wc = (10/3)*9.8; % [N] Peso de la lanzadera+cohete
13 Fi = 1280/3; % [N] Fuerza de impulso del cohete
14 At= L*0.05; % [m] rea de la lanzadera perpendicular al
    viento
15 rhoaire = 1.2; % [kg/m3] Densidad del aire
16 v = 8.94; % [m/s] Velocidad del viento
17 Fv = At*rhoaire*v^2/2; % [N]Fuerza del viento
18 MFV=Fv*L;
19 WL = 460.9; % [N] Peso del contrapeso
20 H = 0.087; % [m] Distancia del contrapeso respecto al pivote
21 mc=1; %[kg]
22 mt=3; %[kg]
23 mm=WL/9.8; %[kg]
24 dc=L/2;
25 dt=L/2;

```

```

26 dm=H;
27 mp=90; %[kg]
28 Rm=0.25;
29 Lc=1; % [m]
30 Masa=488.68; %[kg]
31 %G=-0.21; %[m]
32 %M=2.23; % [m]
33 BM=10.46;
34 k=Masa*9.8*BM; %[Nm]
35 %B=496;
36 B=5268.76;
37 g=9.8; % [m/s^2]
38
39 Ip=732.46;
40
41 D = 0.16; %[m] Di metro externo del cohete
42 d = 0.15; %[m] Di metro interno del cohete
43 Ic = (mc*(3*((D/2)^2+Lc^2))/12)-(mc*(3*((d/2)^2+Lc^2))/12); %
    Inercia del cohete
44
45 c1= 0.05; %ancho externo
46 c2= 0.04; %ancho interno
47 a1= L; %largo
48 It = ((mt*(c1^2+a1^2))/12)-((mt*(c2^2+a1^2))/12); % Inercia
    del tubo/lanzadera
49
50 a=0.4;
51 b=0.05;
52 Im = (mm*Rm^2)/4; % Inercia del contrapeso
53
54 Ia=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2)+(Ip);
55
56 [T,Y] = ode45(@resolverODEModeloDinamicoPlataforma,t,condIni)
    ;
57
58
59
60 Delta=Masa*9.8; %[N]
61 A1=0.25; %m
62 A2=0.5; %m
63 A3=0.1; %m
64 A4=0.08; %m
65 T1=4; %s
66 T2=2.18;
67 T3=1.5;
68 T4=0.85;
69 omega1=2*pi/T1; %rad/s
70 omega2=2*pi/T2;
71 omega3=2*pi/T3;
72 omega4=2*pi/T4;

```

```

73 %omega=7.4;
74
75 O1a1=A2*cos(omega1*t);
76 O1a2=A2*cos(omega2*t);
77 O1a3=A2*cos(omega3*t);
78
79
80 %Momento escorante por las olas
81 Lambda1=1.56*T1^2; %aproximaci n
82 Lambda2=1.56*T2^2;
83 Lambda3=1.56*T3^2;
84 Lambda4=1.56*T4^2;
85 k1=2*pi/Lambda1;
86 k2=2*pi/Lambda2;
87 k3=2*pi/Lambda3;
88 k4=2*pi/Lambda4;
89 alphas1=k1*A1;
90 alphas2=k2*A2;
91 alphas3=k3*A3;
92 alphas4=k4*A4;
93
94 if (t<10)
95 Me=Delta*BM*alphas*sin(omega*t);
96 else
97     Me=0;
98 end
99
100 Me1=Delta*BM*alphas1*sin(omega1*t)
101 Me2=Delta*BM*alphas2*sin(omega2*t)
102 Me3=Delta*BM*alphas3*sin(omega3*t)
103 Me4=Delta*BM*alphas4*sin(omega4*t)
104
105 theta=Y(:,1);
106 thetaPunto=Y(:,2);
107
108 figure ()
109 plot(t,Me1,'--b','LineWidth',2);
110 hold on
111 plot(t,Me2,'-.k','LineWidth',2);
112 hold on
113 plot(t,Me3,'--r','LineWidth',2);
114 hold on
115 plot(t,Me4,'-g','LineWidth',1);
116 axis([0 5 -50000 50000])
117 ax=gca;
118 ax.FontSize = 20;
119 ylabel('Momento escorante (Nm)','FontSize',20);
120 xlabel("Tiempo (s)","FontSize",20)
121 legend('Oleaje promedio','Oleaje embarcaciones grandes','
    Oleaje corto','Resonancia')

```

