



**Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar**

TRABAJO FIN DE GRADO

*Proyecto de adaptación de una bicicleta de calle en una
hidrobicicleta propulsada con hélice*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Juan Carlos Santana Lorenzo

DIRECTORES: Antonio Eirís Barca

CURSO ACADÉMICO: 2015-2016

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Proyecto de adaptación de una bicicleta de calle en una
hidrobicicleta propulsada con hélice*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

Este trabajo consiste en el estudio y montaje de una estructura flotante, dirección y propulsión para adaptar una bicicleta genérica para poder conseguir navegar. Para ello se han realizado una variedad de estudios. Un estudio acerca de la selección de los materiales más adecuados al entorno marino, un estudio estructural para asegurar la integridad de la estructura, un estudio de la transmisión de la potencia de pedaleo a la hélice, un estudio de dimensionamiento del timón necesario para maniobrar correctamente y un estudio de estabilidad para asegurar la flotabilidad y el adrizado. Finalmente se han realizado los ensayos con el prototipo tanto en laboratorio como en distintos tipos de entornos acuáticos con el de optimizar la propulsión y el asiento de la hidrobicicleta propuesta.

PALABRAS CLAVE

Bicicleta, hélice, transmisión, embarcación, estabilidad

AGRADECIMIENTOS

A Raquel Inchaurreaga, porque gracias a ella las ecuaciones no parecían tan difíciles.

A mi tío Jose, por enseñarme el arte de hacer bien las cosas.

A mi compañera de viaje, MariaPi, por hacer que todo fuese más fácil.

Al grupo 5, por todos estos años.

Y a mi tutor, Don Antonio, por ser capaz de mantener alto el ánimo pese a las complicaciones que nos hemos encontrado.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos.....	6
1.1 Deporte en entornos acuáticos.....	6
1.1.1 Importancia del deporte	6
1.1.2 Actividades acuáticas recreativas	6
1.1.3 El remo deportivo	7
1.2 Necesidad del deporte en la armada	7
1.3 Objetivos del TFG	8
2 Estado del arte	9
2.1 Embarcaciones propulsadas por esfuerzo humano	9
2.1.1 Remo.....	9
2.1.2 Manivelas compuestas	10
2.1.3 Hidropedal.....	10
2.2 Conceptos básicos de estabilidad.	11
2.3 Hidrobicicleta	13
2.3.1 Introducción a la Bicicleta	13
2.3.2 Akwakat	15
2.3.3 Shuttle-Bike.....	16
2.3.4 S1 Water Bike (SCHILLER)	17
3 Diseño de la hidrobicicleta.....	18
3.1 Estructura flotante.....	18
3.1.1 Cálculos de diseño principales de los pontones	18
3.1.2 Elección del material	20
3.1.3 Diseño y selección del mecanismo de anclaje	22
3.2 Diseño de la dirección y transmisión.....	27
3.2.1 Diseño del timón	27
3.2.2 Selección del tipo de transmisión	28
3.2.3 Acoplamiento de la hélice.....	34
3.3 Cálculo de estabilidad	35
3.3.1 Estabilidad transversal	35
3.3.2 Estabilidad longitudinal	39
3.3.3 Embarque de pesos	41

4 Pruebas de mar	44
4.1 Ensayo de propulsión.....	44
4.1.1 Ensayo en banco de pruebas	44
4.1.2 Ensayo en la piscina	47
4.2 Practicas en la ría.....	48
5 Conclusiones y líneas futuras	49
5.1 Conclusiones	49
5.2 Líneas futuras	51
6 Bibliografía.....	53
Anexo I: Diseño en Siemens NX 10.0.....	55
Anexo II: Montaje de la hidrobicicleta	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Clasificación de las Actividades Acuáticas Recreativas ([1])	7
Figura 1-2 Escudo del consejo superior de educación física y deportes de las FAS (Ministerio de defensa)	8
Figura 2-1 Embarcaciones primitivas (http://www.histarmar.com.ar).....	9
Figura 2-2 Manivelas compuestas (Anonymous of hussites wars)	10
Figura 2-3 Hidropedal (D'economia Blog).....	10
Figura 2-4 Obra viva y obra muerta (Nautica Jonkepa blog).....	11
Figura 2-5 Dimensiones básicas de un bote (Nautica Jonkepa blog)	11
Figura 2-6 Estabilidad transversal ([5]).....	12
Figura 2-7 Ventajas de los medios de transporte ([6])	13
Figura 2-8 Partes de una bicicleta (www.todomountainbike.es)	14
Figura 2-9 Modelo Akwakat ([7])	15
Figura 2-10 Modelo Shuttle Bike ([8])	16
Figura 2-11 Modelo Schiller S1([9]).....	17
Figura 3-1 Dimensiones básicas de diseño.	19
Figura 3-2 Abrazadera de proa.....	23
Figura 3-3 base tubular de la estructura.....	24
Figura 3-4 Barra bi-apoyada.	25
Figura 3-5 Diagramas cortarte y flector.....	26
Figura 3-6 Dimensiones básicas del timón.	28
Figura 3-7 transmisión por cadena y engranajes ([7]).....	28
Figura 3-8 Partes de una cadena [15].	29
Figura 3-9 Partes de los rodillos de fricción [15].....	31
Figura 3-10 Relación potencia-velocidad en llano (Línea azul) [[18]].	33
Figura 3-11 Dimensionamiento del cable flexible.	34
Figura 3-12 Cálculo de la línea de flotación.	36
Figura 3-13 Calculo del calado.	37
Figura 3-14 Área de flotación.	38
Figura 3-15 Esquema estabilidad longitudinal [5]	40
Figura 3-16 Posición del centro de gravedad.	41
Figura 3-17 triangulo G_1MG_2 [5]	42
Figura 4-1 Banco de pruebas.....	45
Figura 4-2 Acople flexible	45
Figura 4-3 Acople flexible deformado	46

Figura 4-4 Acople fijo.....46
Figura 4-5 Ensamblaje final.....47
Figura 4-6 Ensayo con peso en rosca48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Condiciones de carga de diseño.....	19
Tabla 3-2 comparativa de precios de las fibras	21
Tabla 3-3 comparativa de materiales.....	22
Tabla 3-4 Características del Aluminio	24
Tabla 3-5 Valores de los esfuerzos de los tubos	26
Tabla 3-6 Velocidad (rpm) de la rueda trasera para una cadencia de 75 rpm.....	30
Tabla 3-7 Relación de parametros de un arbol flexible [16].....	33
Tabla 3-8 Momento máximo recomendado para diferentes R_b [16]	33
Tabla 3-9 Tabla de pesos de los elementos de la estructura	35
Tabla 3-10 Datos básicos para el desarrollo de los cálculos	35
Tabla 3-11 Condiciones de carga finales.....	36
Tabla 3-12 Datos finales de estabilidad transversal	38
Tabla 3-13 Datos finales de estabilidad transversal	40
Tabla 3-14 Datos finales de escora y par de adrizamiento	43
Tabla 4-1 Lista de materiales utilizados	44
Tabla 5-1 Tabla comparativa de objetivos conseguidos y no conseguidos	50
Tabla 5-2 Tabla de precios de los elementos de la estructura.....	51

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Deporte en entornos acuáticos.

1.1.1 Importancia del deporte

El deporte es una actividad física que provoca que el cuerpo deje de estar en estado de reposo para entrar en funcionamiento. Con el deporte conseguimos dos claros objetivos: por un lado mejorar físicamente y por otro liberar tensiones y divertirse.

La práctica del deporte nos lleva a conseguir una serie de beneficios:

- **Mejora de la salud física:** con la práctica de algún tipo de deporte conseguimos prevenir gran parte de las enfermedades cardiovasculares así como varios tipos de cáncer, nos ayuda también a controlar nuestro peso corporal consiguiendo reducir grasas y conseguimos mejorar nuestra resistencia a la fatiga así como mejorar el sueño.
- **Mejora de la salud mental:** practicar deporte hace que se reduzcan los niveles de estrés y suele ser un buen tratamiento contra la depresión o la ansiedad. El deporte a través del esfuerzo hace que liberemos endorfinas que son las conocidas como “Hormonas de la felicidad”
- **Aporta buenos hábitos:** Una buena educación física desde jóvenes provoca que los hábitos a los que se va acostumbrando el individuo sean más saludables al huir del consumo de drogas o alcohol para poder realizar sus ejercicios correctamente. Además los deportes en equipo fomentan las relaciones personales tanto con los miembros de un equipo como con los del resto (competitividad sana).

1.1.2 Actividades acuáticas recreativas

Actualmente, la demanda social deportiva ha aumentado provocando que la oferta de deportes y actividades deportivas a desarrollar sea mayor y se necesiten lugares más amplios para la realización de los mismos. Las razones de esta demanda son

- **Sociedad de consumo:** se busca rentabilizar ciertas actividades, lo que conlleva a la creación de actividades diferentes a las existentes con el propósito de hacerse un hueco en el mercado.

- **Diferenciación social:** Existen diferentes tipos de deportes que, aun no estando vetada su práctica a ninguna persona en particular, están dedicados o al alcance de ciertos sectores de la sociedad.
- **Aumento de las nuevas tecnologías**
- **Apoyo institucional:** actualmente la sociedad está concienciada con que el deporte es importante, y por ellos las instituciones ponen más infraestructuras para poder llevar a cabo un gran numero de actividades recreativas para todos los ciudadanos.

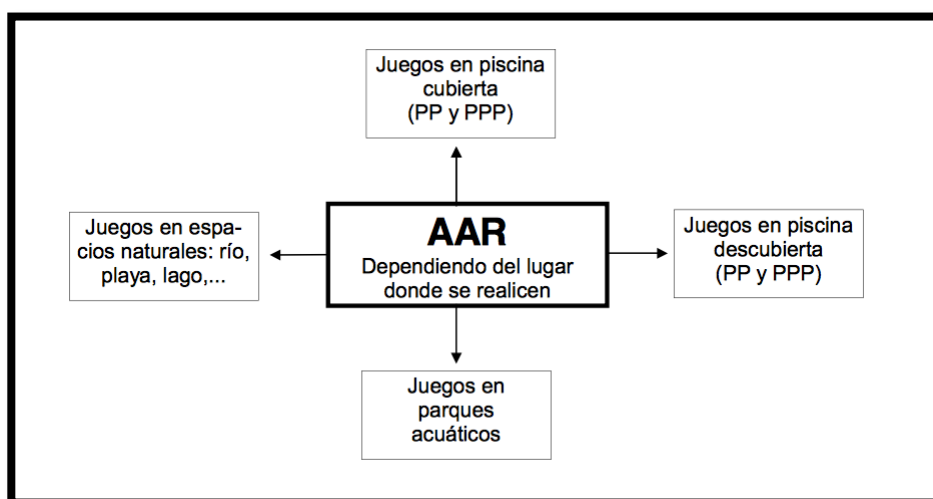


Figura 1-1 Clasificación de las Actividades Acuáticas Recreativas ([1])

Hay que resaltar la dificultad de realizar este tipo de actividades en espacios naturales debido a sus específicas condiciones. En el mar dependemos del oleaje, del viento y de la corriente lo que provocará que ciertos deportes no puedan realizarse en todas las ocasiones. Sin embargo en el rio dependeremos más de la profundidad, que varía con la época del año, así como de la corriente.

1.1.3 El remo deportivo

El remo deportivo, que tiene su origen en Inglaterra durante el siglo XVII, consiste en propulsar una embarcación mediante la propia fuerza de los brazos a través del uso de remos. En este tipo de deporte el competidor se sitúa de espaldas a la dirección del movimiento. Existen diferentes modalidades en función de la posición del remero respecto a la embarcación: Banco móvil o banco fijo.

1.2 Necesidad del deporte en la armada

Uno de los pilares básicos para la enseñanza y la formación continua de un militar es la presencia de la actividad física como parte de su vida militar, y es por ello por lo que en todas las bases e instalaciones se fomenta ese tipo de actividades, sobre todo en las academias militares. La necesidad del deporte en nuestra institución está escrito en las reales ordenanzas, artículo 25 donde “*el militar mantendrá [...] una adecuada preparación física que le capacite para ser eficaz en su trabajo dentro de las fuerzas armadas*” [2]. La función principal que tienen las actividades deportivas en la Armada es de complemento a la instrucción básica del militar así como de desarrollo para capacitar al militar a sus fines operativos. Estos fines operativos pueden clasificarse en dos. Primero desde el punto de vista de la supervivencia tanto personal como de la gente que les rodea y por otro lado tenemos la de la

mejora del servicio que un militar puede ofrecer a su desarrollo profesional. Esta mejora del servicio se consigue gracias a tener un estado de salud idóneo y a través de la adquisición de unos valores indispensables en el militar como el espíritu de sacrificio, el afán de superación, la disciplina o el compañerismo. Por ello, es indispensable la practica de actividades deportivas sobre todo en la etapa de formación del militar, en las academias y escuelas, donde realmente se establecen las bases de los valores militares en cada una de las personas que forman las fuerzas armadas.



Figura 1-2 Escudo del consejo superior de educación física y deportes de las FAS (Ministerio de defensa)

1.3 Objetivos del TFG

En este trabajo se ha marcado como objetivo principal el estudio de la adaptación de una bicicleta en una hidrobicicleta. El enfoque hace uso de las tres herramientas de desarrollo tecnológico disponibles ya que se aborda de forma teórica, se hace uso de recursos computacionales de simulación en el software Siemens NX y se lleva a cabo la construcción de un prototipo. La idea es servir de alternativa a otros modelos de hidrobicicletas ya existentes y que se pueda construir esta bicicleta y extraer aprendizajes del propio proceso de desarrollo. La ideas principales son:

- Conseguir una estructura y transmisión para la bicicleta que sea fácil de transportar. Para ello debe ser desmontable y ligera. La intención es poder realizar trayectos en la bicicleta por tierra y, tras una pequeña pausa de montaje, poder seguir el trayecto por mar.
- Selección de los materiales en función de su peso y facilidad de anclaje, además de los tamaños necesarios para su fácil manejo y transporte.

En este TFG se abordan temas relacionados con diferentes asignaturas de la carrera como el estudio de materiales, el análisis de estructuras y fuerzas, diseño de transmisiones, calculo de estabilidad y diseño CAD.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Embarcaciones propulsadas por esfuerzo humano

2.1.1 Remo

El remo [3] es el mejor ejemplo de embarcación propulsada manualmente por el hombre. Es conocido que el primer viaje a través del agua fue mediante un tronco. Con el paso del tiempo la técnica se fue perfeccionando creándose las primeras balsas mediante numerosos troncos o modificando el propio tronco para crear lo que ahora se conoce como una canoa o piragua. Este tipo de embarcaciones comenzaron a propulsarse mediante el uso de manos y pies, sin ayuda de ningún tipo de artilugio externo, y después paso a propulsarse a través de otra tabla que servía de remo para impulsar el artesanal bote o incluso como ancla para clavarse en el fondo de aguas pocas profundas con la finalidad de mantenerse en el sitio. Al igual que como se hacían las primeras balsas, comenzaron a construirse núcleos de varias canoas lo que favorecía la navegación dotando a la embarcación de una mayor estabilidad al conseguir subir el metacentro de la embarcación (Se hablará más adelante sobre este tema en el estudio de estabilidad de la hidrobicicleta).

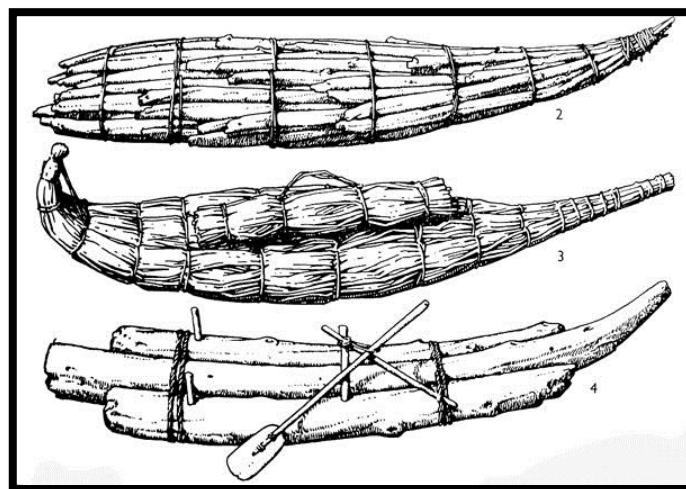


Figura 2-1 Embarcaciones primitivas (<http://www.histarmar.com.ar>)

Con el avance de la tecnología y el paso del tiempo empezaron a formarse embarcaciones de una sola pieza donde optaban por un mayor calado y resistencia en la estructura como las famosas galeras, donde al principio la propulsión del buque no era más que cientos de hombres coordinados remando. El siguiente paso fueron los barcos multirremos romanos o la liburna (que contaba con un espolón para embestir otros buques) y empezaron a incorporar la vela cuadra para ayudar a la propulsión.

2.1.2 Manivelas compuestas

Este tipo de embarcaciones utilizan la fuerza producida por los brazos del hombre para impulsarse, como lo hace el remo, pero la propulsión es diferente ya que no se usa el remo si no que se usan unas ruedas de paletas que se accionan a través de una o varias manivelas. Fueron inventados por el médico italiano Guido de Vigevano. El diseño original constaban de un par de ruedas de paletas en cada extremo, esto requería que hiciese falta más de una persona para llevar el conjunto de la embarcación (Figura 2-2). Sin embargo fue modificado posteriormente por Roberto Valturio que llegó a diseñar un barco con cinco juegos de ruedas donde se unían cada una de las bielas a otra que se encargaba de proporcionar la energía a las demás, pudiendo así llevarse en solitario.

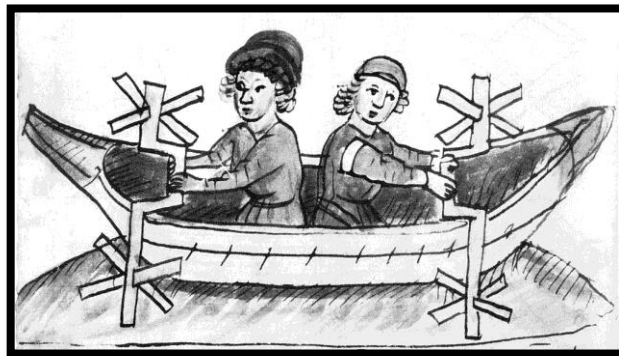


Figura 2-2 Manivelas compuestas (Anonymous of hussites wars)

2.1.3 Hidropedal

Se conoce como hidropedal a una embarcación cuyo método de propulsión es a través de una rueda de paletas accionada mediante la fuerza de las piernas. Son embarcaciones dedicadas al ocio y constan de una estructura flotante formada por dos flotadores o tubos. Dentro de la embarcación se encuentran los pedales y el timón para que los ocupantes puedan dirigir la embarcación. La primera embarcación conocida de este estilo se encuentra en los diseños de Leonardo Da Vinci [4] donde se puede ver una balsa impulsada por dos pedales. Sin embargo el hidropedal fue patentado por Ramón Barea en el año 1893.



Figura 2-3 Hidropedal (D'economia Blog)

2.2 Conceptos básicos de estabilidad.

En este apartado vamos a definir una serie de conceptos básicos del buque, flotabilidad y estabilidad para posterior comprensión del trabajo [5].

- **Carena:** Se conoce como carena a la parte sumergida del barco y el volumen que ocupa. A la parte del casco que forma la carena se le llama obra viva.
- **Plano de flotación:** es aquel que delimita la parte superior de la carena y nos indica el calado del buque en una determinada condición de carga. A la línea que separa la obra viva de la obra muerta (Parte seca y estanca del casco) se le denomina línea de flotación.



