

# Diseño y simulación de un cuadricóptero acuático

**Trabajo Final de Master**



**Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño  
Universitat Politècnica de València

Trabajo realizado por:  
**Joan Xavier Gràcia Borreguero**

Dirigido por:  
**Vicente Fermín Casanova Calvo**

Máster en Ingeniería Mecatrónica

Valencia, 6/5/2022

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



---

# Agradecimientos

A Stefano Andreoni y a Samuel Diéguez.

Gracias por la ayuda y los conocimientos que habéis compartido conmigo. Sin vosotros, esta etapa nunca habría sido tan provechosa.

---

# Resumen

El objetivo de este trabajo es diseñar un cuadricóptero acuático capaz de auto estabilizarse y desplazarse sobre la superficie del agua.

La metodología empleada en cada una de las fases del proyecto es bastante variada, debido al amplio alcance del mismo y la diversidad de los apartados que lo integran:

- En primer lugar, se explican las características del artilugio y se exponen sus requisitos de funcionamiento.
- A continuación, se modelan las piezas mediante el software de diseño 3D "SolidWorks".
- Posteriormente, se realiza un ensayo de estabilidad sobre las formas diseñadas.
- El siguiente paso consiste en la implementación de un modelo de simulación mediante el software "Simulink".
- Una vez realizado el modelo, se procede a la implementación de su sistema de control. Primeramente, se realiza un control de actitud y altura, y posteriormente un control de posición.
- Una vez desarrollado el controlador del sistema, se ajustan sus parámetros experimentalmente y se procede a la toma de resultados, los cuales se exponen mediante gráficas.
- Complementariamente, se determinan los parámetros de impresión y se imprime una maqueta del prototipo mediante impresión 3D.
- Finalmente, se propone el hardware para una hipotética implementación real y se elabora el presupuesto del proyecto.

El resultado final es un trabajo que engloba varias disciplinas del mundo de la ingeniería y el diseño, y que abre una puerta como punto de partida para la implementación de un prototipo real.

---

# Abstract

The aim of this work is to design an aquatic quadcopter able to self-stabilizing and to move automatically on a water surface.

The methodology used in each one of the different phases of this project is quite diverse, due to the wide scope of this one and the diversity of the sections which it is composed:

- Firstly, the main characteristics of the gadget are explained and it is exposed the requirements of its operation.
- Next, by using the 3D design software “SolidWorks” the pieces are modelled.
- Afterwards, a stability test of the pieces designed is done.
- The next step consists of the implementation of a simulation model through the software “Simulink”.
- Once the model is done, the process of implementation of its control system begins. Firstly, it is conducted an attitude and height control, and later a position control.
- Once the controlling system is developed, its parameters are adjusted experimentally and the results are taken, which are shown in graphs.
- Additionally, the parameters of printing are determined and a 3D mock-up of the prototype is printed out.
- Finally, the hardware for a hypothetical real implementation is proposed and a budget of the project is provided.

The final result is a work that encompasses various disciplines of the engineering and design fields, which opens a new gate as a starting point for the implementation of a real prototype.

---

# Índice

<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>IV</b>
<b>LISTADO DE ILUSTRACIONES</b>	<b>VII</b>
<b>LISTADO DE GRÁFICAS</b>	<b>X</b>
<b><u>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.</u></b>	<b><u>1</u></b>
<b>1.1 OBJETIVO, MOTIVACIÓN Y ALCANCE DEL TRABAJO.</b>	<b>1</b>
<b>1.2 IDEA CONCEPTUAL DEL PROTOTIPO</b>	<b>1</b>
<b>1.3 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA</b>	<b>2</b>
<b><u>CAPÍTULO 2. DISEÑO DE PIEZAS.</u></b>	<b><u>4</u></b>
<b>2.1 PATINES</b>	<b>4</b>
<b>2.2 TRAMPOLÍN</b>	<b>6</b>
<b>2.3 CAJA ESTANCA</b>	<b>7</b>
<b>2.4 MOTORES</b>	<b>9</b>
<b>2.5 HÉLICES</b>	<b>10</b>
<b><u>CAPÍTULO 3. ANÁLISIS HIDROSTÁTICO DE ESTABILIDAD.</u></b>	<b><u>12</u></b>
<b><u>CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN CON SIMSCAPE MULTIBODY.</u></b>	<b><u>17</u></b>
<b>4.1 REALIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE LAS HÉLICES</b>	<b>17</b>
4.1.1 CÁLCULO DEL EMPUJE EFECTUADO POR LAS HÉLICES	17
4.1.2 CÁLCULO DEL PAR EJERCIDO POR LAS HÉLICES	20
<b>4.2 ENSAMBLAJE DEL MODELO</b>	<b>22</b>
4.2.1 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE AVANCE DE LAS HÉLICES	26
4.2.2 PARTICULARIDADES DEL MODELO PARA EL CONTROL DE ACTITUD	27
4.2.3 PARTICULARIDADES DEL MODELO CON MÁS GRADOS DE LIBERTAD	28
<b><u>CAPÍTULO 5. DISEÑO DEL REGULADOR.</u></b>	<b><u>29</u></b>
<b>5.1 ELECCIÓN DEL TIPO DE REGULADOR</b>	<b>29</b>
<b>5.2 CONTROL DE ACTITUD Y ALTURA</b>	<b>32</b>
5.2.1 CONTROL DE ALABEO	34