```

122 grid on
123
124 figure ()
125 plot(t,0la1,'-','LineWidth',2);
126 hold on
127 plot(t,0la2,'-','LineWidth',2);
128 hold on
129 plot(t,0la3,'-','LineWidth',2);
130 axis([0 10 -1 1])
131 ax=gca;
132 ax.FontSize = 20;
133 ylabel('Amplitud (m)', "FontSize",20);
134 xlabel("Tiempo (s)", "FontSize",20)
135 grid on
136
137 figure ()
138 %subplot(2,2,1)
139 plot(t,rad2deg(theta),'LineWidth',2);
140 hold on
141 yline(0,'LineStyle','--','Color','black')
142 legend('\omega_n = 7,4 rad/s')
143 axis([0 2 -20 20])
144 ax=gca;
145 ax.FontSize = 20;
146 xlabel('Tiempo (s)', "FontSize",20)
147 ylabel('\phi ( )' , "FontSize",20)
148 %subplot(2,2,2)
149 %plot(t,thetaPunto);
150 %xlabel('Tiempo (s)')
151 %ylabel('Velocidad theta')
152
153 % alpha=Y(:,3);
154 % alphaPunto=Y(:,4);
155 % subplot(2,2,3)
156 % plot(t,alpha);
157 % xlabel('Tiempo (s)')
158 % ylabel('Desplazamiento alpha')
159 % subplot(2,2,4)
160 % plot(t,alphaPunto)
161 % xlabel('Tiempo (s)')
162 % ylabel('Velocidad alpha')
163 %
164 % saveas(gcf, 'imagen01', 'png')

```

```

1 function dxdt = resolverODEModeloDinamicoPlataforma(t,x)
2 %Datos Generales
3 L = 2.45; %[m] Largo de la lanzadera
4 Wc = (10/3)*9.8; %[N] Peso de la lanzadera+cohete
5 Fi = 1280/3; %[N] Fuerza de impulso del cohete
6 At= L*0.05; %[m2] rea de la lanzadera perpendicular al

```

```

    viento
7 rhoaire = 1.2; % [kg/m3] Densidad del aire
8 v = 8.94; % [m/s] Velocidad del viento
9 Fv = At*rhoaire*v^2/2; % [N] Fuerza del viento
10 %Fv=0;
11 WL = 460.9; % [N] Peso del contrapeso
12 H = 0.20; % [m] Distancia del contrapeso respecto al pivote
13 mc=1; %[kg]
14 mt=3; %[kg]
15 mm=WL/9.8; %[kg]
16 dc=L/2;
17 dt=L/2;
18 dm=H;
19 mp=90; %[kg]
20 Ipl=732.46; %[kgm2]
21 Ipt=757.20;
22 Ip=Ipl;
23 Rm=0.25;
24 Lc=1; % [m]
25 Masa=488.68; %[kg]
26 %G=-0.21; %[m]
27 %M=2.23; % [m]
28 BMl=10.5;
29 BMt=8.7;
30
31 BM=BMl;
32 %BM=10;
33 k=Masa*9.8*BM; %[Nm]
34 %B=496;
35
36 B1=5268.76;
37 Bt=5466.66;
38 B=B1;
39 g=9.8; % [m/s^2]
40
41 D = 0.16; %[m] Di metro externo del cohete
42 d = 0.15; %[m] Di metro interno del cohete
43
44 Ic = (mc*(3*((D/2)^2+Lc^2))/12) - (mc*(3*((d/2)^2+Lc^2))/12); %
    Inercia del cohete
45
46 c1= 0.05; %ancho externo
47 c2= 0.04; %ancho interno
48 a1= L; %largo
49 It = ((mt*(c1^2+a1^2))/12) - ((mt*(c2^2+a1^2))/12); % Inercia
    del tubo/lanzadera
50
51 a=0.4;
52 b=0.05;
53 Im = (mm*Rm^2)/4; % Inercia del contrapeso

```

```

54 IL=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2); % Inercia del
    p ndulo
55 %I=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2)+(Ip); %Inercia del
    p ndulo + plataforma
56 I=Ip;
57 Ia=0.20*I; %Inercia a adida por balance
58 if (t<0)
59     Fv=At*rhoaire*v^2/2;
60
61     else
62     Fv=0;
63
64 end
65
66 %Patr n de olas seg n datos IMARES
67
68 Delta=Masa*9.8; %[N]
69 A1=0.08; %m
70 A2=0.4; %m
71 A3=0.25; %m
72 T1=0.85; %s
73 T2=4;
74 T3=0.85;
75 omega1=2*pi/T1; %rad/s
76 omega2=2*pi/T2;
77 omega3=2*pi/T3;
78 %omega=7.4;
79
80 O1a1=A1*cos(omega1*t);
81 O1a2=A1*cos(omega2*t);
82 O1a3=A1*cos(omega3*t);
83 O1a4=A2*cos(omega1*t);
84 O1a5=A2*cos(omega2*t);
85 O1a6=A2*cos(omega3*t);
86 O1a7=A3*cos(omega1*t);
87 O1a8=A3*cos(omega2*t);
88 O1a9=A3*cos(omega3*t);
89
90 O1aReal=O1a1+O1a2+O1a3+O1a4+O1a5+O1a6+O1a7+O1a8+O1a9;
91
92
93
94 %Momento escorante por las olas
95 Lambda=1.56*T1^2; %aproximaci n
96 k2=2*pi/Lambda;
97 alpham=k2*A1;
98 if (t<0)
99 Me=Delta*BM*alpham*sin(omega1*t);
100 else
101     Me=0;

```