Figura 2-4 Obra viva y obra muerta (Nautica Jonkepa blog)

- **Cuaderna maestra (CM):** es la sección transversal de área máxima.
- **Línea de crujía (LC) :** es aquella que divide al buque en dos partes simétricas en sentido longitudinal.
- **Eslora (L):** la longitud del buque. Hay varios tipos de eslora dependiendo de donde se mida. En nuestro proyecto simplemente usaremos la eslora entre perpendiculares (que será igual a la total y a la de flotación al tratarse de un cilindro)
- **Manga:** la anchura del buque.
- **Puntal:** Es la distancia entre el plano de la quilla y la cubierta superior estanca.
- **Calado (C):** Es la distancia de la quilla a la línea de flotación.

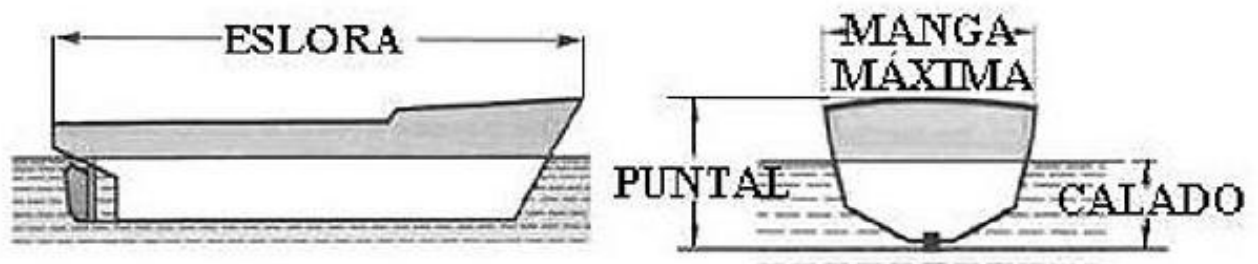


Figura 2-5 Dimensiones básicas de un bote (Nautica Jonkepa blog)

- **Principio de Arquímedes:** es el teorema más importante para la construcción de embarcaciones. “Todo cuerpo sumergido en un líquido en reposo experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen de líquido que desaloja”. Esta fuerza de empuje es la denominada flotabilidad.
- **Desplazamiento (W):** Es el peso del volumen de líquido desplazado.
- **Centro de carena (B):** Es el centro geométrico del volumen de carena y es el lugar donde se ejerce la fuerza de empuje del agua desalojada.
- **Centro de gravedad (G):** Es el punto donde se aplica el peso de la embarcación. Se encuentra normalmente en crujía y la posición depende de la distribución de pesos abordo.
- **Estabilidad:** Podemos definir la estabilidad como la tendencia que tiene un buque a recuperar la posición de equilibrio. Esta posición se consigue cuando el centro de carena y el centro de gravedad están en la misma vertical.
- **Momento de adrizamiento:** Al escorar el buque la posición del centro de carena varía al ser diferente el volumen de carena y esto provoca que el centro de gravedad y el de carena no estén alineados por lo que el propio buque para recuperar el equilibrio crea un par de fuerzas denominadas par de adrizamiento que provocará que el buque recupere su posición. Al módulo del par de adrizamiento se le llama brazo de adrizamiento (GZ) que crea un momento de adrizamiento ($M_{to_{ad}} = W \cdot GZ$)
- **Metacentro (M):** Es el centro de curvatura del lugar geométrico de los centros de carena para escoras próximas. Con la escora, el centro de carena realiza una trayectoria elíptica, por lo tanto podemos ver que el metacentro varía para cada inclinación dando lugar a lo que se conoce como evoluta metacéntrica. Para pequeñas escoras el metacentro se puede considerar en crujía y en una posición fija en la intersección entre las líneas de peso y empuje.
- **Radio metacéntrico (BM):** Es la distancia del centro de carena al metacentro
- **Altura metacéntrica (GM):** Es la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro. Este dato es muy importante ya que va a determinar si una estructura es estable o no según tenga valor positivo o negativo.

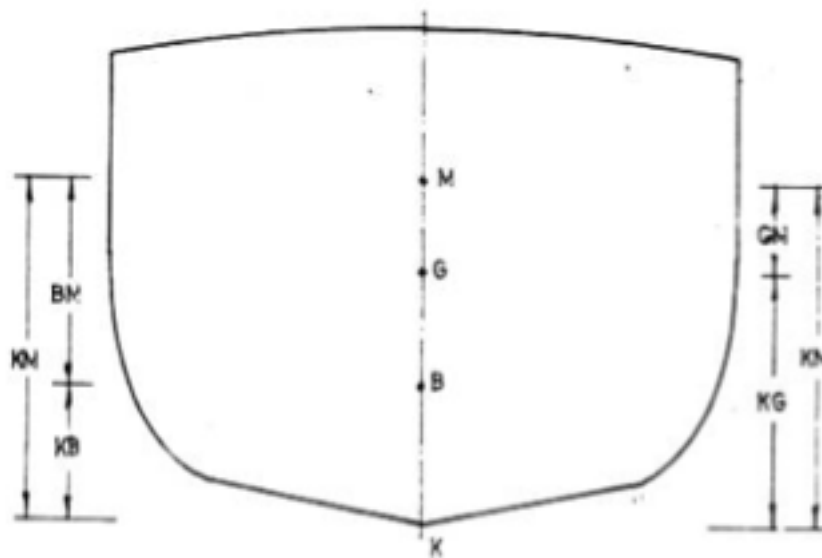


Figura 2-6 Estabilidad transversal ([5])

- **Reserva de flotabilidad:** Es el volumen de la estructura estanca del buque por encima de la línea de flotación, es decir, el volumen de la obra muerta. Con esta medida lo que conseguimos es conocer cuanto puede aumentar su desplazamiento la embarcación para que siga flotando. Suele expresarse en un porcentaje del cociente del volumen de la obra muerta entre la obra viva. Otra forma de conseguir esta información es dando la distancia vertical desde el plano de flotación hasta la cubierta superior estanca (Francobordo).
- **Condición de carga:** indican los distintos desplazamientos del buque para poder realizar los estudios de estabilidad.
- **Asiento:** Diferencia de calados a proa y popa
- **Centro de flotación:** Punto por el que pasa el eje transversal de giro o eje de asiento del buque. Es el centro de gravedad del plano de flotación

2.3 Hidrobicicleta

2.3.1 Introducción a la Bicicleta

La bicicleta es considerada como una de las máquinas más eficientes que existen. Consiguen además satisfacer las necesidades medioambientales, de sostenibilidad y de salud. Para entender bien el funcionamiento de la misma hay que conocer las fuerzas que actúan sobre ella [6].

- **Gravedad:** es la fuerza que provoca que la bicicleta se mantenga sujeta al suelo.
- **Resistencia del aire:** oposición que ejerce el aire sobre el individuo.
- **Fricción:** producida por todos los elementos de transmisión de la bicicleta.
- **Resistencia al avance:** es la producida por el medio en el que se mueve la bici. En el caso de una bicicleta normal estaría referido a la resistencia del suelo que se opone al avance, mientras que en nuestro caso se refiere a la fuerza que ejerce el agua sobre la estructura y la freno.

Respecto a su nivel de contaminación, los niveles de contaminación que genera su construcción y uso respecto a cualquier otro tipo de medio de transporte es mínimo, y si eso lo juntamos a que no existen atascos, su facilidad para aparcar o el espacio y coste de mantenimiento, conseguimos que sea el medio de transporte más rentable de los que existen (Figura 2-7).

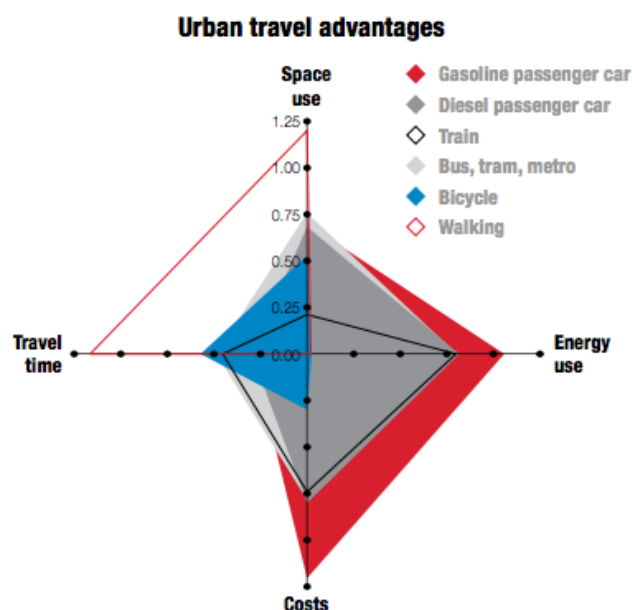


Figura 2-7 Ventajas de los medios de transporte ([6])

Para entender mejor el funcionamiento de la bicicleta y los cambios que vamos a realizar se expondrá a continuación una breve descripción de las partes que la componen (Figura 2-8) y que se consideran importante para poder adaptarla a la navegación



Figura 2-8 Partes de una bicicleta (www.todomountainbike.es)

- **El cuadro:** el cuadro es el esqueleto de la bicicleta, a través de éste irán engarzados el resto de componentes necesarios para transmitir el movimiento. Es, además, el que soporta el peso
- **Las ruedas:** se encuentra una situada en la parte delantera y otra en la parte trasera. Están formadas por una llanta que va unida mediante los radios al buje de la rueda. El buje se encargará de servir de eje para que la rueda pueda girar sobre él. Sobre la llanta tenemos el neumático.
- **El tren delantero:** está formado por varios componentes en el que destaca el tubo de dirección cuya función es poder dirigir la bicicleta cambiando la dirección de la trayectoria. Este tubo va unido a la horquilla que a su vez se conecta con la rueda y hace fijo el conjunto
- **El pedalier:** se trata de la transmisión de la potencia. Es el conjunto que forman los pedales, los platos del pedalier y su eje. Engloba también la cadena de transmisión que se va a encargar de transmitir el par a los piñones y esto provocará el giro de la rueda trasera de la bicicleta.

2.3.2 Akwakat



Figura 2-9 Modelo Akwakat ([7])

Akwakat [7] es la empresa de hidrobicicletas más conocida. Este modelo se basa en la utilización de una bicicleta de calle (Estilo mountain bike) y que, tras unas modificaciones que se realizan en el momento de meterse en el agua, se convierte en una hidrobicicleta. El kit incluye dos pontones de 3 metros de longitud con formas hidrodinámicas fabricados con resina de PVC, la transmisión y hélice, un kit de reparación, las herramientas necesarias para el montaje y el sistema de anclaje, que se realiza mediante una serie de tubos que sujetan la bicicleta aprovechando la horquilla de la rueda trasera y el cuadro propio de la bicicleta y finalmente se fija a los pontones mediante velcro. Este tipo de bicicleta no contempla la presencia de las ruedas durante la navegación, por lo que es necesario desmontarlas antes de fijar la bicicleta a la estructura flotante. Para transmitir la potencia a la hélice se usa una transmisión mediante engranajes y cadena. La transmisión se realiza mediante una cadena que une el pedalier con un árbol (previamente hay que soltar la cadena principal de la bicicleta) que consta de un engranaje cónico para cambiar la dirección de la potencia. El timón se coloca en lugar de la rueda delantera, en la horquilla de proa, por lo que se maniobra la embarcación desde el propio manillar de la bicicleta, mientras que la potencia se sitúa en la popa. Este modelo cuesta 2.125 euros sin contar con la bicicleta. El peso total de la estructura es de 15 kg y consigue unas velocidades de entre 4 y 8 nudos. El montaje se realiza en unos 10 minutos.

2.3.3 Shuttle-Bike



Figura 2-10 Modelo Shuttle Bike ([8])

Este tipo de modelo [8] se basa en la utilización de la bicicleta de calle en su totalidad, es decir, no hace falta manipular ningún elemento propio de la bicicleta. Los dos pontones son de resina de PVC sin embargo no tiene la forma hidrodinámica que tienen los otros tipos de hidrobicicletas. Los pontones están anclados a la estructura mediante un tubo curvado que abraza el pontón al inflarse. La bicicleta se fija a la estructura mediante unos anclajes que se fijan en el buque de la rueda trasera y en el cuadro de la bicicleta. La transmisión de potencia a la hélice se realiza en este caso mediante transmisión flexible (se explicará más adelante) producida por el rozamiento de la rueda trasera sobre un rodillo. Este prototipo de hidrobicicleta carece de timón ya que con la transmisión flexible llevamos la potencia a la rueda delantera, donde fijamos la hélice, y con el propio manillar se mueve la hélice consiguiendo así cambiar la trayectoria.

Este modelo cuesta 1.500€ sin incluir la bicicleta. El peso total de la estructura es de 12,5 kilogramos y consigue unas velocidades de 3,5 nudos. El montaje se realiza en aproximadamente 10 minutos sin necesidad de utilizar herramientas. Está dotado además de una bomba para inflar los pontones pedaleando usando la misma transmisión flexible que da potencia a la hélice.

2.3.4 S1 Water Bike (SCHILLER)

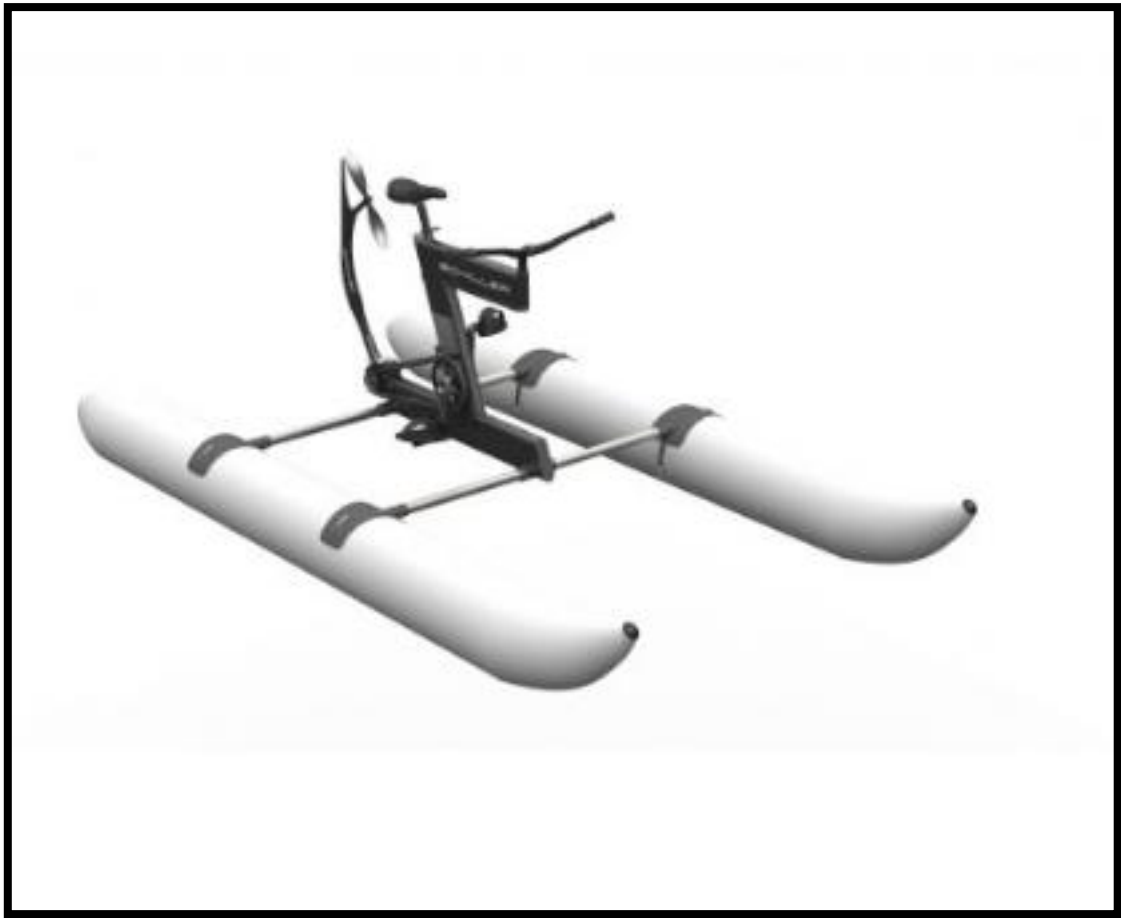


Figura 2-11 Modelo Schiller S1([9])

El modelo Schiller S1 [9] es un modelo de hidrobicicleta en la que no se parte de una bicicleta de montaña convencional, si no que su aspecto es más parecido a una bicicleta estática. Por este motivo no es posible su uso híbrido en tierra y mar como era el caso de las anteriores bicicletas. Los dos pontones están fabricados de resina de PVC con formas hidrodinámicas y el anclaje de los pontones se realiza mediante velcro. Los tubos transversales se fijan al cuerpo de la bicicleta por su base. La transmisión de potencia se realiza mediante cadena y engranajes, que llevan la potencia de pedaleo a la hélice anclada en la popa de la embarcación. Para gobernar la embarcación tiene un complejo sistema por dentro de la estructura que mueve la hélice sobre su eje para obtener las caídas a ambas bandas.

Cuesta el modelo entero 3.300€. El peso total de la embarcación es de 40 kilogramos y alcanza velocidades de más de 6 nudos. El montaje se sitúa sobre unos 10 minutos de tiempo y cabe destacar que el material de la bicicleta es resistente de la corrosión en entornos marinos.

3 DISEÑO DE LA HIDROBICICLETA

3.1 Estructura flotante

En este apartado vamos a comenzar con el estudio y cálculo de la estructura flotante dando diversas opciones de materiales para llevarlo a cabo.

3.1.1 Cálculos de diseño principales de los pontones

En primer lugar vamos a hacer unos cálculos previos para el diseño de nuestra estructura que después modificaremos según los requerimientos de los materiales.

Primero dimensionaremos la estructura basándonos en la hidrobicicleta tipo SHUTTLE-BIKE donde colocaremos dos flotadores unidos por unos tubos transversales.

Para dimensionar los flotadores utilizaremos unas medidas que aseguren la flotabilidad mínima deseada y la accesibilidad que queremos que tenga a la hora de transportarla. La flotabilidad deseada es aquella que permita a la embarcación tener una reserva de flotabilidad de al menos el 50% en caso de estar en condición de plena carga, es decir, que la línea de flotación coincida con la mitad del flotador sumergido, y al menos del 60% con un individuo con un peso de 75 kg. Con estas dos condiciones podemos empezar a realizar el diseño y los cálculos.

Para el desarrollo de los mismos se ha elaborado una hoja de cálculo con el programa Microsoft Excel para facilitar las modificaciones posteriores a la hora de adaptarse a los requisitos de los materiales que se adquieran para obtener el flotador final.

En primer lugar hay que calcular la longitud y el diámetro del flotador.

- **Longitud (L):** tomaremos como base la longitud de la bicicleta de 1,8m y dejaremos un margen a proa y a popa de la embarcación de 0,1m, dando un total de 2m. La longitud del flotador es la que va a marcar nuestra eslora entre perpendiculares.
- **Radio (r):** Por razones de proporción y en base a las otras clases de bicicletas que hemos visto anteriormente, tomaremos una medida base de 30 cm de diámetro.