---

5.2.2 CONTROL DE CABECEO	35
5.2.3 CONTROL DE GUIÑADA	35
5.2.4 CONTROL DE ALTURA	36
5.2.5 ACTUACIÓN DE LAS ACCIONES DE CONTROL SOBRE LAS HÉLICES	36
5.2.6 ESTRUCTURA FINAL DEL CONTROL DE ACTITUD Y ALTURA	37
5.2.7 SINTONIZACIÓN DE LAS GANANCIAS DE LOS CONTROLADORES	39
5.2.8 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIAS	43
5.2.9 PRUEBAS DE RESPUESTA ANTE PERTURBACIONES	55
<b>5.3 CONTROL DE POSICIÓN</b>	<b>57</b>
5.3.1 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO DE REFERENCIAS	59
<b>CAPÍTULO 6. IMPRESIÓN 3D DEL PROTOTIPO.</b>	<b>61</b>
<b>6.1 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN</b>	<b>62</b>
6.1.1 ALTURA DE CAPA	63
6.1.2 NUMERO DE PAREDES	63
6.1.3 PORCENTAJE Y TIPO DE RELLENO	64
6.1.4 TEMPERATURA DE IMPRESIÓN	65
6.1.5 ESTRUCTURAS DE SOPORTE	66
<b>6.2 TIEMPOS DE IMPRESIÓN Y PESOS</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 7. SUGERENCIAS PARA UNA IMPLEMENTACIÓN REAL.</b>	<b>68</b>
<b>7.1 HARDWARE SUGERIDO PARA EL SISTEMA DE CONTROL</b>	<b>68</b>
7.1.1 MICRO CONTROLADOR	68
7.1.2 UNIDAD DE MEDIDA INERCIAL	69
7.1.3 MAGNETÓMETRO	69
7.1.4 SENSOR DE ULTRASONIDOS	70
7.1.5 GPS	70
7.1.6 MOTORES	71
7.1.7 DRIVERS DE LOS MOTORES	71
7.1.8 TARJETA WIFI	72
7.1.9 BATERÍA	72
<b>7.2 PRESUPUESTO</b>	<b>73</b>
7.2.1 CÁLCULO DEL COSTE DE LA IMPRESIÓN 3D	73
7.2.2 DESGLOSE TOTAL DEL PRESUPUESTO	74
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES.</b>	<b>75</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO 1. PIEZAS REALIZADAS MEDIANTE IMPRESIÓN 3D</b>	<b>80</b>

---

---

<b>A1.1 PATÍN BB_PR</b>	<b>80</b>
<b>A1.2 BARRAS DEL TRAMPOLÍN</b>	<b>82</b>
<b>A1.2 ESTRUCTURA COMPLETA</b>	<b>83</b>
<b><u>ANEXO 2. CÁLCULO DEL COSTE DE LA IMPRESIÓN 3D</u></b>	<b><u>84</u></b>
<b>A2.1 BARRAS DEL TRAMPOLÍN</b>	<b>84</b>
<b>A2.2 PATÍN ESTRIBOR-PROA</b>	<b>85</b>
<b>A2.3 PATÍN BABOR-PROA</b>	<b>86</b>
<b>A2.4 PATÍN ESTRIBOR-POPA</b>	<b>87</b>
<b>A2.5 PATÍN BABOR-POPA</b>	<b>88</b>