```

102 end
103
104
105 dxdt(1) = x(2);
106 dxdt(2) = (-k*x(1)-B*x(2)+Me+(Fv*L))/((I+Ia));
107 % dxdt(3)=x(4);
108 % dxdt(4) = (-x(3)*((-L*mt*g)/2+mm*g*H-L/2)+(Fv*L)/2)/(((L^2*
      mt)/4)+mm*H^2+IL);
109
110 dxdt=dxdt';
111
112 end

```

Anexo A.2.4. Modelo Dinámico del Prototipo

```

1 %TFG
2 %Resolver EDS de la plataforma
3
4 clear all
5 clc
6 t = (0:0.01:2);
7 condIni = [0.26;0];
8
9 %Datos Generales
10 L = 2.45; %[m] Largo de la lanzadera
11 Wc = (10/3)*9.8; %[N] Peso de la lanzadera+cohete
12 Fi = 1280/3; %[N] Fuerza de impulso del cohete
13 At= L*0.05; %[m] rea de la lanzadera perpendicular al
      viento
14 rhoaire = 1.2; %[kg/m3] Densidad del aire
15 v = 8.94; %[m/s] Velocidad del viento
16 Fv = At*rhoaire*v^2/2; %[N]Fuerza del viento
17 WL = 460.9; %[N] Peso del contrapeso
18 H = 0.087; %[m] Distancia del contrapeso respecto al pivote
19 mc=1; %[kg]
20 mt=3; %[kg]
21 mm=WL/9.8; %[kg]
22 dc=L/2;
23 dt=L/2;
24 dm=H;
25 mp=90; %[kg]
26 Rm=0.25;
27 Lc=1; %[m]
28 g=9.8; %[m/s^2]
29 Ip=10;
30
31 D = 0.16; %[m] Di metro externo del cohete
32 d = 0.15; %[m] Di metro interno del cohete
33 Ic = (mc*(3*((D/2)^2+Lc^2))/12)-(mc*(3*((d/2)^2+Lc^2))/12); %
      Inercia del cohete

```

```

34
35 c1= 0.05; %ancho externo
36 c2= 0.04; %ancho interno
37 a1= L; %largo
38 It = ((mt*(c1^2+a1^2))/12)-((mt*(c2^2+a1^2))/12); % Inercia
    del tubo/lanzadera
39
40 a=0.4;
41 b=0.05;
42 Im = (mm*Rm^2)/4; % Inercia del contrapeso
43
44 Ia=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2)+(Ip);
45
46 [T,Y] = ode45(@resolverODEModeloDinamicoPrototipo,t,condIni);
47
48
49 theta=Y(:,1);
50 thetaPunto=Y(:,2);
51
52 %M s datos
53 rho=1000; %kg/m3 densidad del agua
54 %Delta=g*rho*V;
55 Masa=1.54; %[kg]
56 Delta=Masa*9.8; %[N]
57 G=0.001; %[m]
58 M=0.228; % [m]
59 GM=(M-G); %m
60 %Patr n de olas seg n datos IMARES
61 A=0.06; %m
62 T=1.90; %s
63 omega=2*pi*T; %rad/s
64
65 Ola=A*cos(omega*t);
66
67 %Momento escorante por las olas
68 Lambda=1.56*T^2; %aproximaci n
69 k2=2*pi/Lambda;
70 alphas=k2*A;
71
72 Me=Delta*GM*alphas*sin(omega*t);
73
74
75 %subplot(2,2,1)
76 plot(t,rad2deg(theta),'-','LineWidth',2);
77 xlabel('Tiempo (s)','FontSize',18)
78 ylabel('\phi ( )','FontSize',18)
79 ax=gca;
80 ax.FontSize = 20;
81 yline(0,'LineStyle','--','Color','black')
82 txt = {'\omega_n = 4,6 rad/s'};

```