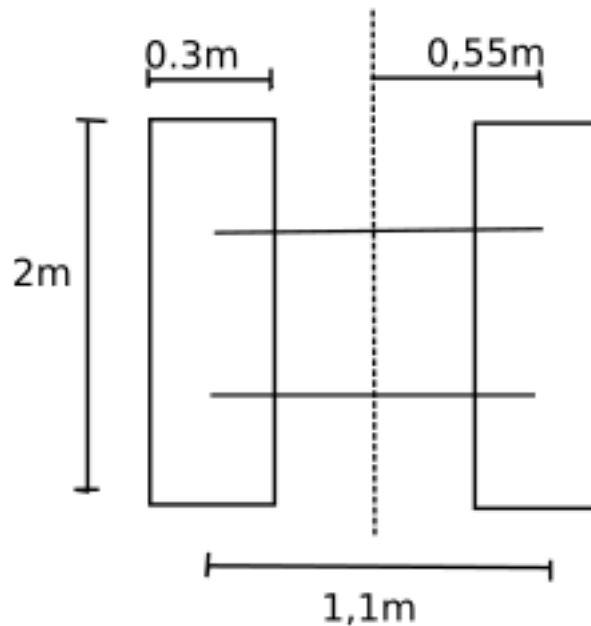


Figura 3-1 Dimensiones básicas de diseño.

Una vez fijadas las dimensiones básicas podemos proceder al cálculo del volumen total del flotador (V_t)

$$V_t = \pi \cdot r^2 \cdot L = 0,1413 \text{ m}^3$$

Teniendo el volumen de cada uno de los flotadores podemos ya empezar a calcular todos los parámetros necesarios para el estudio de estabilidad de la estructura.

Primero atenderemos a las condiciones de nuestro diseño: Para que con la condición de a plena carga la reserva de flotabilidad sea el 50% del volumen de carena tenemos que disponer como máximo de un desplazamiento total de 145 kg. Para la condición mínima operativa necesitaremos un desplazamiento máximo de 116 kg. Teniendo en cuenta el peso de la bicicleta de 14 kg y el peso de la estructura que serán constantes, nos deja un margen (limitados por la condición mínima operativa) de 27 kg para los flotadores y la estructura de anclaje. Como el peso total de la embarcación se divide por partes iguales a ambos flotadores, significa que para la elección de los materiales tenemos que cumplir el requisito de tener un peso máximo de cada flotador de 13.5kg, aunque hay que dejar un margen para el peso de la estructura.

Establecemos finalmente así las condiciones de carga máximas de la embarcación:

Condición de carga	Valor (kg)
Peso en rosca	41
Mínima operativa	116
A plena carga	145

Tabla 3-1 Condiciones de carga de diseño

3.1.2 Elección del material

- Tuberías de PVC:** En primer lugar nos encontramos con las tuberías de PVC que se utilizan en las obras y en las instalaciones de agua de los edificios. Este tipo de tuberías se encuentran normalizadas, por lo que la inmensa mayoría de los fabricantes adoptan medidas que relacionan el diámetro con el espesor asociado. Seleccionamos la compañía ferroplast [10] que pese a tener los mismos tamaños que el resto, nos aporta mucho más datos sobre las propiedades de la tubería y sobre los plazos de entrega.

En la selección de diámetros el que más se ajusta a nuestras necesidades es el de 315 mm con 6,2 mm de espesor. El tubo tiene además un tamaño de 6 metros, por lo cual podríamos con el pedido de un solo tubo conseguir los dos flotadores (y tener uno de repuesto) con un precio de 19,06 €.

Teniendo en cuenta que el material es PVC con una densidad de 1400Kg/m^3 y que el volumen de material es el de la corona de PVC ($V_{\text{pvc}} = 0,0120 \text{ m}^3$), obtenemos un peso del flotador de 16,84 kg. Este peso es mayor que el máximo permitido.
- Bloque de madera:** La madera, como hemos visto anteriormente, siempre ha sido uno de los principales componentes de los buques debido a su baja densidad. La construcción de unos pontones flotantes de madera necesitaría que todo el bloque estuviese compuesto por este material. Sería capaz de aguantar la estructura pero sin embargo el volumen de material necesario sería igual el Volumen total del pontón, lo que nos llevaría a tener un volumen de madera de $0,1413 \text{ m}^3$. La madera más ligera e idónea para las embarcaciones es la conocida como madera de balsa, procedente de Centroamérica y tiene una densidad de 150 kg/m^3 por lo que el peso de cada pontón se situaría en torno a los 21,13 kg superando así el máximo permitido.
- Estructura flotante comercial:** El mayor problema de esta alternativa está en el precio. A través de la página de www.es.aliexpress.com hemos encontrado una estructura flotante que cumple con las características que necesitamos y a un precio asequible, sin embargo el pedido de entrega es de dos meses por lo cual no seríamos capaces de realizar la instalación a tiempo. Además carece de interés de cara a la realización del trabajo.
- Tubos de poliespan recubierto con fibra:** esta opción consiste en crear un núcleo de poli estireno expandido (Poliespan) para darle forma al flotador. El poliespan tiene diferentes densidades según la resistencia que queramos darle al cilindro. Si escogemos el bloque cuya densidad es de 30 kg/m^3 conseguiremos las mayores resistencias a los esfuerzos para poder aguantar la estructura. Este núcleo de poliespan tendrá un volumen igual al volumen total por lo que supondrá que el flotador tenga un peso inicial de 4,2 kg. Este peso estaría dentro de nuestros límites, sin embargo habría que contar también con el peso de la fibra con el que lo cubramos. Las fibras más utilizadas en el ambiente náutico son la fibra de vidrio, la fibra de carbono y el kevlar. Vamos a estudiar los tres casos.

Tipo de fibra	Coste medio
Fibra de vidrio	2,5-6,5 €/m ²
Fibra de carbono	50 €/m ²
Fibra Kevlar	39 €/m ²

Tabla 3-2 comparativa de precios de las fibras

Si elegimos fibra de carbono (usada ampliamente para tener la mejor calidad en construcciones náuticas) debido a su densidad de 1700 kg/m³ podríamos escoger un espesor máximo de 2 mm para cumplir con el peso.

Para la fibra de vidrio, cuya densidad es de 2500 kg/m³, el espesor se reduciría a 1.5 mm

La fibra de kevlar tiene una densidad de 1440 kg/m³, menor que los dos anteriores y sin embargo posee mejores características que la fibra de vidrio. Un tubo de esta fibra tendría que tener un espesor máximo de 2.5 mm.

Teniendo en cuenta los factores de espesor, densidad y precio el material más adecuado para nuestro diseño sería la fibra de Kevlar.

Finalmente, el diseño constaría de un núcleo de poliespan recubierto por 2.5 mm de kevlar y esto daría un peso total de 12.6 kg de una estructura rígida no hinchable y, por tanto, difícil de transportar. Además nos quedaríamos con muy poco margen de peso para la estructura de fijación de los pontones a la bicicleta.

- **Tejido de poliéster recubierto con PVC:** Este es el material más utilizado en defensas y rodillos de arrastre o varada de las embarcaciones. Se consiguen fabricar cilindros de peso entre 1 y 2 kilogramos con grandes propiedades que resisten hasta 600 kilogramos de peso. Para el estudio de este material se ha pedido a distintos fabricantes las prestaciones del flotador así como el precio. El de mayores prestaciones se trata de un rodillo fabricado por la empresa Duarry [11] que lo fabricaría tal y como lo hemos diseñado nosotros al precio de 530 € ambos flotadores. Sin embargo hemos encontrado otro tipo de rodillos de gran resistencia en otros fabricantes con medidas estándar. Este tipo de medidas no se ajusta en longitud a nuestro diseño, sin embargo la unión de dos de ellos haría posible la flotabilidad deseada.

Opción de material	Precio	Plazo de entrega	Peso
PVC	Cumple	Cumple	No cumple
Madera	No cumple	No cumple	No cumple
Estructura comercial	≈ Cumple	No cumple	Sin referencias
Poliespan + fibra	Cumple	Cumple	Cumple
Poliéster+PVC	Duarry: Cumple	Cumple	Cumple
	Estándar: Cumple		

Tabla 3-3 comparativa de materiales.

Como se muestra en la Tabla 3-3, tras hacer el balance de las opciones que tenemos nos decantamos por los flotadores hinchables de tejido de poliéster y PVC de medidas estándar. La razón fundamental es que cumple el requisito de peso con mucha más ligereza que el poliespan y, además, es fácilmente transportable al desinflarse. A la hora de escoger el fabricante tenemos que elegir entre la fabricación a medida o la fabricación estándar. La fabricación a medida de Duarry implica obtener un producto de muy buena calidad, con los requisitos que le pedimos pero a un precio más elevado de lo que teníamos pensado gastar para obtener un producto más barato. Además la fabricación a medida llevaría más tiempo que la adquisición de un flotador estándar. El único problema es que en las medidas estándar de este tipo de rodillos de varada la máxima longitud es de 1.2 m por lo que la embarcación tendrá que montarse con 4 flotadores en lugar de 2. Cada banda dispondrá de dos flotadores amarrados entre si y con un reparto equitativo de peso por lo que trabajarán como si fuese un solo flotador. Con esta selección de material tendremos por lo tanto un peso total aproximado de los flotadores de 4 kilogramos lo que deja un margen de 23 kilogramos para el mecanismo de anclaje.

3.1.3 Diseño y selección del mecanismo de anclaje

Una vez tenemos los pontones hace falta diseñar el método de anclaje de ambos pontones y la estructura principal. Por un lado tenemos que tener en cuenta el método de fijación de los pontones con la estructura. Tomamos de ejemplo las hidrobicicletas ya existentes.

- **Velcro:** Como el modelo tipo Akwakat. El velcro es un sistema de apertura y cierre rápido que consiste en dos cintas que se han de fijar a dos superficies que se quieran unir. Una de las cintas tiene unas púas en forma de gancho que al presionar sobre la otra cinta llena de fibras se engancha y se consigue la fijación. Una de sus propiedades es la resistencia al agua ya que al ser un enganche entre las microfibras el agua no ejerce ningún tipo de reacción que pueda disolver la unión.
- **Juego de tubos y uniones desmontables:** Con este tipo de anclaje podemos usar dos métodos: el que usan las bicicletas del estilo Shuttlebike, que mediante un tubo curvado previamente, se consigue fijar la estructura a los pontones al inflar estos dentro de la circunferencia del tubo, consiguiendo que el flotador quede bloqueado dentro de él, o con tubos rectos en los que a través de unas uniones angulares creen una estructura firme para posicionar la bicicleta y sujeten los pontones.
- **Fijación mecánica:** nos referimos a fijación mecánica como la fijación a través de medios como remaches, tornillos y elementos similares. Este tipo de método no es

útil para todos los pontones ya que taladrar la superficie solo sería posible en un tubo rígido de PVC o el pontón de madera.

- **Adhesivos epoxi:** Este tipo de adhesivos se conocen como adhesivos rígidos ya que tienen una alta resistencia contra las tensiones y a la vez muy poca elongación. Este tipo de adhesivos tienen una gran resistencia además a agentes físicos y químicos y a la temperatura. Además este tipo de adhesivo es resistente al agua.

Teniendo en cuenta que en la selección de los pontones se ha escogido el tejido de poliéster con PVC y que queremos que el conjunto sea desmontable, solo podemos utilizar las opciones de velcro y del juego de tubos y uniones. Para nuestro proyecto hemos decidido finalmente mezclar varios de los métodos de fijación.

Principalmente usaremos una serie de tubos rectos para dar forma a la base de la estructura. Un tubo longitudinal será la columna vertebral de cada banda de flotadores para conseguir repartir esfuerzos entre ambos rodillos. A partir de ahí transversalmente saldrán otros tubos que unirán ambas columnas.

Para montar la estructura tubular hemos adquirido una serie de tubos de dos dimensiones. Tubos de 40 mm de diámetro y tubos de 30 mm. El material escogido ha sido el aluminio. También se ha utilizado una bancada metálica para anclar la rueda trasera y una abrazadera de PVC para sostener el cuadro de la bicicleta en la proa. El estudio estructural de la bancada no es necesario hacerlo ya que está diseñada como soporte de un rodillo para bicicletas y soporta perfectamente el peso de la condición de plena carga.

La bancada estará sujeta a la palomilla de la rueda trasera de la bicicleta. La bancada consta de dos apoyos tubulares de 40 mm huecos, uno a proa y otro a popa. A través de estos apoyos se colocarán unos tubos pasantes de 1,10 metros de largo. Los tubos seleccionados serán huecos y tendrán 30mm de diámetro y un espesor de 2 mm. Su selección ha estado determinada por el plazo de entrega y el precio. Más adelante se detallará el cálculo de resistencia estructural.

El problema de la parte de proa reside en la abrazadera de proa. Al optar por conservar la rueda delantera de la bici deja invalidada la idea de anclarla usando la horquilla y, además, reduce notablemente el espacio disponible para acoplar la abrazadera en el cuadro (Figura 3-2). Al colocar la abrazadera de proa, esta sale con ángulo hacia la rueda y es necesario colocar una unión en ángulo para evitar el bloqueo de la rueda delante que tendrá que tener libertad de movimiento para poder usarse como mecanismo de dirección. Una vez se desvía la dirección de la abrazadera, se incorpora una estructura tubular formada por dos tubos de 40 mm de diámetro y 3 mm de espesor. Ambos tubos formarán un ángulo de 90 grados gracias a otra unión a 90°. Ambas uniones son de aluminio diseñadas por Rk rose+krieger [12] para tubos de 40mm de diámetro.

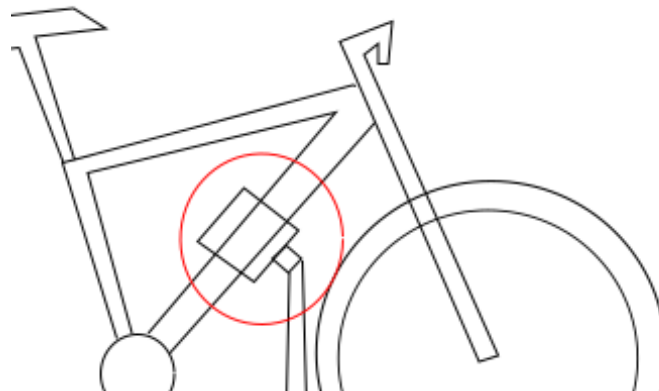


Figura 3-2 Abrazadera de proa.

Una vez tenemos las sujeciones de proa y popa hay que construir la base de la estructura. Se ha diseñado una estructura cuadrada basada en tubos de 30 mm con uniones de plástico de la marca Kipp. El conjunto de tubos consiste en 3 tubos de 1,10 m de longitud, pasantes por los apoyos de la bancada de popa y el tubo de 40mm del apoyo de proa, y dos tubos de 2 metros de longitud que recorrerán los flotadores consiguiendo así un reparto uniforme de los esfuerzos sobre los flotadores (Figura 3-3). Las uniones utilizadas son uniones continuas a 90° para conectar las barras transversales a las longitudinales (Se puede ver el montaje final en el anexo I y anexo II).

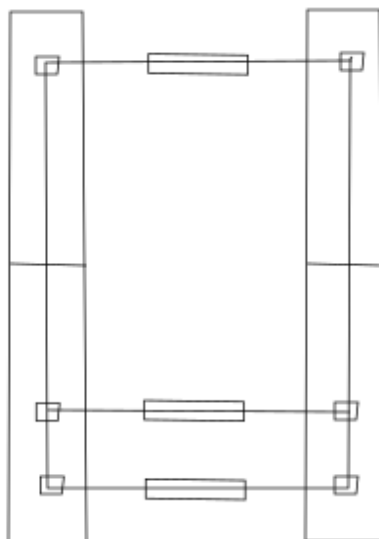


Figura 3-3 base tubular de la estructura.

Ahora procederemos al estudio estructural de la base tubular. Los tubos son de aluminio y tienen las siguientes características: Límite elástico (σ), Módulo de elasticidad longitudinal (E, módulo de Young) que relaciona la tensión en función de una dirección con las deformaciones unitarias en esa dirección, módulo de elasticidad transversal(G) relacionado con el cortante, y el coeficiente de Poisson (ν) que relaciona la deformación transversal con la longitudinal en un ensayo de tracción. Estas tres constantes se relacionan mediante la siguiente formula:

$$G(MPa) = \frac{E(MPa)}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Obteniendo así los siguientes datos mostrados en la Tabla 3-4

Característica	Valor
E (MPa)	70.000
G (MPa)	26.300
ν	0,33
σ (MPa)	70

Tabla 3-4 Características del Aluminio

Con estos parámetros propios del aluminio podremos empezar con el cálculo para la condición de plena carga ya que es la más exigente. Para ello veremos la distribución de pesos en la bicicleta.

Teniendo en cuenta las medidas del cuadro de la bici podemos simplificar la estructura en un esquema de barra biapoyada donde el peso se sitúa a 0,425 m del buje de popa, lo que se traduce en un reparto de pesos de 60% en la popa y 40% en la proa. Sin embargo, el apoyo de proa de nuestra bicicleta en la estructura no se sitúa sobre el buje de la rueda delantera, si no en el cuadro a una distancia de 0,725 del buje de popa y a 0,3 m del centro de gravedad por lo que el reparto de pesos será 60% proa y 40% popa.

Una vez sabemos el porcentaje de peso que va a cada uno de los soportes hay que volver a desglosar ese peso en los tubos transversales. En proa el tubo transversal tendrá que soportar todo el peso de proa ya que solo consta de una barra, mientras que en la popa el peso total del buje de popa se desglosa a partes iguales a ambos tubos. Estudiaremos el estudio para la barra más exigente que es la que se sitúa a proa y estará sometida a mayores esfuerzos que las de popa.

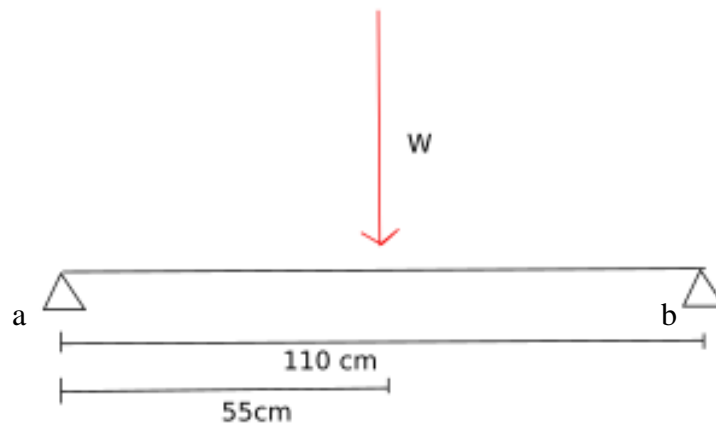


Figura 3-4 Barra bi-apoyada.