---

# Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Idea del cuadricóptero acuático .....	2
Ilustración 2. Diseño de los patines.....	4
Ilustración 3. Formas del casco .....	5
Ilustración 4. Cuadernas.....	5
Ilustración 5. Barra del trampolín .....	6
Ilustración 6. Hendidura indicadora de la línea de crujía en las barras del trampolín.....	6
Ilustración 7. Caja de conexiones IP68 [1].....	7
Ilustración 8. Modelado de la caja para la electrónica.....	7
Ilustración 9. Saliente de la caja de la electrónica .....	8
Ilustración 10. Punto central entre las hélices .....	8
Ilustración 11. Plano de los motores [2].....	9
Ilustración 12. Modelo 3D de un motor .....	9
Ilustración 13. Barrido rectangular sobre la espiral de la hélice .....	10
Ilustración 14. Extrusión del corte del perfil de la pala y generación del eje .....	11
Ilustración 15. Hélice .....	11
Ilustración 16. Fuerzas hidrostáticas del buque en reposo[3] .....	12
Ilustración 17. Fuerzas hidrostáticas con el buque escorado[4] .....	13
Ilustración 18. Formas importadas a "Maxsurf Modeler" .....	13
Ilustración 19. Proa antes y después del refinado en "Maxsurf Modeler" .....	14
Ilustración 20. Definición del marco de referencia de la embarcación.....	14
Ilustración 21. Modelo final de "Maxsurf" .....	15
Ilustración 22. Configuración del análisis de estabilidad .....	15
Ilustración 23. Gráfica de la Serie B de Wageningen para una relación $Ad/Ao$ de 0,55[7].....	18
Ilustración 24. Diagrama de bloques de la ecuación del empuje.....	19
Ilustración 25. Cálculo erróneo del empuje con 0 rpm .....	20
Ilustración 26. Diagrama de bloques del cálculo del empuje con el error a 0 rpm solucionado .....	20
Ilustración 27. Diagrama de bloques del cálculo del par .....	22
Ilustración 28. Movimientos de alabeo cabeceo y guiñada [8].....	22
Ilustración 29. Bloque "File Solid" .....	23

---

Ilustración 30. Definición de los "Frames" de un sólido.....	23
Ilustración 31. Conexión entre distintos sólidos .....	24
Ilustración 32. Conexión patín-motor-eje-hélice .....	25
Ilustración 33. Subsistema de par y empuje de la hélice .....	25
Ilustración 34. Implementación de la superficie del agua.....	26
Ilustración 35. Conexión del cuadricóptero con la unión esférica .....	27
Ilustración 36. Diagrama de bloques de la unión del sistema con la articulación esférica.....	27
Ilustración 37. Visión general del modelo en Simscape .....	28
Ilustración 38. Helicóptero volando del revés[9] .....	29
Ilustración 39. Estructura de un proceso controlado mediante un PID [10].....	30
Ilustración 40. Estructura de un regulador P.....	30
Ilustración 41. Estructura de un regulador PI.....	31
Ilustración 42. Previsión del error futuro gracias a la derivada [11] .....	31
Ilustración 43. Estructura de un regulador PD .....	32
Ilustración 44. Estructura de un regulador PID .....	32
Ilustración 45. Unión de la embarcación con el "Frame" del mundo con 4 GDL .....	33
Ilustración 46. Configuración de límites superior e inferior en la articulación prismática .....	33
Ilustración 47. Regulador PD modificado (estructura del control de alabeo).....	34
Ilustración 48. Bloque "Slider Gain" .....	34
Ilustración 49. Estructura del control de cabeceo.....	35
Ilustración 50. Estructura del control de guiñada .....	35
Ilustración 51. Estructura del control de altura.....	36
Ilustración 52. Actuación de las acciones de control sobre las hélices .....	37
Ilustración 53. Salida de las variables a controlar .....	37
Ilustración 54. Elementos para determinar las referencias de actitud y altura .....	38
Ilustración 55. Diagrama de bloques de todo el conjunto .....	39
Ilustración 56. Paso de embarcación a flote a embarcación en vuelo .....	48
Ilustración 57. Introducción de perturbaciones en el modelo .....	55
Ilustración 58. Implementación del control de posición .....	58
Ilustración 59. Estructura del control de posición.....	58
Ilustración 60. Ejemplo de impresión 3D [12] .....	61