```

83 %text(t(150),,txt,'FontSize',22);
84 % subplot(2,2,2)
85 % plot(t,thetaPunto);
86 % xlabel('Tiempo (s)')
87 % ylabel('Velocidad theta')
88 % subplot(2,2,3)
89 % plot(t,Ola);
90 % xlabel('Tiempo (s)')
91 % ylabel('Ola (m)')
92 % subplot(2,2,4)
93 % plot(t,Me);
94 % xlabel('Tiempo (s)')
95 % ylabel('Momento escorante (Nm)')
96 % alpha=Y(:,3);
97 % alphaPunto=Y(:,4);
98 % subplot(2,2,3)
99 % plot(t,alpha);
100 % xlabel('Tiempo (s)')
101 % ylabel('Desplazamiento alpha')
102 % subplot(2,2,4)
103 % plot(t,alphaPunto)
104 % xlabel('Tiempo (s)')
105 % ylabel('Velocidad alpha')
106 %
107 % saveas(gcf, 'imagen01', 'png')

```

```

1 function dxdt = resolverODEModeloDinamicoPrototipo(t,x)
2 %Datos Generales
3 L = 2.45; %[m] Largo de la lanzadera
4 Wc = (10/3)*9.8; %[N] Peso de la lanzadera+cohete
5 Fi = 1280/3; %[N] Fuerza de impulso del cohete
6 At= L*0.05; %[m2] rea de la lanzadera perpendicular al
   viento
7 rhoaire = 1.2; %[kg/m3] Densidad del aire
8 v = 8.94; %[m/s] Velocidad del viento
9 Fv = At*rhoaire*v^2/2; %[N]Fuerza del viento
10 %Fv=0;
11 WL = 460.9; %[N] Peso del contrapeso
12 H = 0.20; %[m] Distancia del contrapeso respecto al pivote
13 mc=1; %[kg]
14 mt=3; %[kg]
15 mm=WL/9.8; %[kg]
16 dc=L/2;
17 dt=L/2;
18 dm=H;
19 mp=90; %[kg]
20 Ip=0.01; %[kgm2]
21 Rm=0.25;
22 Lc=1; %[m]
23 Masa=1.54; %[kg]

```

```

24 %G=0.001;%[m]
25 %M=0.228;% [m]
26 GM=0.171;%[m]
27 k=Masa*9.8*(GM); %[Nm]
28 %B=496;
29 B=0.07;
30 g=9.8; % [m/s^2]
31
32 D = 0.16; %[m] Di metro externo del cohete
33 d = 0.15; %[m] Di metro interno del cohete
34
35 Ic = (mc*(3*((D/2)^2+Lc^2))/12)-(mc*(3*((d/2)^2+Lc^2))/12); %
    Inercia del cohete
36
37 c1= 0.05; %ancho externo
38 c2= 0.04; %ancho interno
39 a1= L; %largo
40 It = ((mt*(c1^2+a1^2))/12)-((mt*(c2^2+a1^2))/12); % Inercia
    del tubo/lanzadera
41
42 a=0.4;
43 b=0.05;
44 %Im = (mm*Rm^2)/4; % Inercia del contrapeso
45 %IL=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2);% Inercia del
    p ndulo
46 %I=(Ic+mc*dc^2)+(It+mt*dt^2)+(Im+mm*dm^2)+(Ip); %Inercia del
    p ndulo + plataforma
47 I=0.01; %kgm2
48 Ia=0.20*I; %Inercia a adida por balance
49 % if (t<1)
50 %     Fv=At*rhoaire*v^2/2;
51 % else
52 %     Fv=0;
53 % end
54
55 %Momento generado por las olas
56 A=0.06;%m
57 T=1.90;%s
58 omega=2*pi*T;%rad/s
59
60 Ola=A*cos(omega*t);
61
62
63 %M s datos
64 rho=1000; %kg/m3 densidad del agua
65 %Delta=g*rho*V;
66 Delta=Masa*9.8;%[N]
67 %G=0.001;%[m]
68 %M=0.228;% [m]
69 %GM=(M-G); %m

```

```

70 %Patr n de olas seg n datos IMARES
71 A=0.06; %m
72 T=1.90; %s
73 omega=2*pi*T; %rad/s
74
75 Ola=A*cos(omega*t);
76
77 %Momento escorante por las olas
78 Lambda=1.56*T^2; %aproximaci n
79 k2=2*pi/Lambda;
80 alpham=k2*A;
81 if (t<0)
82 Me=Delta*GM*alpham*sin(omega*t);
83 else
84     Me=0;
85 end
86
87 dxdt(1) = x(2);
88 dxdt(2) = (-k*x(1)-B*x(2)+Me)/((I+Ia));
89 % dxdt(3)=x(4);
90 % dxdt(4) = (-x(3)*((-L*mt*g)/2+mm*g*H-L/2)+(Fv*L)/2)/(((L^2*
      mt)/4)+mm*H^2+IL);
91
92 dxdt=dxdt';
93
94 end

```