Para calcular las reacciones de los apoyos recurriremos a las siguientes [13]:

$$\sum F_x = 0 \rightarrow W - F_{ax} - F_{bx} = 0$$

Como W no tiene componente en el eje x, las reacciones en x serán nulas.

$$\sum F_y = 0 \rightarrow W - F_{ay} - F_{by} = 0$$

$$\sum M = 0 \rightarrow W \cdot 0,55 - F_{by} \cdot 1,1 = 0$$

Donde $F_{ay} = F_{by} = \frac{1}{2} W$

Donde los esfuerzos normales (N) de la estructura son nulos, y los cortantes (V) y flectores (M) son:

$$V_{ac} = -V_{cb} = \frac{W}{2}, \text{ siendo C el punto de aplicación de la fuerza.}$$

$$\text{y } M_C = \frac{W \cdot L}{4}, \text{ donde } L=1,10\text{m y } M_c \text{ es el máximo momento flector.}$$

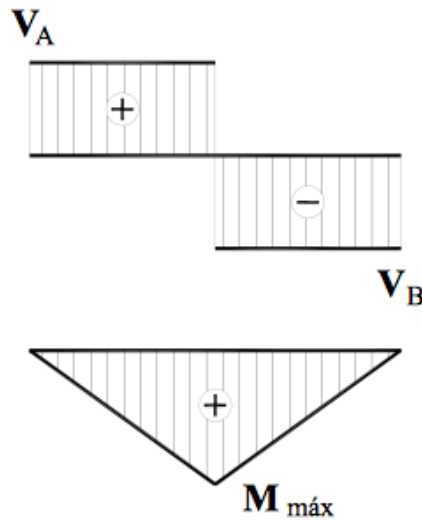


Figura 3-5 Diagramas cortante y flector.

Finalmente calculamos la flecha máxima: $Y_{max} = Y_c = \frac{W \cdot L^3}{48EI}$ donde $I = \frac{\pi \cdot d^3 \cdot e}{8}$, siendo “e” el espesor del tubo.

Una vez tenemos los parámetros que afectan a la viga vamos a calcular los esfuerzos debidos al momento flector y cortante:

$$\sigma = \frac{M_c \cdot r}{I}$$

$$\tau = \frac{V}{A}$$

La sección crítica se encuentra en la longitud media del tubo. En el punto crítico de dicha sección la tensión normal debida al momento flector es máximo y la cortante es nula, por lo que nos encontraremos un estado de tensiones uniaxial.

Característica	Valor
Peso (kg)	68,4
$F_{ax} = F_{bx}$ (N)	34,2
$V_{ac} = -V_{cb}$ (N)	34,2
M_{max} (N·m)	18,81
Y_{max} (mm)	1,27
σ (MPa)	13,30

Tabla 3-5 Valores de los esfuerzos de los tubos

Como podemos observar, la tensión es menor que el límite elástico del aluminio por lo que el tubo soportaría perfectamente las tensiones producidas por el peso embarcado de la condición a plena carga. Para el cálculo no se ha tenido en cuenta el propio peso de la estructura, solo el añadido, sin

embargo el margen entre la tensión producida y el límite elástico nos proporciona un margen de seguridad muy amplio.

Una vez tenemos montada nuestra base tubular con los apéndices de sujeción de proa y popa, hay que conseguir fijarla a los flotadores. Primero uniremos ambos flotadores a través de un círculo de velcro que se colocará en una de las caras del flotador (la que está libre del tapón de inflado). Se fijarán ambas partes del velcro a través de adhesivos epoxi. Después se colocarán unos pasa-remos colocados a lo largo de los flotadores para posicionar los tubos longitudinales y anclar la estructura a los pontones. Estos pasa-remos se colocarán mediante adhesivos sobre la superficie de la resina de PVC.

3.2 Diseño de la dirección y transmisión

3.2.1 Diseño del timón

Para el diseño de un timón tenemos que tener en cuenta unos parámetros esenciales como la altura (h_t), el espesor máximo (t), la cuerda media (c_t), la relación de espesor (E) y el área del timón (A_t) [14].

- **Altura del timón:** Para su cálculo debemos de tener en cuenta el valor de la altura del vano del codaste. En nuestro caso este dato carece de sentido ya que el timón está situado en la proa. Por ello vamos a empezar con una altura de timón de 30 cm que será suficiente para nuestra embarcación.
- **Área mínima del timón:** tiene que ser la menor posible para evitar fricción con el agua y menor peso. Para ello nos aproximamos según esta expresión experimental:

$$A_t = \frac{L \cdot C_m}{100} \cdot \left(1 + 50 \cdot C_b^2 \cdot \left(\frac{B}{L} \right)^2 \right)$$

Con esta expresión y entrando con el calado medio de las condiciones de carga obtenemos que el área mínima es $0,04545 \text{ m}^2$

- **Cuerda (c) :** Es la dimensión paralela al flujo. Para su cálculo se relaciona con el área mínima y la altura máxima. Siendo $c_t = \frac{A_t}{h_t} = 0,15$ metros.
- **Espesor (t):** la relación de espesor (E) tiene que tomar valores entre 0,15 y 0,23. Y teniendo en cuenta que $t = E \cdot c$ concluimos que el espesor ideal estará entre 22,5 y 34,5 mm.

Con estos datos nos quedaría un timón de las siguientes características (Figura 3-6)

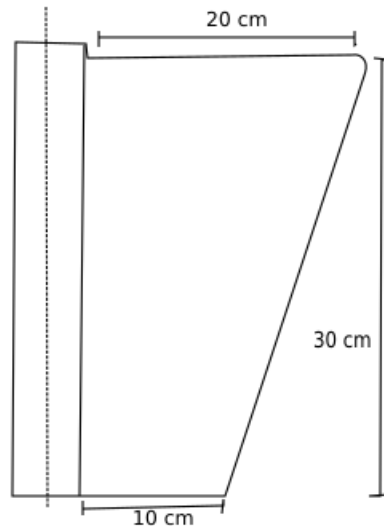


Figura 3-6 Dimensiones básicas del timón.

Con estos parámetros hemos determinado las medidas mínimas que necesita el timón para poder gobernar nuestra embarcación.

Se ha adquirido un timón de características similares (Anexo II). Para anclarlo se ha utilizado una unión tubular con una cara plana. Esta cara se ha atornillado a unas escuadras que se fijan a la rueda delantera para impedir el movimiento relativo del timón.

3.2.2 Selección del tipo de transmisión

Como hemos visto antes, para transmitir la potencia del pedalier a la hélice existen varias opciones.

- **Cadena y tren de engranajes:** Utilizar la propia catalina de la bicicleta para mover un tren de engranajes como en el modelo Akwakat (Figura 3-7) significaría tener que desmontar parte de nuestra bicicleta, ya sea por el hecho de quitar las ruedas o por tener que neutralizar el efecto de la cadena principal del pedalier para poder acoplar la nueva cadena. Esto implicaría el requerimiento de herramientas complejas (tronchacadenas) para poder realizar el desmontaje y montaje, además de que el tiempo que se tardaría sería mayor.



Figura 3-7 transmisión por cadena y engranajes ([7])

- Mediante fricción:** Este es el estilo del modelo ShuttleBike, donde a través de un rodillo de fricción colocado en la rueda se consigue una salida de potencia que dará el par necesario a la hélice. En este caso no se necesitaría desmontar ningún tipo de elemento de la bicicleta, lo que facilitaría su montaje en la estructura.

Para conseguir transmitir la potencia de las ruedas a nuestro nuevo eje vamos a usar el método de fricción a través de una transmisión por rodillo. Se ha escogido un rodillo de entrenamiento de bicicleta (Imagen en el Anexo II) ya que cuenta con bancada propia de fácil anclaje a la palomilla de la rueda y sirve como apoyo fundamental para montar la estructura tubular (Como hemos visto en el capítulo 3.1.3).

A este rodillo de fricción se le han realizado una serie de modificaciones para aligerar su peso además hacerlo accesible para la salida de la transmisión. Por ello se le ha extraído tanto el freno magnético como el volante de inercia.

Para saber cuál es la relación de transmisión total que tenemos en nuestro sistema, hay que tener en cuenta las dos etapas que lo forman. Por un lado tenemos la transmisión por cadena desde el eje del pedalier hasta la rueda y después de la rueda al rodillo de fricción.

La cadena permite transmitir la potencia y movimiento entre dos ejes paralelos (el del pedal y el buje de la rueda trasera) modificando la velocidad pero nunca el sentido de giro, ambos ejes girarán en el mismo sentido. En la bicicleta este tipo de transmisión se utiliza cambiando la velocidad mediante una serie de ruedas en el pedal (denominada Catalina o piñón conductor) y otras ruedas dentadas en el buje de la rueda trasera (denominados piñones) consiguiendo así un rango de diferentes velocidades de transmisión. Este sistema está formado por una cadena cerrada donde los eslabones van engranándose con los piñones y la catalina que a su vez se encuentran solidarios a su respectivo eje (Figura 3-8). Este sistema presenta mejoras frente a la correa ya que al engranar los dientes sobre la cadena provoca que no exista deslizamiento y así mantenemos la relación de transmisión constante para una misma marcha.

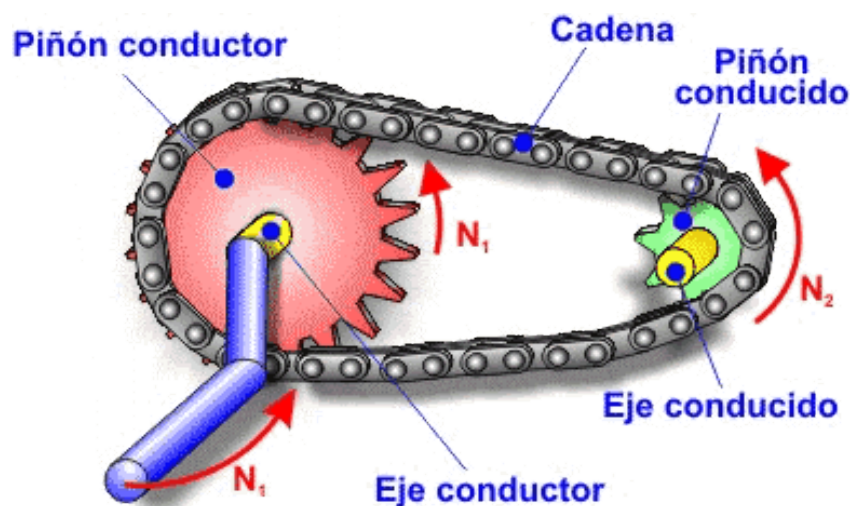


Figura 3-8 Partes de una cadena [15].

El pedal gira a las mismas revoluciones que la rueda catalina al compartir el mismo árbol, por lo que la relación de transmisión de 1:1. Sin embargo la variación de tamaños entre las distintas catalinas y piñones hace que la relación de transmisión sea diferente según la elección de las marchas. La ecuación fundamental de las velocidades de la cadena será calculada mediante la siguiente fórmula:

$$N_1 \cdot Z_1 = N_2 \cdot Z_2 \rightarrow N_2 = N_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_2}$$

Y la relación de transmisión por tanto:

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{Z_1}{Z_2}$$

Donde Z_1 y Z_2 son el número de dientes de la Catalina y piñón respectivamente y N_1 y N_2 las velocidades.

La cadencia de pedaleo de una persona no profesional va desde los 60 rpm a los 90 rpm por lo que tomaremos estos datos para establecer los límites de las velocidades. Nuestra bicicleta dispone de 3 catalinas y de 8 piñones, pudiendo llegar hasta 24 velocidades diferentes para un mismo ritmo de pedaleo.

Piñón/ Catalina (Dientes)	22	32	42
12	137,5	200	262,5
14	117,85	171,42	225
16	103,125	150	196,87
18	91,66	133,33	175
21	78,57	114,28	150
24	68,75	100	131,25
28	58,92	85,71	112,5
31	53,22	77,41	101,61

Tabla 3-6 Velocidad (rpm) de la rueda trasera para una cadencia de 75 rpm

Con la media de pedaleo, 75 rpm, obtenemos las mayores velocidades de la rueda trasera con la combinación catalina/piñón de 42/12, obteniendo una relación de 3,5, mientras que las menores serán con una combinación 22/31 será de 0,71.

Ahora llegamos a la segunda etapa de la transmisión, mediante ruedas de fricción. Este tipo de transmisión se basa en asumir que idealmente en el punto de contacto los dos cilindros ruedan sin deslizar y por tanto comparten la misma velocidad en el punto de contacto. Sirve para transmitir potencia entre ejes paralelos, al igual que la cadena, pero esta vez el sentido de giro de la rueda conducida será el contrario al de la rueda conductora. Sirve para transmitir potencias pequeñas y están sometidos a mucho desgaste debido al rozamiento.

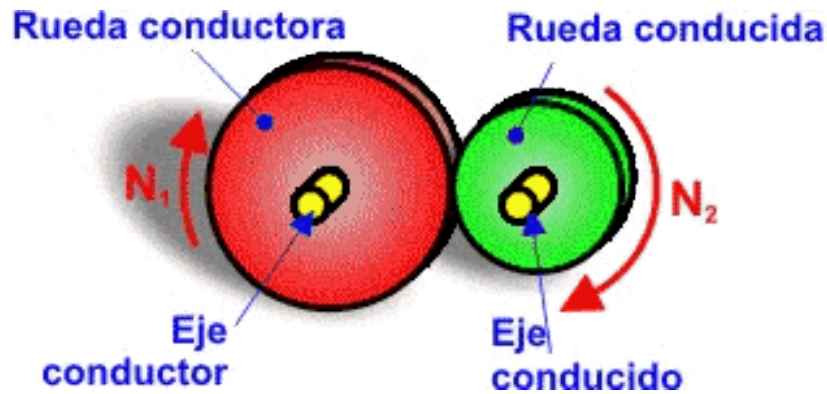


Figura 3-9 Partes de los rodillos de fricción [15].

Para obtener la ecuación fundamental de las velocidades partimos de la relación de transmisión donde:

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{D_1}{D_2}$$

$$D_1 \cdot N_1 = D_2 \cdot N_2 \rightarrow N_2 = N_1 \cdot \frac{D_1}{D_2}$$

Donde D_1 y D_2 son los diámetros de la rueda conductora y la conducida respectivamente y N_1 y N_2 sus velocidades.

Los valores entonces de la velocidad de rotación de la rueda estará englobados entre los 262,5 y 53,22 rpm, lo que llevaría al rodillo a girar a un ritmo entre 745,7 y 3734 rpm

El trabajo de la hélice está determinado por su geometría y por su velocidad de rotación. Ésta velocidad no es recomendable que sea muy alta ya que las hélices trabajan mejor a bajas revoluciones. Sin embargo la velocidad de salida del rodillo dependerá de cómo transmitamos la potencia a la hélice y si existe reducción o lo hacemos de manera directa. Más adelante se estudiará el cambio de marchas perfecto para el rendimiento óptimo de la hélice.

El siguiente paso es elegir como vamos a transmitir la potencia del rodillo a la hélice y para ello tenemos el inconveniente del cambio de la dirección del eje.

- Tren de engranajes:** El método tradicional de transmisión de potencia. Los trenes engranajes están formados por un sistema de ruedas dentadas de distintos tamaños. Se definen por pares llamando a la grande de ellas corona y a la menor piñón. Se transmite el movimiento mediante un movimiento circular debido al contacto de las ruedas dentadas. La rueda que está conectada al árbol donde se le aplica la potencia se le denomina engranaje motor, mientras que la que está conectada al eje se le llama engranaje conducido. La ventaja frente a otro tipo de transmisiones es que la relación de transmisión es exacta. Para utilizar un tren de engranajes en nuestro sistema, al tener que cambiar la dirección de la potencia, deberíamos usar engranajes cónicos o el conjunto tornillo sin fin/corona. El primer tipo permite la transmisión entre ejes que se cortan, por la que se podría hacer un tren de 3 engranajes para conseguir la dirección deseada del árbol de la hélice. Con el sistema tornillo sin fin y corona conseguimos transmitir grandes esfuerzos entre ejes que se cruzan 90° , el problema se encuentra es que en este tipo de engranajes el sentido de giro no es reversible por lo que solo podríamos propulsarnos en una única dirección.

- **Cable flexible:** se trata de un método de transmisión de movimiento rotatorio con gran flexibilidad y durabilidad. Debido a la flexibilidad tiene un campo de aplicación muy grande, sobre todo en transmisiones de grandes potencias de rotación para llegar a lugares donde los engranajes serían difíciles de instalar. Se trata de un árbol formado por unas hélices de acero en ambos sentidos. El cable puede doblarse en cualquier dirección debido del deslizamiento de las espiras de las hélices. Este tipo de transmisión se puede usar en ambas direcciones de rotación con la diferencia es que el par máximo se reduce un 30% en la dirección opuesta. La espiral está rodeada de una vaina flexible que la protege del entorno además de garantizar la lubricaciones y servir de cojinete. Alcanza longitudes de hasta 5 metros. Este tipo de transmisión ofrece una buena solución cuando los arboles que queremos conectar están desalineados o bastante alejados.

Debido a que la salida de potencia del rodillo se encuentra bastante alejada del árbol de la hélice, hemos escogido la transmisión por cable flexible como la mejor opción para nuestro diseño.

Las características de este tipo de cables para un determinado pueden varían modificando el número de cables por capas, el número de capas de helicoide envueltas, el diámetro del alambre, el espacio entre alambres helicoidales y el material del alambre. La relación básica de potencia como función de momento de torsión (Torque, T) y velocidad de rotación (n) se puede calcular mediante la siguiente ecuación [16]:

$$T(in \cdot lb) = \frac{63,025 \cdot W(hp)}{n(rpm)}$$

A un régimen de 75 rpm de pedaleo y para el peso óptimo de carga (Persona de 75 kg) tenemos que calcular la potencia. Suponemos un tiempo de una hora de ejercicio con lo que se recorrerían 32 kilómetros en tierra con la marcha más larga y 6 kilómetros con la marcha más corta. Tras una serie de búsqueda de información hemos encontrado una estimación de potencia teórica en un recorrido llano [17] basada en la fórmula: $Potencia(W) = \frac{2 \cdot \pi \cdot 9,8 \cdot F \cdot n_{pedal} \cdot l}{6000}$ y como podemos ver en la Figura 3-10 en la línea azul para nuestras velocidades la potencia requerida está entre los 10 y los 280 W. El cuerpo humano en un recorrido sin grandes alteraciones, a un ritmo continuo puede realizar una potencia de 75 W sin llegar a agotarse durante periodos grandes de tiempo. Esta potencia sería la que se requeriría para moverse a una velocidad de 23 km/h., lo que corresponde aproximadamente con un cambio de marchas de 32/12 a un ritmo de pedaleo de 75 rpm. Con estos datos vamos a comprobar el torque máximo y mínimo de nuestro sistema. Para ello aplicamos la ecuación antes mencionada y obtenemos que se encuentra entre 0,01 y 0,015 in*lb

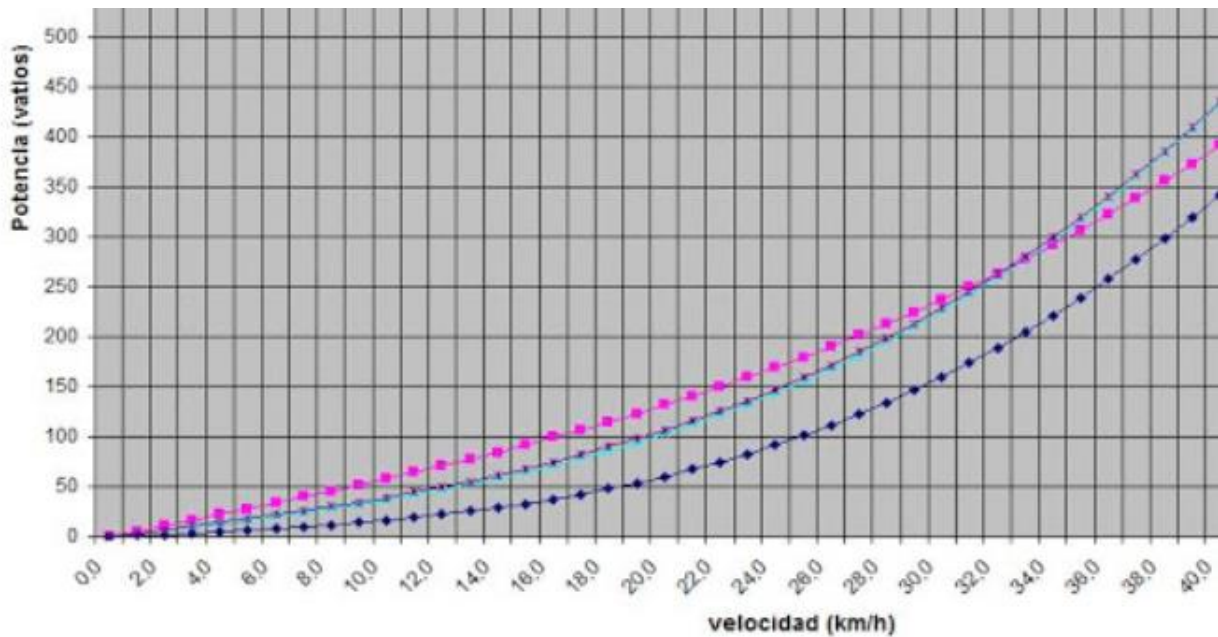


Figura 3-10 Relación potencia-velocidad en llano (Línea azul) [[18]].