---

Ilustración 61. Errores de impresión causados por voladizos [13].....	62
Ilustración 62. Pieza bien posicionada .....	62
Ilustración 63. Paredes de uno de los patines.....	63
Ilustración 64. Relleno de los patines.....	64
Ilustración 65. Relleno de las barras del trampolín.....	65
Ilustración 66. Soportes impresión 3D .....	66
Ilustración 67. Arduino uno[16] .....	68
Ilustración 68. Sensor MPU-6050.....	69
Ilustración 69. Sensor HMC5883L[17].....	69
Ilustración 70. Sensor HC-SR04 [18].....	70
Ilustración 71. Sensor GY-GPS6MV2 [19].....	70
Ilustración 72. Motor sin escobillas A2212 [2].....	71
Ilustración 73. Driver XDD ESC 30A [20].....	71
Ilustración 74. Tarjeta WIFI para Arduino [21].....	72

---

# Listado de gráficas

Gráfica 1. Curva GZ de la embarcación .....	16
Gráfica 3. Sintonizado analítico del control de cabeceo .....	40
Gráfica 4. Sintonizado analítico del control de alabeo.....	41
Gráfica 5. Sintonizado analítico del control de guiñada.....	42
Gráfica 6. Seguimiento de la referencia de cabeceo.....	44
Gráfica 7. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de cabeceo.....	44
Gráfica 8. Seguimiento de referencia sinusoidal de cabeceo.....	45
Gráfica 9. Seguimiento de la referencia de alabeo .....	45
Gráfica 10. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de alabeo .....	46
Gráfica 11. Seguimiento de referencia sinusoidal de alabeo .....	46
Gráfica 12. Seguimiento de la referencia de guiñada .....	47
Gráfica 13. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de guiñada .....	47
Gráfica 14. Seguimiento de referencia sinusoidal de guiñada .....	48
Gráfica 15. Seguimiento de la referencia de altura.....	49
Gráfica 16. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de altura .....	50
Gráfica 17. Acciones de control para cambio de $10^\circ$ en la referencia de cabeceo .....	51
Gráfica 18. Acciones de control para cambio de $10^\circ$ en la referencia de alabeo.....	52
Gráfica 19. Acciones de control para cambio de $10^\circ$ en la referencia de guiñada.....	53
Gráfica 20. Acciones de control durante la puesta en vuelo de la embarcación .....	54
Gráfica 21. Seguimiento de referencias nulas ante perturbación de 5 N .....	56
Gráfica 22. Acciones de control ante perturbación de 5 N .....	57
Gráfica 23. Seguimiento de la referencia de posición en X.....	59
Gráfica 24. Seguimiento de la referencia de posición en Y .....	59
Gráfica 25. Seguimiento de referencias sinusoidales simultaneas .....	60
Gráfica 26. Temperatura de impresión en función de la velocidad [15].....	65

# Capítulo 1. Introducción.

## 1.1 Objetivo, motivación y alcance del trabajo.

El objetivo de este trabajo es diseñar un cuadricóptero flotante capaz de mantenerse “en vuelo” y auto estabilizarse gracias al empuje proporcionado por sus hélices, las cuales deben permanecer en todo momento dentro del agua.

La idea surge con la intención de buscar una temática de TFM que englobe la mayoría de disciplinas que se han estudiado durante el Master en Ingeniería Mecatrónica. Durante el diseño y la implementación de este prototipo, se prevé tocar disciplinas como: el diseño 3D, la simulación y control de sistemas mecatrónicos, el uso de máquinas CNC (impresoras 3D), etc.

Otro aspecto relativo a la elección del trabajo, es el hecho de que no se conoce que hasta la fecha se haya construido nada similar. Por tanto, la innovación se convierte en el principal aspecto motivador para la elección de este proyecto.

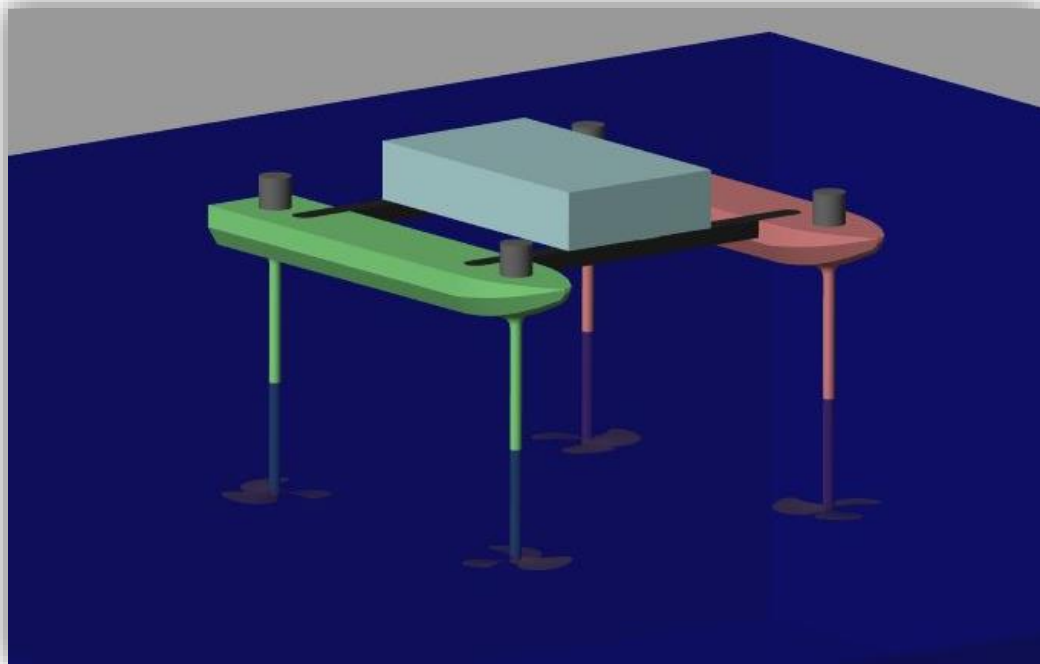
El alcance del proyecto consiste en:

- El diseño de las piezas del prototipo mediante “SOLIDWORKS”
- La adaptación del diseño para impresión 3D
- El análisis hidrostático de estabilidad de la embarcación
- La simulación del cuadricóptero y de su sistema de control (implementando tanto un control de actitud y altura como un control de posición)
- La determinación los parámetros de los reguladores PID de los sistemas de control a partir de la simulación.
- La construcción de una maqueta del prototipo mediante impresión 3D
- La propuesta del posible hardware para una hipotética construcción real del prototipo

## 1.2 Idea conceptual del prototipo

Como se comenta en el apartado anterior, la idea consiste en el diseño de un cuadricóptero flotante. Este artilugio, el cual podría categorizarse como embarcación voladora, es similar a los cuadricópteros o drones voladores convencionales. Pero con la particularidad de que sus hélices están acopladas a unos largos ejes encargados de brindar la separación suficiente para que las hélices estén siempre dentro del agua y el resto de embarcación quede totalmente a fuera.

Como se prevé que durante su uso haya momentos en los que los motores no estén funcionando, también es imprescindible dotar al prototipo de algún casco que le aporte flotabilidad y estabilidad en estas condiciones. Para ello, se decide elegir un diseño tipo catamarán, en el que dos patines aporten dicha flotabilidad y la integridad estructural necesaria.



**Ilustración 1. Idea del cuadricóptero acuático**

El funcionamiento de esta embarcación es análogo al de los cuadricópteros aéreos convencionales, los cuales deben utilizar sus cuatro hélices para estabilizarse. De tal manera que si existe alguna perturbación que intente inclinarlos hacia algún lado, las hélices de dicho lado deben girar más rápido para compensarla y así mantener la aeronave lo más plana posible.

De igual manera, la propulsión de la aeronave hacia una dirección determinada, se consigue variando su actitud (inclinación). Con ello, se logra que el flujo de aire que utiliza el cuadricóptero para sustentarse varíe ligeramente su dirección, logrando su avance por principio de acción-reacción.

En el caso del cuadricóptero acuático, el funcionamiento es el mismo. Pero a diferencia del dron convencional, el fluido con el que interactúan las hélices es el agua. Este hecho aporta una serie de particularidades, ya que dicho fluido se comporta de una manera ligeramente diferente que el aire. Además, el hecho de que las hélices que propulsan y estabilizan la embarcación se sitúen tan por debajo del centro de gravedad de la misma, dificulta notablemente el control de la misma.