Para la selección del diámetro que tendrá que tener nuestro cable flexible nos basaremos en una tablas donde se comparan los diferentes momentos a los que pueden estar sometidos dependiendo de varios factores. Como queremos transmitir el giro en ambos sentidos (para aprovechar ambas salidas de potencia del eje del rodillo) utilizaremos la siguiente tabla:

Diámetro (in)	Máxima velocidad permitida (rpm)	Mínimo radio permitido (in)	Máximo momento torsión (T)
0.127	30.000	3	16/12
0.147	20.000	4	21/26
0.183	15.000	4	44/41
0.245	10.000	4	141/121
0.304	7500	4.5	281/207

Tabla 3-7 Relación de parametros de un arbol flexible [16]

Diámetro (in) / R _b (in)	3	4	6	8	10	12	15	20
0.127	0.4	1.2	2.1	2.6	2.8	3.0	3.2	3.4
0.147		1.8	4.1	5.2	5.9	6.3	6.8	7.2
0.183		2.8	6.3	8.0	9.1	9.8	10.5	11.1
0.245		8.4	19.0	23.0	27.0	29.0	31.0	33.0
0.304			20.0	32.0	39.0	44.0	48.0	53.0

Tabla 3-8 Momento máximo recomendado para diferentes R_b [16]

Teniendo en cuenta nuestros valores y la Tabla 3-7 y la Tabla 3-8 llegamos a la conclusión de que el cable de 0,127 pulgadas (3,22 milímetros) es suficiente para la potencia de nuestra bicicleta.

Hay que tener en cuenta que el radio de curvatura del eje tiene que estar dentro de unos límites ya que si se encuentra fuera de estos valores puede causar aumento de temperatura en el eje debido a la inercia de fricción que se desarrolla dentro del mismo debido a que los cables se ven obligados a rozarse con mayor intensidad en curvas más cerradas. Por lo tanto hay que tener en cuenta este radio mínimo (R_b) para el diseño y selección de nuestro árbol flexible. Si el cable cumple los requisitos de radio, velocidad y momento se espera que tenga un tiempo de vida de 10^8 ciclos.

$$R_b = \frac{x^2 + y^2}{4x}$$

donde x es desalineación de componentes e y es la distancia entre ejes (Figura 3-11)

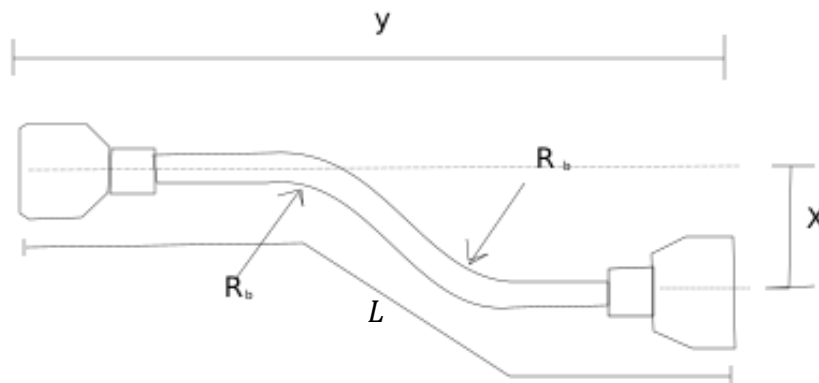


Figura 3-11 Dimensionamiento del cable flexible.

Teniendo en cuenta que la hélice se sitúa debajo de la bancada del rodillo en la estructura, la desalineación será de 0,4 m. El R_b adecuado será de 130 mm \approx 5 pulgadas.

3.2.3 Acoplamiento de la hélice

Con lo que respecta a la hélice, se han conseguido unas pequeñas hélices de PVC comerciales que se adaptarán a las necesidades básicas de la embarcación. Para posicionar la hélice se ha añadido a la base tubular un apéndice también tubular de aluminio colocado en el tubo transversal de popa. Para colocarlo se ha diseñado un sistema formado por dos uniones a 90° en el tubo transversal de popa a 40 cm a banda y banda de la línea de crujía para servir también de tope para el flotador. A partir de estas uniones bajarán unos tubos de 50 cm de longitud quedando sumergidos en el agua. Con otras dos uniones a 90° colocadas al final de estos tubos colocaremos el tubo transversal inferior que unirá los dos anteriores. Sobre este tubo inferior es donde colocaremos las hélices a través de unas uniones pasantes para el tubo y con otro cambio de 90° que tiene una placa plana. Sobre esta placa se acoplará el eje de la hélice. El eje de la hélice consta de una chapa que se fijará a la unión plana a través de unos pernos y unas tuercas. Este eje metálico servirá de paso para el propio árbol de la hélice que será la transmisión flexible. La hélice consta de una arandela que transmitirá el empuje al eje, y éste a la estructura, que es lo que se conoce como chumacera de empuje. Por el lado exterior se bloqueará la hélice con una tuerca enroscada en la parte final del árbol flexible. (Anexo II)

Para acoplar la transmisión flexible, se usará un acople de reducción de 10 mm al tamaño del cable en el eje del rodillo. Esta transmisión se colocará teniendo en cuenta el radio mínimo permitido a través de la estructura cuadrada y pasando a través del eje de la hélice.

3.3 Cálculo de estabilidad

En este apartado procederemos al cálculo de todo lo relativo a la estabilidad de la embarcación con los materiales y estructuras que hemos diseñado y obtenido previamente, para ellos en la Tabla 3-9 procederemos a desglosar los pesos finales de cada parte de la estructura

Elemento	Peso (kg)
Bancada con rodillo	4,42
Flotador	0,85(x4)
Hélice	0,25(x2)
Conjunto de tubos de 30mm	2,04
Conjunto de tubos de 40mm	0,75
Abrazadera proa	0,3
Uniones	0,2(x11)
Timón	1
Transmisión	0,5 (x2)

Tabla 3-9 Tabla de pesos de los elementos de la estructura

El estudio de estabilidad estará dividido en tres partes. Primero se estudiará la estabilidad transversal ya que en el estudio de la altura metacéntrica tendrá mayor influencia al ser la manga menor a la eslora, esto provocará que el metacentro transversal esté más bajo que el longitudinal. La finalidad de este apartado es obtener las medidas de estabilidad y ver si es estable o no la embarcación. Después seguiremos con un estudio de la estabilidad longitudinal cuyo objetivo es comprobar el asiento de la embarcación a medida que variamos la posición de la estructura en el flotador para ver cual es el lugar idóneo para posicionarla. Finalmente recurriremos a un estudio de traslado de pesos en el que comprobaremos la estabilidad y escora del buque cuando embarcan o desembarcan los ciclistas.

3.3.1 Estabilidad transversal

Parámetro	valor
Radio flotador, r (cm)	15
Eslora, L (m)	2,4
Peso de la estructura/Bicicleta, W_b (kg)	18/14
Peso óptimo/máximo del individuo, W_{op} (kg)	75 /100
Densidad del agua del mar, ρ_m (ton/m ³)	1,026
Volumen 1 flotador, V_f (m ³)	0,1696
Distancia del eje del flotador al CG, X_{cg} (m)	0,55
Manga (m)	1,4

Tabla 3-10 Datos básicos para el desarrollo de los cálculos

Una vez tenemos los datos finales del peso de la estructura (Con un margen de 2 kg aproximadamente) podemos empezar a realizar el estudio de estabilidad teniendo en cuenta las tres condiciones de carga finales (Tabla 3-11):

Condición de carga	Valor (kg)
Peso en rosca	32
Mínima operativa	107
A plena carga	132

Tabla 3-11 Condiciones de carga finales

Primero hay que conocer el volumen de carena que tendremos según el peso del ciclista que utilice la hidrobicicleta en cada momento, para ello nos basaremos en el teorema de Arquímedes donde el empuje tiene que ser igual al peso de la embarcación. Por ello:

$$W(\text{ton}) = V_c(\text{m}^3) \cdot \rho(\text{ton/m}^3)$$

Una vez obtenemos el volumen de carena, necesitamos saber la posición de la línea de flotación respecto al flotador, es decir, el calado del flotador. Para ello primero tenemos que saber el ángulo que engloba la inmersión. Haremos uso de la siguiente ecuación (Figura 3-12) [19]

$$\rho_m \left(\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right) \cdot \left(\pi \cdot r^2(\text{m}) - \frac{r^2(\text{m})}{2} (\theta(\text{rad}) - \text{seno}(\theta)) \cdot L(\text{m}) \right) = W(\text{ton})$$

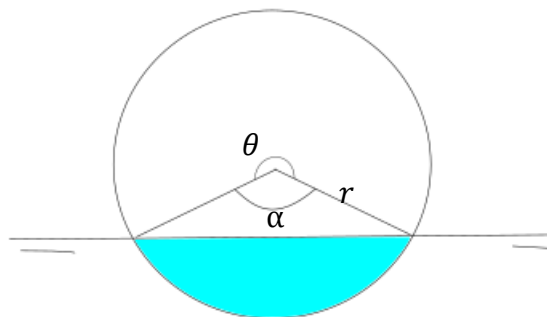


Figura 3-12 Cálculo de la línea de flotación.

Una vez tenemos el ángulo calculamos el calado (C) por trigonometría donde el ángulo de la obra viva(α) es el conjugado del ángulo de la obra muerta (θ).

$$\text{Calado (m)} = r(\text{m}) - h(\text{m})$$

$$\text{Donde; } h(\text{m}) = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot r(\text{m})$$

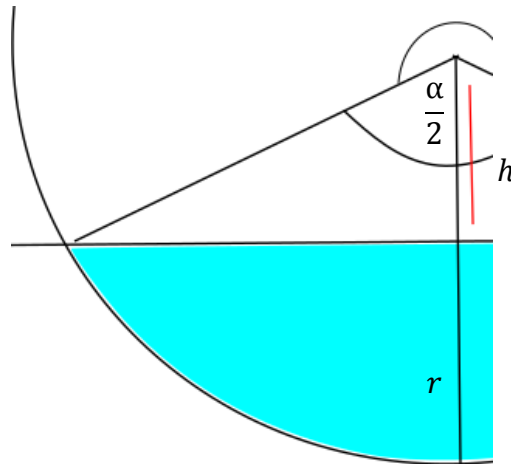


Figura 3-13 Cálculo del calado.

Una vez tenemos el calado para cada peso podemos obtener la manga de flotación para los diferentes condiciones de carga y su área de flotación. Para ello volvemos a hacer uso del ángulo de la obra viva en el que tenemos que la manga en cada flotación está determinada por:

$$\text{Manga}(m) = r(m) \cdot \text{seno}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot 2$$

$$A_f = \text{Manga}(m) \cdot L(m)$$

Una vez tenemos los datos básicos para cada flotación, pasamos a calcular: el centro de carena, el radio metacéntrico y la altura metacéntrica. Para ello usaremos las fórmulas de estabilidad que a continuación se relacionan [19] [13].

Para hallar el centro de carena (B) respecto de la quilla (K) de nuestra embarcación:

$$KB(m) = r(m) - \left(\frac{2 \cdot r(m)}{3} \cdot \left(\frac{\text{sen}^3\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\frac{\alpha}{2} - \text{sen}\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \text{cos}\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \right) \right)$$

El radio metacéntrico viene dado por:

$$BM(m) = \frac{I_x(m^4)}{V_t(m^3)}$$

Para calcular el momento de inercia tendremos en cuenta el área de flotación, y además usaremos el teorema de Steiner, donde se determina el momento de inercia sobre un eje paralelo al de su centro de masas que se encuentra a una distancia (D). Este teorema nos servirá para calcular el momento de inercia respecto al centro de masas (G) de la embarcación total que estará situada en el punto medio y que es donde tendremos que tomar el momento de inercia global.

$$\text{donde: } I_x(m^4) = \frac{1}{2} \cdot L(m) \cdot \text{manga}^3(m)$$

y según el teorema de Steiner: $I_{steiner} (m^4) = Ix + A_f \cdot D$

Finalmente, utilizando el momento de inercia sobre el eje del centro de gravedad de la embarcación calculamos los radios metacéntricos para cada calado.

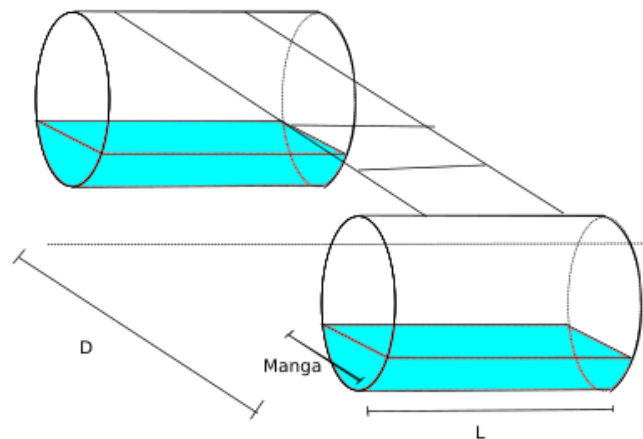


Figura 3-14 Área de flotación.

Para saber la posición del metacentro respecto la quilla no tenemos más que sumar la altura del centro de carena con el radio metacéntrico.

Para determinar la altura metacéntrica (GM) necesitamos saber la posición del centro de gravedad para cada flotación y con ello podremos finalmente confirmar si es estable o no la estructura de la hidrobicicleta. Para el cálculo del centro de gravedad nos apoyamos en el diseño en CAD con el software Siemens NX.

Condición de carga	Peso (kg)	Calado (cm)	V _{c total} (m ³)	Manga _{flotación} (m)	KM (m)	KB (m)	GM (m)	RF (%)
Peso en rosca	32	4	0,031	1,31	10,06	0,026	9,51	90,8
Mínima operativa	107	10,3	0,1043	1,38	4,12	0,06	3,18	69,25
A plena carga	132	12,13	0,1286	1,39	3,47	0,07	2,50	62

Tabla 3-12 Datos finales de estabilidad transversal

Como podemos observar en los resultados, G se encuentra encima de B, condición indispensable para que exista un par adrizante que estabilice el buque. También podemos observar que cumplimos nuestro requisito de reserva de flotabilidad, consiguiendo un margen de volumen de carena por si existiese el caso de algún otro tipo de peso embarcado aparte de la persona que vaya a utilizarla. Además, la altura metacéntrica es positiva por lo que sabemos también que nuestra embarcación es estable.

Si comparamos la estabilidad de nuestra embarcación (asemejada a un catamarán) con una embarcación monocasco podemos ver la gran ventaja que supone separar los flotadores del eje del centro de gravedad de la embarcación. Esta ventaja viene dada por el teorema de Steiner donde aumenta el momento de inercia al desplazarlo fuera de su eje.

En caso de suponer que tuviésemos la condición de plena carga de un buque monocasco usando el volumen de un solo flotador, el radio metacéntrico obtenido sería de 0,08m frente a los 3,4 m de la embarcación estilo catamarán como la nuestra.

Finalmente vamos a calcular unos últimos parámetros que afectan a la geometría de los pontones.

- Coeficiente de bloque (C_B): $C_B = \frac{V_c}{Mangaf \cdot L \cdot C} = 0,7325$
- Coeficiente de flotación (C_F): $C_F = \frac{A_F}{L \cdot mangaf} = 1$
- Coeficiente Prismático (C_P): $C_P = \frac{V_c}{A_{CM} \cdot L} = 0,999$
- Coeficiente de afinamiento de la cuaderna maestra (C_{CM}): $C_{CM} = \frac{A_{CM}}{C \cdot mangaf} = 0,7327$

3.3.2 Estabilidad longitudinal

Se conoce como estabilidad longitudinal a la capacidad del buque para recuperar su posición inicial de equilibrio que se llega a perder por culpa de la mala mar o movimientos de pesos a bordo longitudinalmente. La importancia de la estabilidad longitudinal recae en conocer el asiento del barco y saber cómo hay que redistribuir el peso para que el asiento sea nulo o, en el peor de los casos, ligeramente a popa.

Teniendo en cuenta que el centro de flotación se sitúa en el centro geométrico de la carena estará situado a una distancia de 1,2 metros de la proa, coincidiendo con el punto de unión de los dos flotadores. Para conseguir que el asiento sea nulo el centro de gravedad de la estructura tiene que coincidir con el centro de flotación y tendremos que ajustar la estructura tanto en proa como en popa, por lo que tendrá que ponerse los apoyos en cada flotador a una distancia en función de la distribución de pesos de la bicicleta.

Una vez hemos posicionado la estructura centrada en los flotadores, hemos calculado mediante el software Siemens NX 10.0 el centro de gravedad de la estructura, que se encuentra a más o menos 1 metro de la popa.

Para calcular el asiento usaremos las fórmulas de estabilidad longitudinal [5]

Primero vamos a conocer los puntos M, G y B. La altura del centro de gravedad y del centro de carena son las mismas que en el apartado 3.3.1 de estabilidad transversal, mientras que la distancia del metacentro es diferente, como hemos dicho anteriormente, debido al diferente momento de inercia de la superficie. Si usamos la formula anterior del cálculo de BM obtendremos el radio metacéntrico longitudinal ($BM^?$).

Al igual que teníamos el momento de adrizamiento, en este tipo de estabilidad la unidad de medida es la resistencia que ofrece el buque para variar su asiento un centímetro. Para ello usaremos las siguientes ecuaciones:

$$MTC = \frac{GM'(m) \cdot W (ton)}{100 \cdot L(m)}$$

Cuando existe movimiento de pesos (o embarques/desembarques) se generará una serie de momentos cuyo centro de rotación será el centro de flotación salvo que se coloquen sobre el mismo centro de flotación. El embarque de un peso nuevo va a generar un aumento de calado igual para todo el casco y después se llevará acabo el asiento. La variación de calado es la misma que el anterior apartado. El peso embarcado (w) a una distancia (d) del centro de flotación produciría un momento longitudinal del valor de:

$$Mto Long = w(ton) \cdot d(m)$$

Y la variación del asiento sería:

$$\Delta_a = \frac{Mto Long(ton \cdot m)}{MTC}$$

Por lo tanto la variación de calados a proa y popa por efecto de este momento será:

$$\Delta_{Cpr} = \Delta_a \cdot \frac{Distancia\ del\ centro\ de\ flotación\ a\ la\ proa\ (m)}{L\ (m)}$$

$$\Delta_{Cpp} = \Delta_a - \Delta_{Cpr}$$

Donde los calados finales a proa y popa serán:

$$C_{Fpr} = C_{i_{pr}} \pm \Delta_c \pm \Delta_{Cpr}$$

$$C_{Fpp} = C_{i_{pp}} \pm \Delta_c \pm \Delta_{Cpp}$$

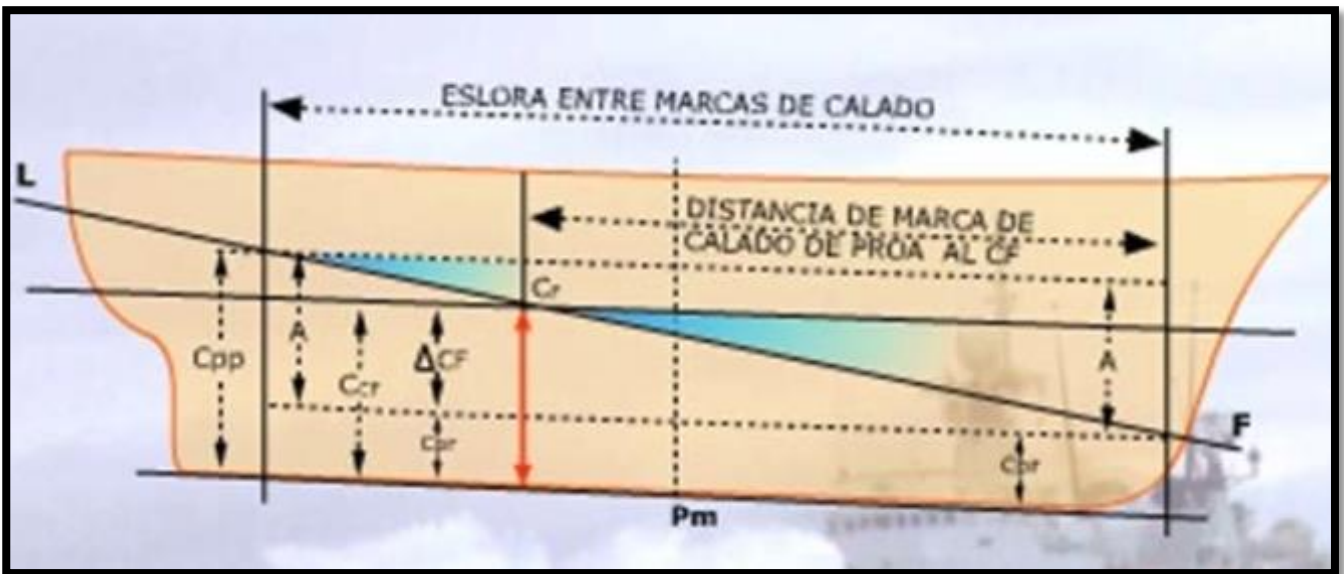


Figura 3-15 Esquema estabilidad longitudinal [5]

Condición de carga	Peso (kg)	Δ Calado (cm)	KM' (m)	KB (m)	GM' (m)	MTC	Δ _a (cm)	C _f pr/pp (cm)
Peso en rosca	32	3,37	21,77	0,026	21,22	0,00283	0,99	3,85/4,85
Mínima operativa	107	10,3	6,57	0,06	5,63	0,00251	1,5	9,4/11,9
A plena carga	132	12,13	5,8	0,07	4,83	0,00265	1,88	10,3/14,67

Tabla 3-13 Datos finales de estabilidad transversal

3.3.3 Embarque de pesos

Una vez sabemos cómo se comporta la bicicleta durante el tránsito, tenemos también que estudiar su comportamiento en el momento que embarcamos y desembarcamos de la bicicleta. Para ellos vamos a suponer un embarque de peso y su posterior traslación a su centro.

Vamos a partir de la embarcación en la condición de carga de peso en rosca, donde solo tenemos los flotadores, la estructura de anclaje y la bicicleta.

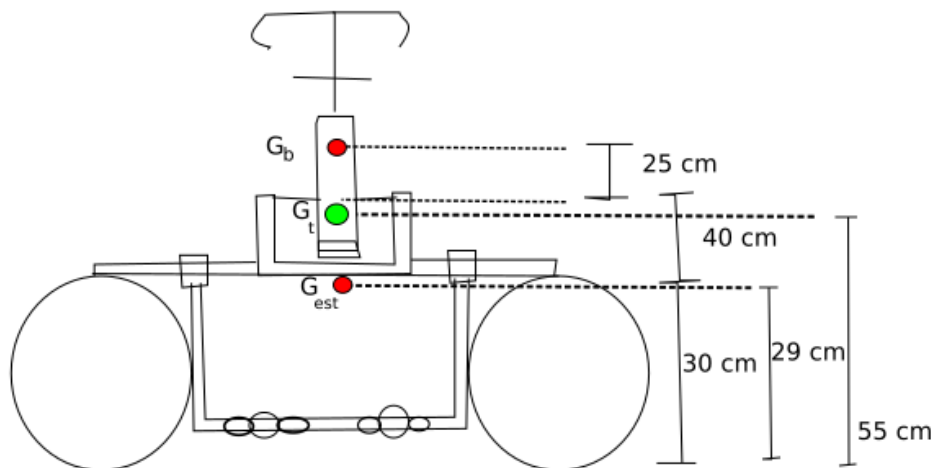


Figura 3-16 Posición del centro de gravedad.

En esta condición el centro de gravedad total de la estructura estará situado a una distancia de la quilla de 55 cm. Para su posicionamiento se ha calculado virtualmente la posición del centro de gravedad de la estructura y de la bicicleta por separado, y se le ha añadido después la bicicleta. Como la bicicleta se sitúa por encima del centro de gravedad de la estructura, el centro de gravedad total subirá.

Cuando embarcamos, lo hacemos apoyándonos sobre la parte de la estructura que está sobre los tubos y nos impulsamos a la bicicleta. Esto significa que al peso en rosca se le va a embarcar en una de las bandas de la embarcación un peso igual al peso de la persona que embarque. Esto generará un momento escorante que provocará que el buque escore. El ángulo de escora está unido con el momento de adrizamiento del buque, por lo que podremos comprobar si el buque se mantiene a flote o pueda llegar a volcar.

Para ellos usaremos un conjunto de fórmulas donde nos posicionarán el nuevo centro de gravedad debido al embarque de un peso fuera del plano diametral a cierta altura de la quilla [5].

$$GG_1 = \frac{w(ton) \cdot Gg(m)}{W_t(ton)}$$

Donde w es el peso embarcado, Gg es la distancia vertical desde el centro de gravedad al centro de gravedad del peso embarcado y W_t el peso total.

Por lo que para calcular ahora la altura del centro de gravedad no hay más que sumar o restar (dependiendo de si embarcamos el peso por encima o debajo del centro de gravedad inicial) esta distancia al KG inicial. En nuestro caso el centro de gravedad del embarque estará siempre situado por encima del centro de gravedad de la embarcación por lo que sumaremos la distancia. Este KG_1 será el centro de gravedad del nuevo peso sobre el plano diametral.

$$KG_1 = \frac{(W_{estructura} \cdot KG) \pm (w(ton) \cdot kg(m))}{W_t(ton)}$$

Donde $W_{estructura}$ es el peso de la embarcación, KG su distancia al centro de gravedad inicial, y kg es la distancia desde la quilla al centro de gravedad del peso embarcado.

Como en un primer momento se encuentra desplazado del plano diametral, tenemos que calcular el desvío de este G_1 . La fórmula utilizada es la misma salvo que la distancia (d) utilizada será la de separación entre la línea de crujía y el lugar donde embarcamos el peso.

$$G_1G_2 = \frac{w(ton) \cdot d(m)}{W_t(ton)}$$

Y finalmente podremos saber la escora con la siguiente ecuación (Figura 3-17)

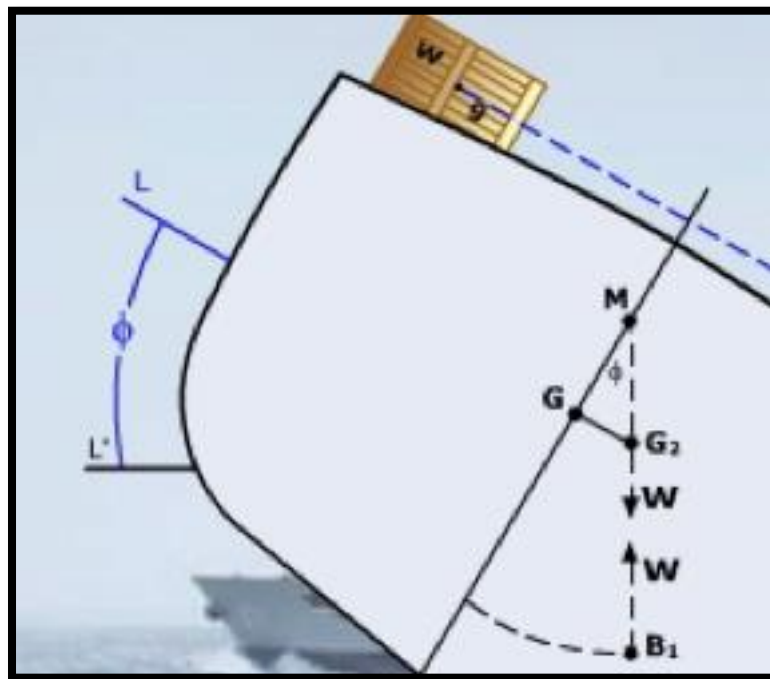


Figura 3-17 triángulo G_1MG_2 [5]

$$tg \theta = \frac{G_1G_2}{GM}$$

Para calcular el momento de adrizamiento no tenemos más que calcular el brazo de adrizamiento (GZ) a través de las ecuaciones de la estabilidad.

$$GZ = GM \cdot \sin \theta$$

$$Mto Ad = W_t \cdot GZ$$

Por lo que se demuestra que con un elevado GM tendremos también una gran estabilidad.

Condición de carga	Peso embarcado (kg)	KG_1	G_1M	G_1G_2	θ (°)	GZ	Mto Ad (kg*m)
Mínima operativa	75	0,935	3,18	0,385	6,9	0,38	41,12
A plena carga	100	0,966	2,5	0,4166	9,46	0,41	54,72

Tabla 3-14 Datos finales de escora y par de adrizamiento

Al tener un elevado GM y por consiguiente, un elevado momento de adrizamiento, el buque cuenta con una gran estabilidad inicial y además su resistencia al balance es también elevada y su método de recuperación es de forma brusca por lo que al salir de su estado de equilibrio buscará de manera rápida recuperar su estabilidad inicial.

4 PRUEBAS DE MAR

4.1 Ensayo de propulsión

En este apartado realizaremos dos tipos de ensayos para comprobar el correcto funcionamiento de la hélice y estudiar cual será la marcha óptima para conseguir el mejor rendimiento de la propulsión. Basándonos en un software [20] que calcula la velocidad según las características del casco, longitud y desplazamiento, hemos calculado que la velocidad media que alcanzará idealmente nuestra embarcación será de 4,22 nudos. Partiremos de este dato para conocer la eficiencia de nuestra hélice.

4.1.1 Ensayo en banco de pruebas

Materiales

Bicicleta

Banco de pruebas

Acople flexible

Acople fijo

Rodillo

Hélice

Transmisión flexible 6,35mm

Tabla 4-1 Lista de materiales utilizados

La finalidad de este ensayo ha sido comprobar el correcto funcionamiento en la transmisión, comprobar el funcionamiento de los acoples y comprobar que realmente hay un empuje de la hélice.



Figura 4-1 Banco de pruebas

Para montar el banco de pruebas (Figura 4-1) hemos recurrido a una cubeta del laboratorio a la que hemos fijado una lámina de plástico y posteriormente la hemos llenado de agua. Posteriormente hemos fijado la chapa metálica del eje de la hélice a la lámina de plástico, quedando la hélice suspendida en el banco. Para acoplar la transmisión flexible al eje del rodillo se ha utilizado inicialmente un acople flexible (Figura 4-2) de 10 mm (del eje del rodillo) a 6,35mm que es el diámetro de la transmisión flexible que hemos adquirido.



Figura 4-2 Acople flexible

Una vez se ha montado todo se ha procedido a realizar el ensayo. Primero se han movido los pedales con la mano para ver si se transmitía el movimiento correctamente y el resultado fue positivo. Después continuó el ensayo pedaleando de forma normal en la propia bicicleta. Tras una serie de vueltas se empezó a ver que la transmisión no funcionaba de forma correcta y se paró el ensayo. El evaluarse la situación vimos que el problema no era el árbol flexible si no que era el acople el que había fallado. El problema fue que este tipo de acople no soportaba el par ejercido con el ángulo de salida al que se le sometía al ser flexible por lo que tras una serie de ciclos se deformó plásticamente (Figura 4-3).



Figura 4-3 Acople flexible deformado

La solución fue acoplar la transmisión con un acople fijo roscado que provoca que el cable salga sin ángulo (Figura 4-4). Una vez colocada se procede a empezar el ensayo de la misma manera. Primero comprobando que el movimiento se transmitía de manera correcta (punto que tuvimos que corregir apretando más el acople ya que al principio dejaba de girar el árbol flexible al no estar suficientemente acoplado) y después pedaleamos encima de la bicicleta. El resultado fue positivo comprobando que había empuje de la hélice al ver que la lámina sufría flexión. El problema que observamos es que en determinadas marchas el rodillo patinaba. La razón es la diferencia de peso entre la proa y la popa como hemos visto, que al tener solo el 40% del peso total en la popa hace que no se ejerza tanta presión entre la rueda y el rodillo y pueda llegar a patinar. También puede ser ventilación en la hélice. La hélice deja de estar completamente sumergida en agua y el par resistente varía de forma brusca.



Figura 4-4 Acople fijo

4.1.2 Ensayo en la piscina

Una vez montada la bicicleta en su totalidad como se puede ver en la Figura 4-5 se procedió a llevarla a la piscina de la escuela naval para probar su funcionamiento en las 3 condiciones de carga.



Figura 4-5 Ensamblaje final

Una vez allí se posiciono el anclaje de la propulsión para que quedase totalmente inmerso en el agua y se apretaron las uniones. Se pudo comprobar que para la condición de peso en rosca se cumplía el estudio previamente realizado tanto en calado como en asiento (Figura 4-6). Tras confirmar la estabilidad se procedió a comprobar la propulsión moviendo manualmente los pedales desde la orilla de la piscina y se pudo observar que la hélice efectivamente ejercía un empuje que movía la bicicleta. No se pudo comprobar el tipo de velocidad que daba ya que el movimiento estaba condicionado tanto en avance como en retroceso por la fuerza ejercida desde la orilla, que provocaba tanto que avanzase más como que la frenase.

Posteriormente se intento realizar la prueba con la condición de óptima de carga pero no se pudo completar. El proceso del embarque de peso fue el ya mencionado en el capítulo 3.3.3, y la embarcación respondió como debería con lo que respecta a la escora. Sin embargo el problema surgió en el momento que el peso se colocó en crujía, donde los flotadores rotaron sobre si mismos provocando que la base de la estructura se quedase debajo de los flotadores en vez de encima. Esto provocaba que parte de la estructura (Incluyendo el rodillo y la parte baja de la carrera de los pedales) estuviese sumergida. Este funcionamiento no solo no es el adecuado si no hace que se genere más resistencia al avance y sobre esfuerzo por parte del usuario al cambiar de medio durante el pedaleo. Debido a este inconveniente no se pudo terminar de realizar la prueba por lo que no se llegó a comprobar ni el empuje ejercido por la hélice ni los calados ni asiento.

Para poder arreglar este inconveniente del giro de los flotadores se ha procedido a la compra de dos tipos de solución. La primera, unos remos curvos a los que se le pondrá una capa de velcro para que envuelva el flotador al estilo Akwakat. La otra opción sería continuar nuestra estructura tubular

para envolver el flotador. Para conseguir esta idea tendrían que alargarse un poco los tubos transversales y con otras uniones de 90° similares a las que ya tenemos encuadrar los flotadores por la otra banda. Así conseguimos que aunque rotasen los flotadores la estructura siempre se mantendría por encima de ellos y conseguir así navegar.

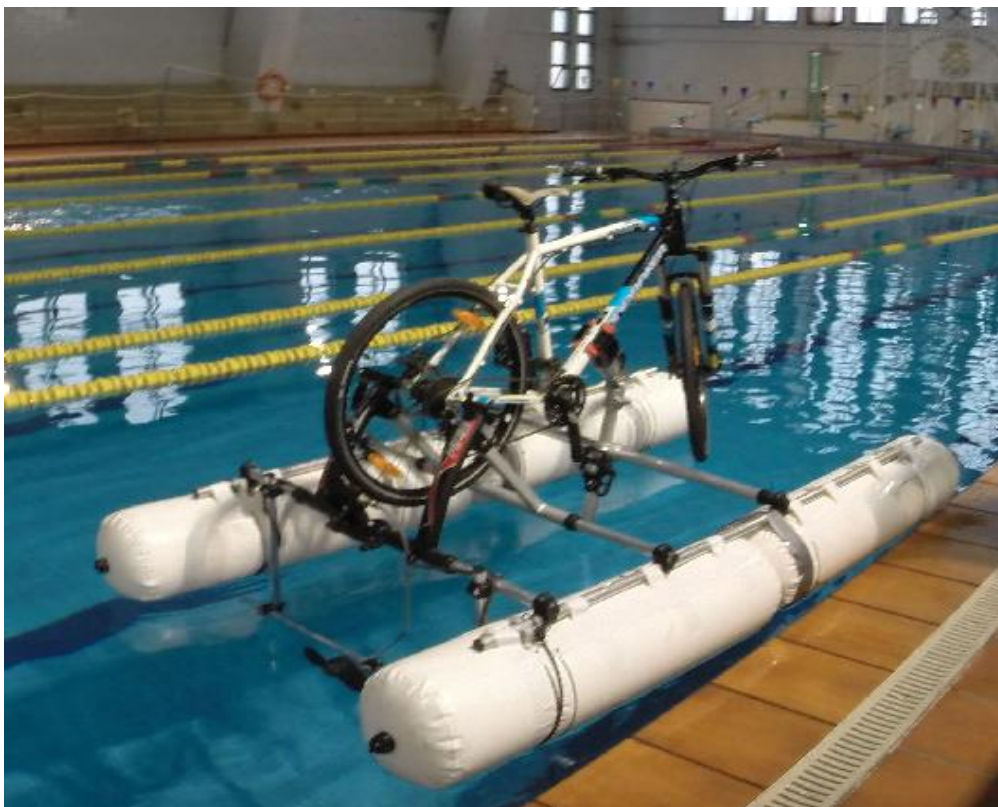


Figura 4-6 Ensayo con peso en rosca

4.2 Practicas en la ría

Debido a la falta de tiempo, por culpa de la espera de llegada de los diferentes materiales, no se han podido realizar todavía los ensayos programados en la ría. La finalidad de estas practicas es comprobar el comportamiento de la embarcación en zonas tranquilas como por ejemplo la dársena, donde las condiciones de viento y de mar se encuentran en un punto intermedio entre la piscina y el mar abierto, y consistiría en distintos tránsitos así como pruebas de embarque y desembarque de pesos desde al agua y desde tierra. El ensayo en aguas abiertas se pretende realizar en plena ría y consiste en el tránsito de una cara de la ría hasta la otra, con presencia de una embarcación rápida por seguridad de la navegación. La finalidad de esta ultima prueba es comprobar el comportamiento de la embarcación en condiciones aún más adversas que en la dársena y además tener una estimación de su utilidad para tránsitos de corta-media distancia, tanto por la velocidad que aporta el empuje de la hélice como del esfuerzo humano.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

En este apartado recordaremos los objetivos que nos hemos marcado y valoraremos si hemos cumplido o no los hitos necesarios:

- **Diseño de la hidrobicicleta:** Se han conseguido realizar todos los cálculos para el buen funcionamiento de nuestra máquina tanto en el aspecto estructural, como en el diseño de la transmisión, el cálculo de la estabilidad y el estudio de materiales.
- **Diseño CAD:** tomando como base una bicicleta genérica se ha conseguido realizar todo el conjunto de piezas de la estructura flotante así como su ensamblaje (Anexo I)
- **Montaje real:** Se ha realizado el montaje del prototipo (Anexo II)
- **Pruebas de mar:** Se han conseguido realizar algunas de las pruebas de mar que requería el prototipo para comprobar su funcionamiento, sin embargo no ha dado tiempo a realizar todas las que se plantearon en un principio.

Hito	Conseguido	No conseguido
Calculo estructural	X	
Calculo de la transmisión	X	
Cálculo de estabilidad	X	
Estudio de materiales	X	
Diseño del timón	X	
Estudio de la hélice		X
Diseño CAD	X	
Simulación CAD		X
Prototipo	X	
Practicas en laboratorio	X	

Prácticas en la piscina	X	
Prácticas en la ría		X
Reducción de costes	X	
Estructura desmontable	X	
Facilidad de transporte		X
Ligereza	X	
Facilidad de montaje	X	

Tabla 5-1 Tabla comparativa de objetivos conseguidos y no conseguidos

Vamos a observar ahora las tareas que se querían conseguir y valorar por qué no se han podido conseguir. Para ello nos centraremos en los distintos bloques:

- **Estudio:** El estudio se ha conseguido casi en su totalidad. El único punto que no se ha llegado a tratar es el estudio de la hélice. Este estudio no era objeto directo del trabajo y por ello se ha adquirido una comercial para conseguir un empuje mínimo para el movimiento de la embarcación. Su estudio era un hito extra que no se ha podido llevar a cabo.
- **CAD:** El diseño se pudo completar sin embargo la simulación no se ha llegado a hacer ya que las pruebas de la hidrobicicleta ya se han llevado a cabo con el prototipo por lo que no se vio necesario finalmente hacer la simulación CAD
- **Prototipo:** Se ha conseguido realizar el prototipo de la hidrobicicleta al completo (a la falta de unas mejoras de ultima hora). El único problema que presenta el prototipo fue la falta de anclajes para impedir la rotación de los pontones, debido al tiempo de entrega de los materiales para realizar esta reforma no hemos podido incluirlo en esta memoria de momento.
- **Pruebas de mar:** Se ha realizado tanto el estudio en laboratorio para comprobar que realmente se transmitía el movimiento de la rueda a la hélice como un estudio de estabilidad en seco para comprobar que la estructura soportaba distintos pesos. La prueba de la piscina se ha conseguido realizar y comprobar que realmente la hidrobicicleta flota y se mueve. Finalmente no hemos podido conseguir para el momento de la entrega de esta memoria la prueba definitiva de la hidrobicicleta que es la de practicas en la ría.
- **Características de la estructura:** Respecto a las características que queríamos que tuviese la estructura no se ha podido conseguir la facilidad de transporte al tener barras de hasta dos metros. Lo ideal hubiese sido adaptar barras de tamaños más pequeños para poder transportarla con facilidad en una mochila o algo similar. El resto de objetivos se han conseguido.

Un aspecto muy importante es el aspecto económico ya que la estructura flotante comercial más barata para una bicicleta ronda los 2200 euros. Uno de los objetivos era reducir este coste para que se pudiese tener una estructura mucho más asequible. En la Tabla 5-2 desglosamos los precios de los elementos que hemos adquirido:

Elemento	Precio (€)
Bancada con rodillo	90
Flotador	35(x4)
Hélice	20(x2)
Conjunto de tubos	70
Uniones acero de 40mm	70
Uniones de plástico 30mm	68
Abrazadera de proa	30
Transmisión	57(x2)

Tabla 5-2 Tabla de precios de los elementos de la estructura

Con estos precios obtenemos finalmente un precio aproximado de 630 €.

5.2 Líneas futuras

La función principal de este trabajo está conseguida, la adaptación de la bicicleta en hidrobicicleta, sin embargo debido al escaso tiempo no se han podido mejorar varios aspectos que a continuación desarrollaremos para su posterior mejora.

- **Materiales:** Los materiales utilizados para soportar la estructura no son los más adecuados desde un punto de vista estructural ya que las tuberías escogidas son para utilizar de recubrimiento de antenas y cables. Se debería optimizar este aspecto con materiales adaptados al entorno marino y con prestaciones estructurales mejores para evitar problemas a la hora de estar sometido durante cierto tiempo en este medio a diferentes esfuerzos.
- **Dimensiones:** La longitud de los tubos no han sido lo suficientemente pequeñas como para que sea fácilmente transportable. Se deberían de acortar los tubos o utilizar unos tubos telescópicos para que sea de fácil manejo a la hora de llevarlo en una mochila y poder realizar los trayectos tanto por mar y por tierra sin tener que dejar atrás el material.
- **Estética:** Con la llegada tardía de los últimos materiales no hemos podido potenciar este punto. Los flotadores tienen dibujadas en su superficie las características del fabricante, al igual que la bancada, y se nota la diferencia de unos materiales a otros. Sería una buena manera de mejorar este punto aplicando cierta pintura o recubrimiento que aparte de dar una mejor visión de la hidrobicicleta tuviese también algún tipo de material anticorrosivo para mejorar el comportamiento de los materiales al ambiente que les rodea. También estaría bien dotar sobre la rueda trasera de la bicicleta de unas alforjas como las que usan los peregrinos para hacer el camino de Santiago en las que se puedan guardar los elementos de la estructura y así ahorrar el llevar una mochila a la espalda.
- **Eficiencia:** Aumentar la eficiencia de la hidrobicicleta es un punto fundamental. Con los medios con los que contábamos hemos tenido que recurrir a su funcionamiento básico. Para mejorar este punto se tendrían que buscar unos flotadores que fuesen únicos en cada banda, en lugar de dos como el prototipo. Además mejoraríamos en eficiencia dotándole de una forma hidrodinámica en la proa. Mejoraríamos también el rendimiento de la potencia que ofrecemos al pedalear utilizando una hélice propia para la hidrobicicleta, eligiéndola a través de un estudio detallado de los requisitos que necesita. A la hora de mejorar la eficiencia también entra en juego el reparto de pesos. En nuestro caso al tener el amarre de la proa tan cerca del centro de gravedad genera que la mayor parte del peso recaiga sobre la

proa, mientras que con un método más apropiado para el amarre delantero se podría conseguir que la mayor parte del peso esté en la popa y mejorar así tanto el asiento como la fricción con el rodillo

- **Factor económico:** Hay que tener en cuenta que al ser el prototipo se ha gastado dinero en partes sobredimensionadas, que incluían objetos que no necesitábamos o que se han derrochado parte del material haciendo pruebas, por lo que una vez teniendo optimizada la bicicleta se podría conseguir una estructura como la estudiada a un precio incluso menor.

6 BIBLIOGRAFÍA

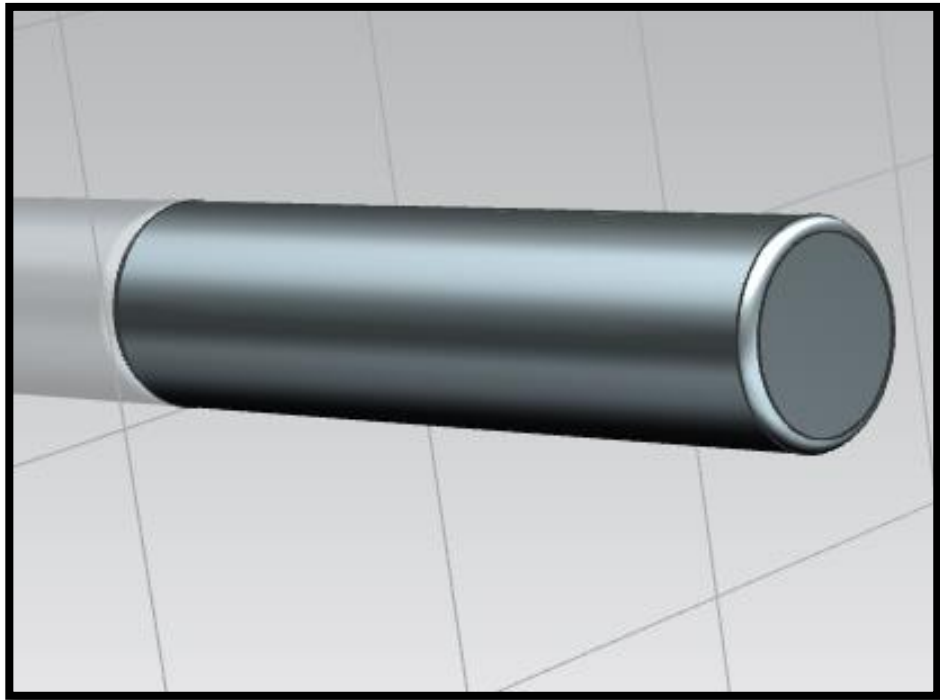
- [1] J. A. Moreno, Actividades acuáticas recreativas, Universidad de Murcia.
- [2] M. d. Defensa, Reales ordenanzas para las fuerzas armadas.
- [3] I. L. d. l. c. educativa, «Los barcos de remo y vela».
- [4] B. Dumbleton, Story of the paddle Steamer, Intellect Book, 2002.
- [5] A. española, ICP-03 Estabilidad del buque, 2015.
- [6] M. Glaskin, Cycling science, University of Chicago Press, 2012.
- [7] «Akwakat,» [En línea]. Available: www.akwakat.co.uk. [Último acceso: 8 01 2016].
- [8] «Shuttle Bike,» [En línea]. Available: www.shuttlebike.com.
- [9] «Schiller,» [En línea]. Available: schillerbikes.com.
- [10] Ferroplast, *Catalogo de tuberias*.
- [11] «Duarry,» [En línea]. Available: <http://duarrydifusion.com>. [Último acceso: 6 02 2016].
- [12] «Rk rose+krieger,» [En línea]. Available: www.rk-rose-krieger.com. [Último acceso: 25 02 2016].
- [13] J. M. Gere, Mecánica de materiales, Cengage, 2009.
- [14] G. R. Cuixeres, Dimensionamiento, predicción de potencia y diseño de hélices y timones, Facultad de nautica de Barcelona, 2011.
- [15] «MecanESO,»[Enlínea].Available: http://concurso.cnice.mec.es/cnice2006/material107/mecanismos/mec_rueda_friccion.htm. [Último acceso: 15 02 2016].
- [16] J. A. collins, Mechanical design of machine elements and machines, Ohio state university.
- [17] J. S. Real, La fisica de la bicicleta, De la torre, 1988.
- [18] «Amtriathlon,» [En línea]. Available: www.amtriathlon.com.

- [19] A. B. Biran, Ship Hydrostatics and stability, Elsevier, 2014.
- [20] «Psycho Snail,» [En línea]. Available: <http://www.psychosnail.com/boatspeedcalculator.aspx>. [Último acceso: 09 02 2016].
- [21] Mondraker, «Catálogo de bicicletas y características». 2011.

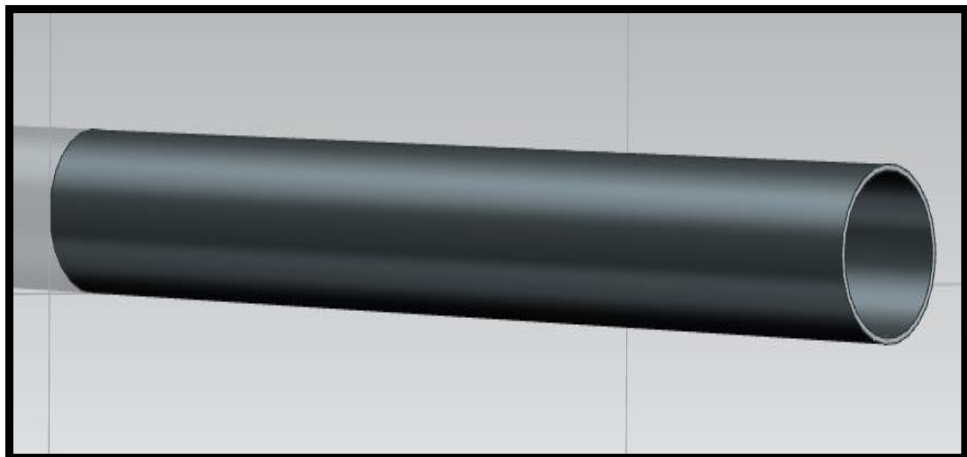
ANEXO I: DISEÑO EN SIEMENS NX 10.0

- **ESTRUCTURA FLOTANTE**

1. Flotadores

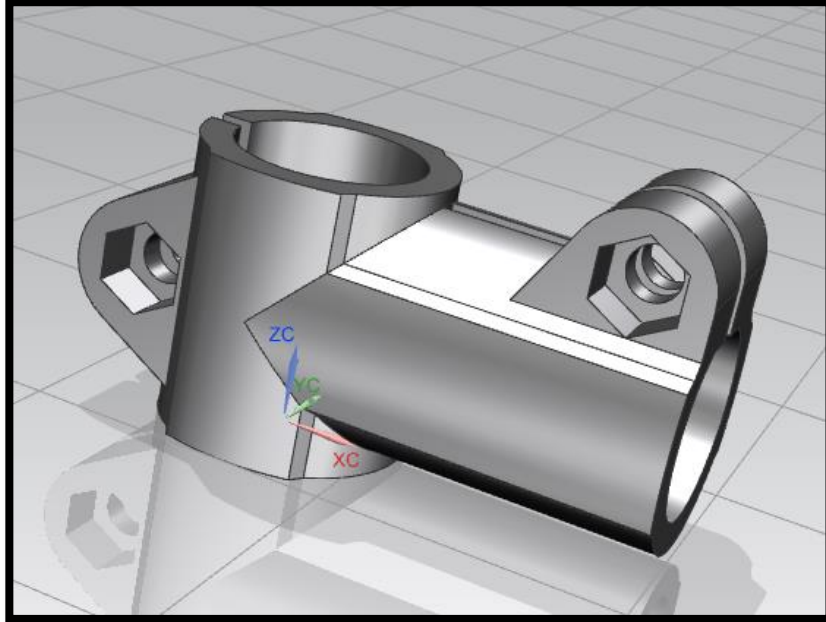


2. Tubos

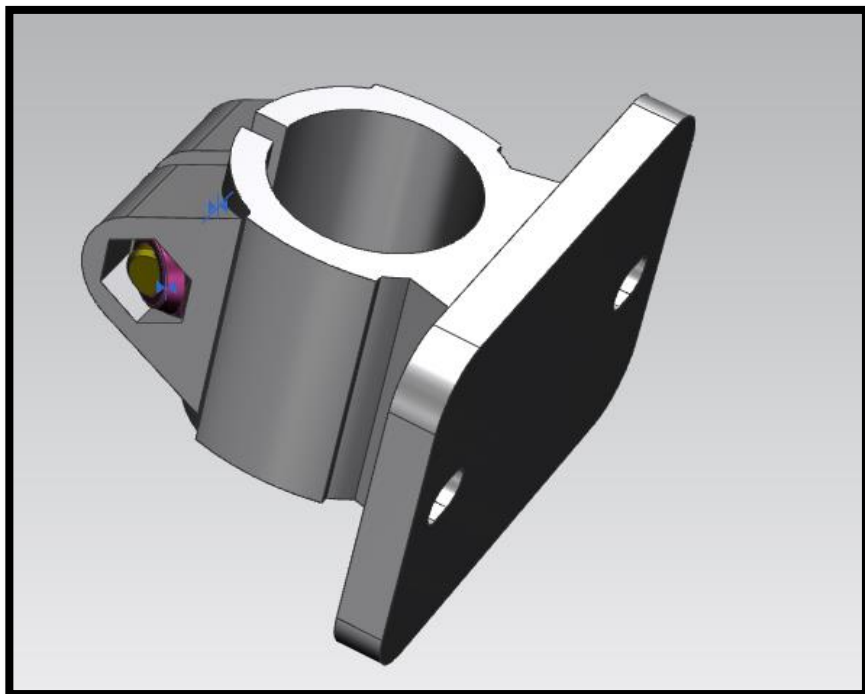


3. Uniones

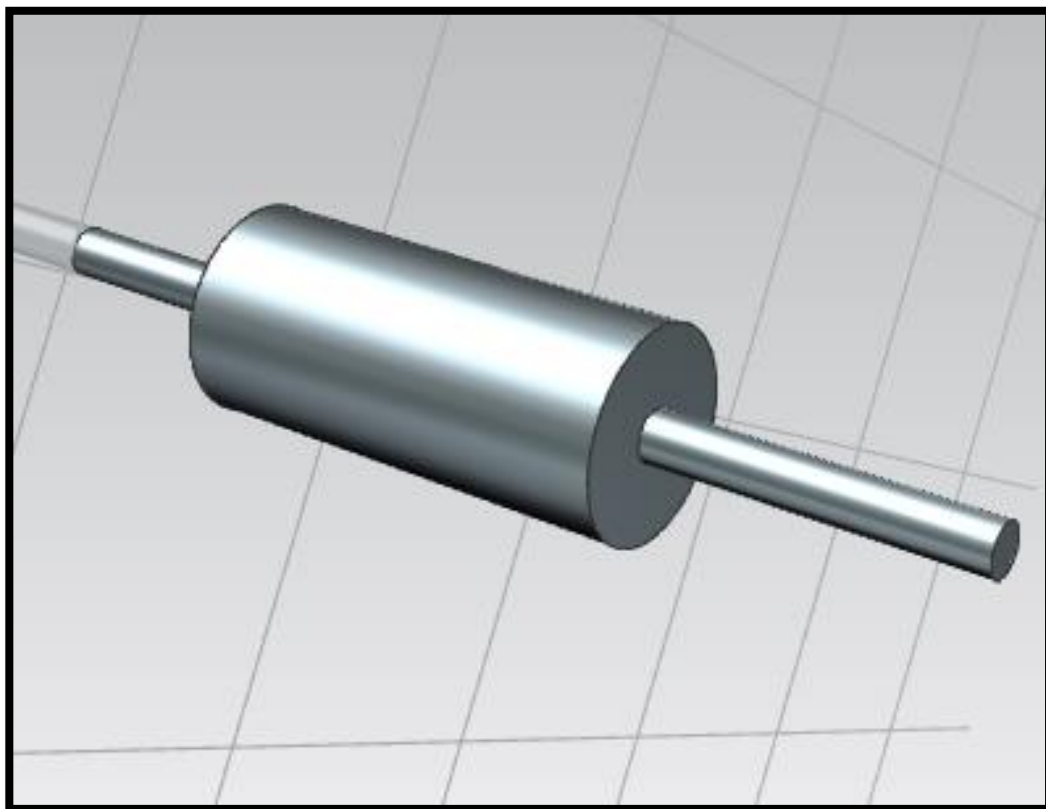
3.1 Unión 90°



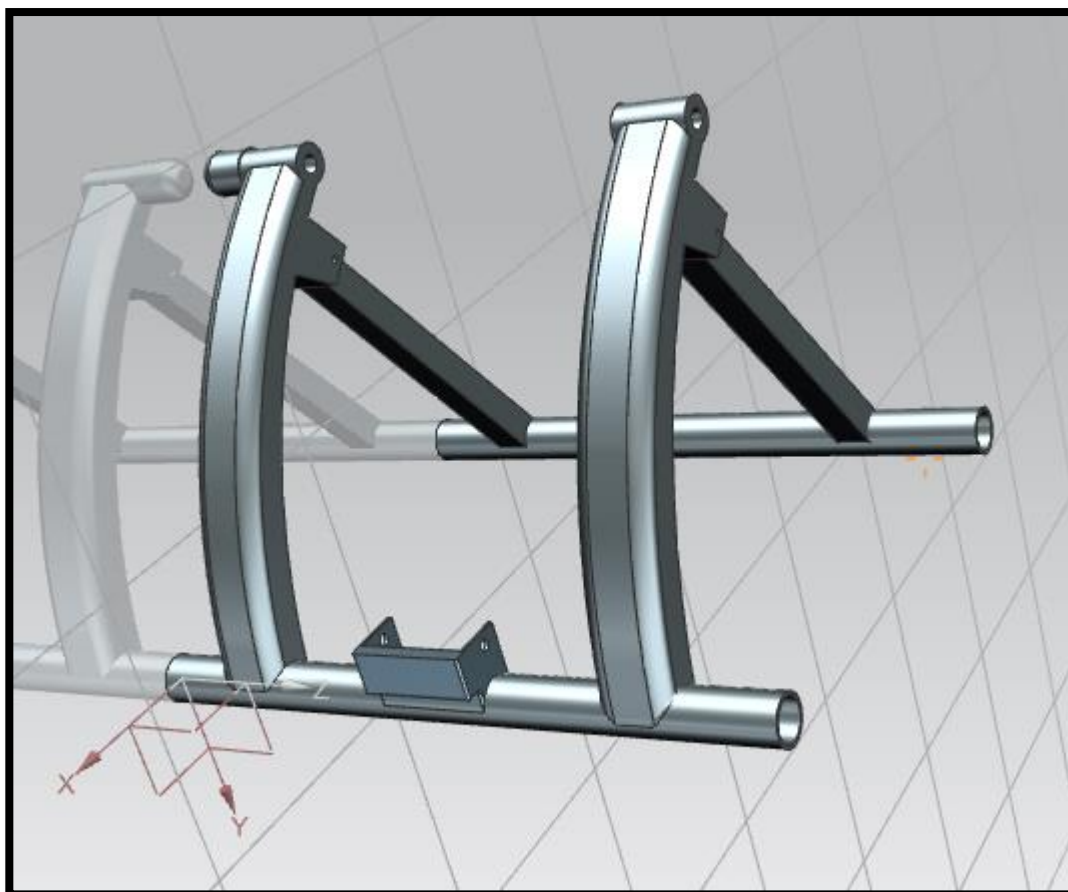
3.2 Unión recta



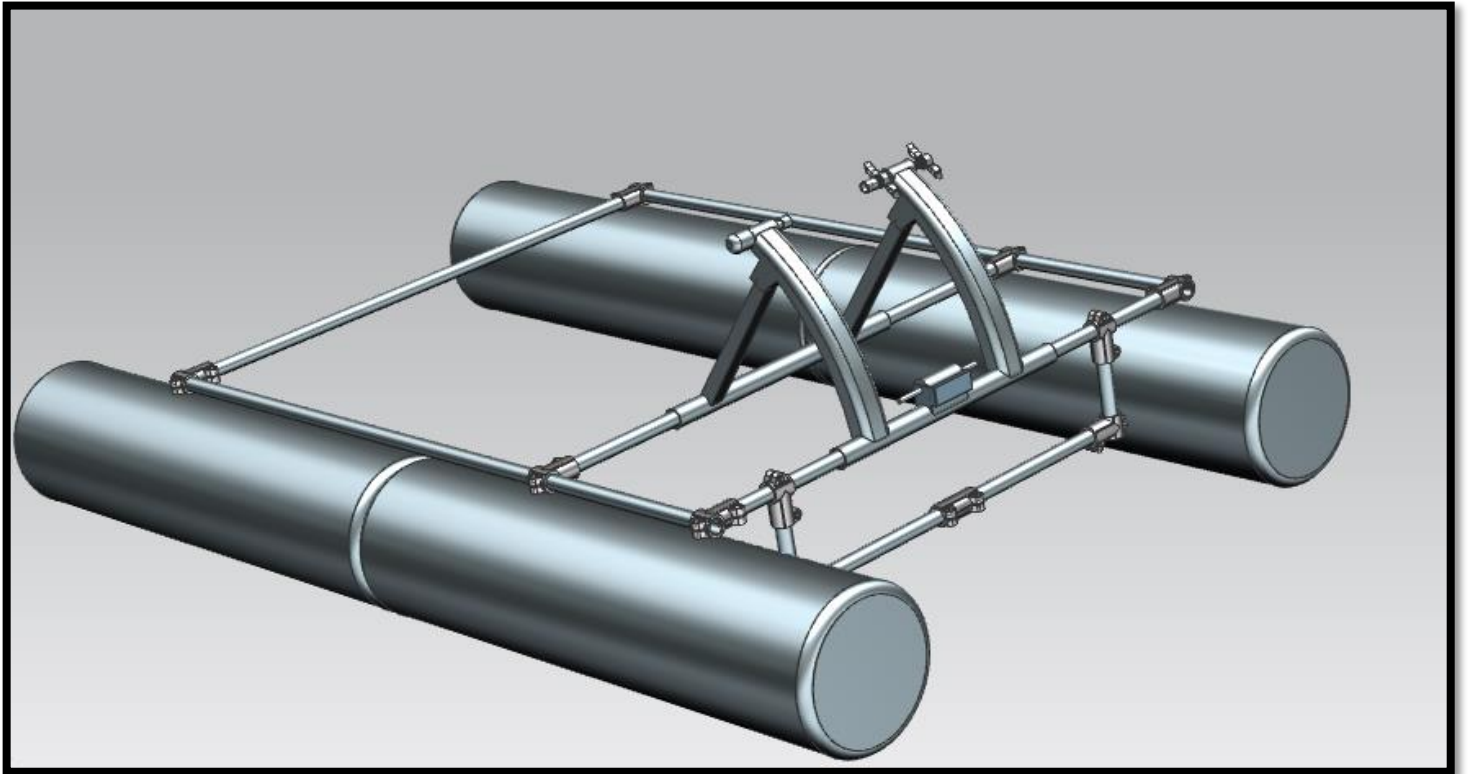
4. Rodillo



5. Bancada del rodillo

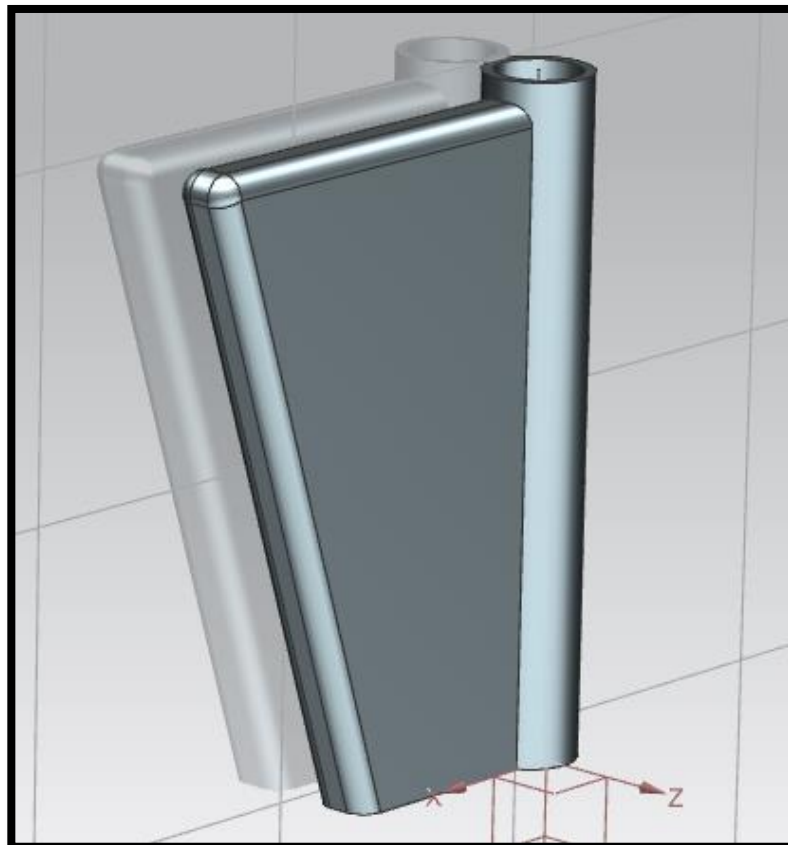


6. Ensamble de la estructura flotante

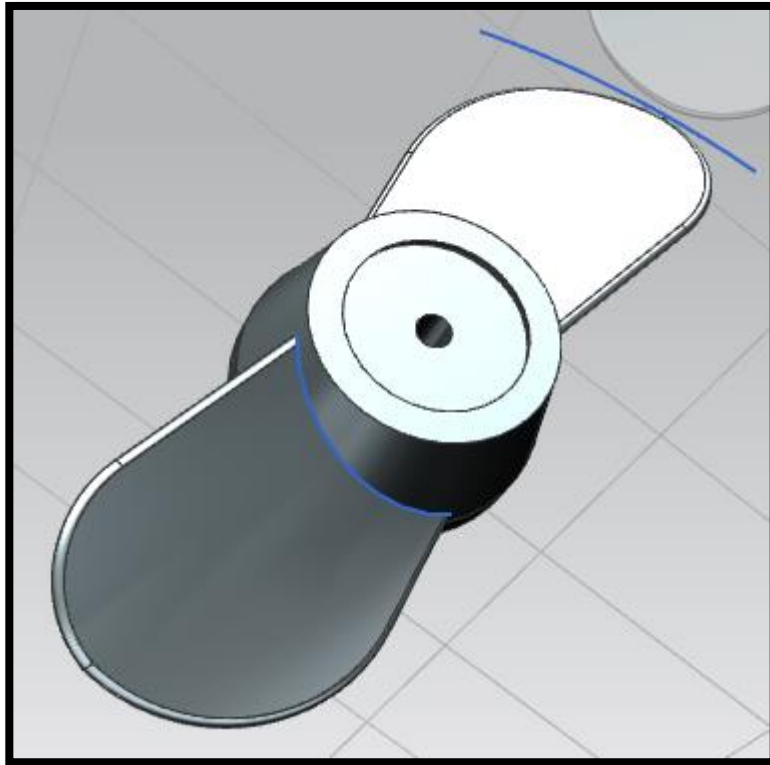


- **PROPULSIÓN Y DIRECCIÓN**

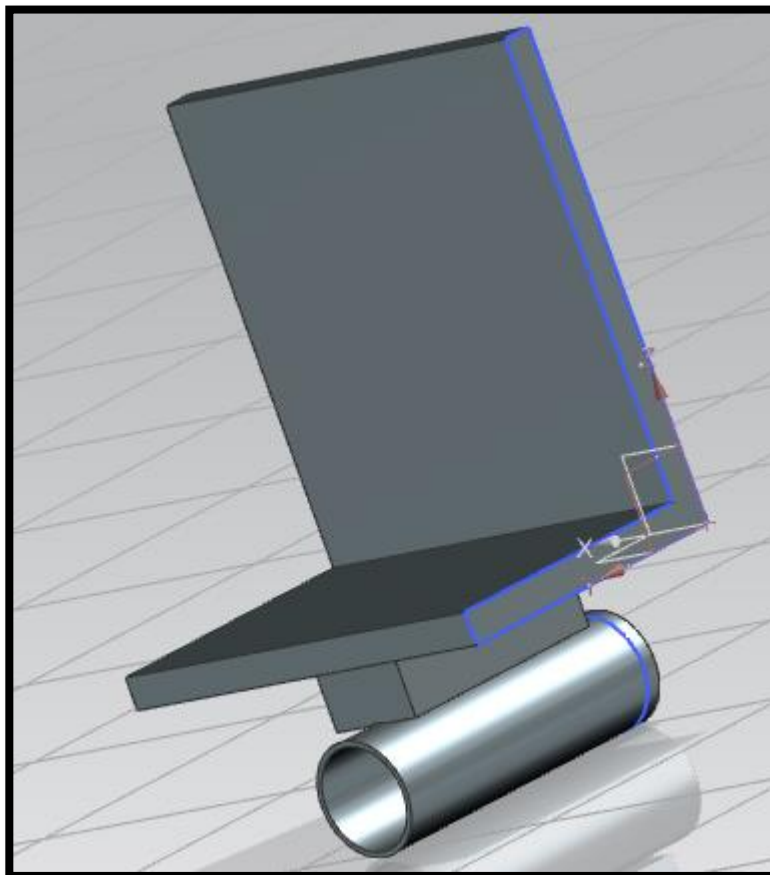
1. Timón



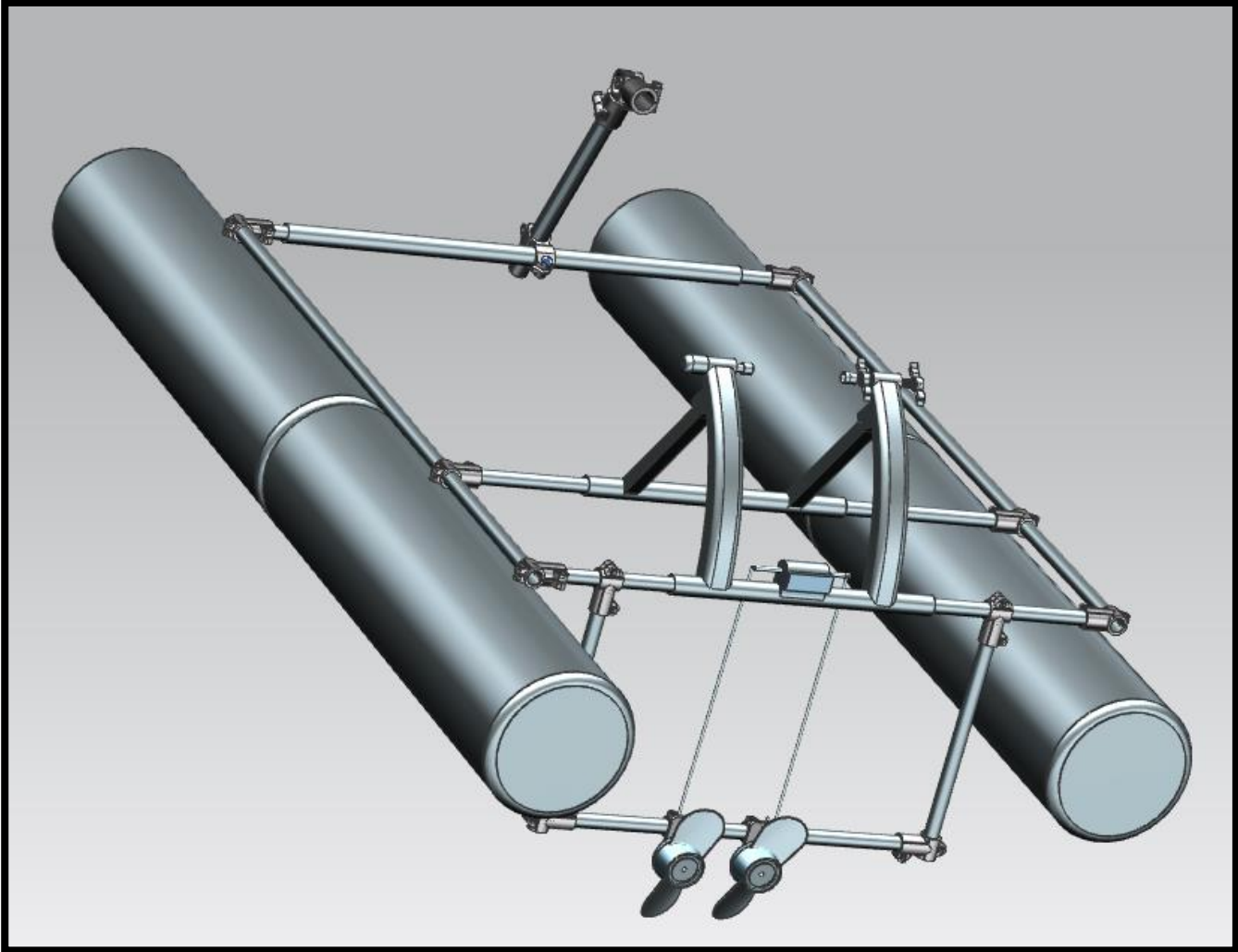
2. Hélice



3. Eje de la hélice



- **ENSAMBLAJE FINAL**



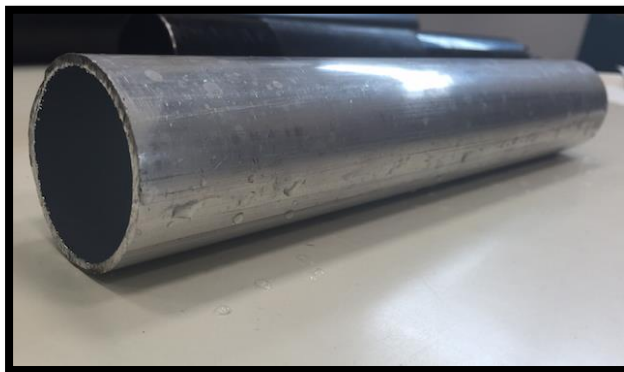
ANEXO II: MONTAJE DE LA HIDROBICICLETA

- **ESTRUCTURA FLOTANTE**

1. Flotadores

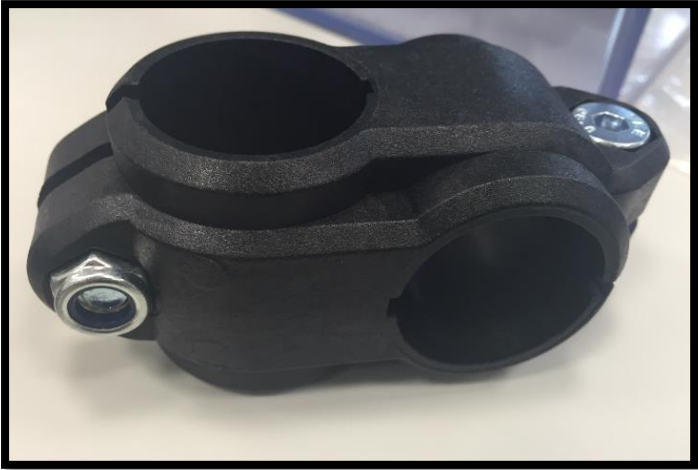


2. Tubos



3. Uniones





4. Rodillo



5. Pasa-remos



6. Abrazadera de proa



7. Bancada



- Ensamblaje de la estructura tubular.



- **PROPULSIÓN Y DIRECCIÓN**

1. Acople de la transmisión



2. Transmisión flexible



3. Hélice.



4. Eje de la hélice



5. Timón



- **ENSAMBLAJE FINAL DE LA ESTRUCTURA**



- **HIDROBICICLETA**