Con el fin de conseguir el funcionamiento expuesto anteriormente, se debe implementar un sistema de control capaz de determinar la velocidad de giro de las hélices para que la embarcación tenga el comportamiento deseado. En los próximos capítulos se aborda el diseño de la embarcación y la implementación y simulación de dicho sistema de control.

### **1.3 Organización de la memoria**

Los capítulos que se presentan a continuación, muestran de forma cronológica todos los apartados que se han abordado durante la realización del trabajo.

Cabe decir que, en varias ocasiones, algunas constataciones o aspectos que se han detectado en determinados apartados han obligado a modificar o a replantear parte de apartados anteriores. Por lo tanto, aunque se siga un hilo cronológico, también se puede afirmar que este documento se ha basado en un proceso iterativo.

En todos los capítulos se explica la metodología empleada y los resultados obtenidos.

## Capítulo 2. Diseño de piezas.

El diseño de las piezas se realiza mediante el software de diseño 3D “SOLIDWORKS”, el cual presenta un manejo bastante intuitivo y permite exportar las piezas en los formatos compatibles con los otros programas con los que se va a trabajar.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta a la hora de diseñar las piezas, es que sus formas deben ser óptimas para la impresión 3D. Esto afecta tanto a las formas de las mismas (conviene evitar voladizos, saltos y discontinuidades); como al tamaño, ya que la impresora que se tiene en cuenta (*Geeetech A10*) presenta unas medidas reducidas (**220x220x260 mm**). Con lo cual es necesario diseñar algunas piezas en varias partes con la intención de pegarlas una vez imprimidas.

### 2.1 Patines

Para aprovechar al máximo las dimensiones de la cama de impresión, los patines se diseñan en dos partes (del través hacia proa, y del través hacia popa). Dichas partes presentan una pestaña en la zona de unión con el fin de aportar solidez a la misma.

A parte de la pestaña para el acople entre las dos piezas, también se realiza una hendidura para poder encajar las barras del trampolín (barras encargadas de unir el patín de babor con el de estribor).

Además, también se deben tener en cuenta los agujeros (pasa cascos) por los cuales pasaran los ejes de las hélices. Se decide prolongar un cilindro para albergar dichos ejes hasta su extremo con el fin de aportar integridad y reducir posibles deformaciones y vibraciones de los ejes durante el funcionamiento.

A continuación, se muestran las imágenes de los patines dónde se pueden apreciar todas estas particularidades de diseño:

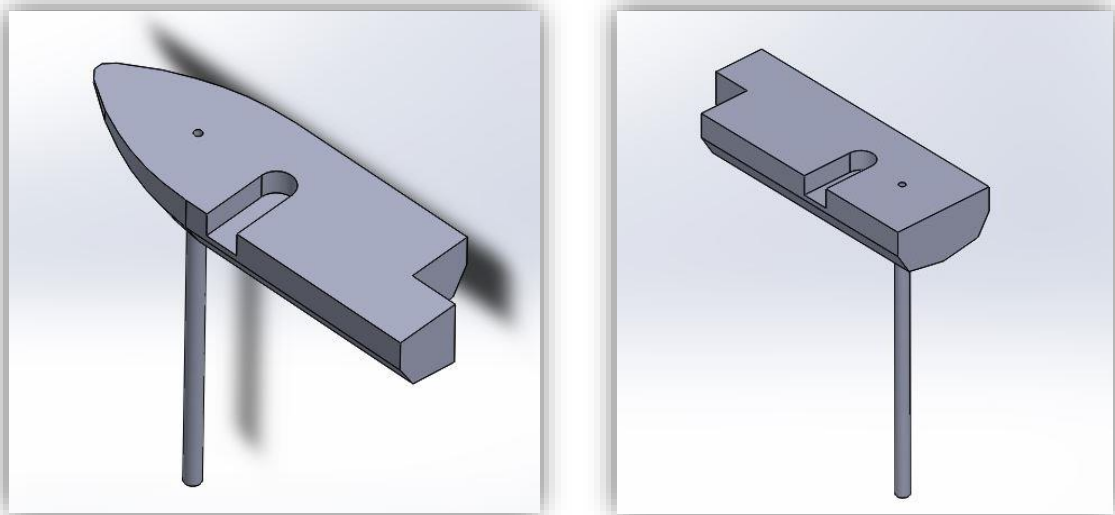
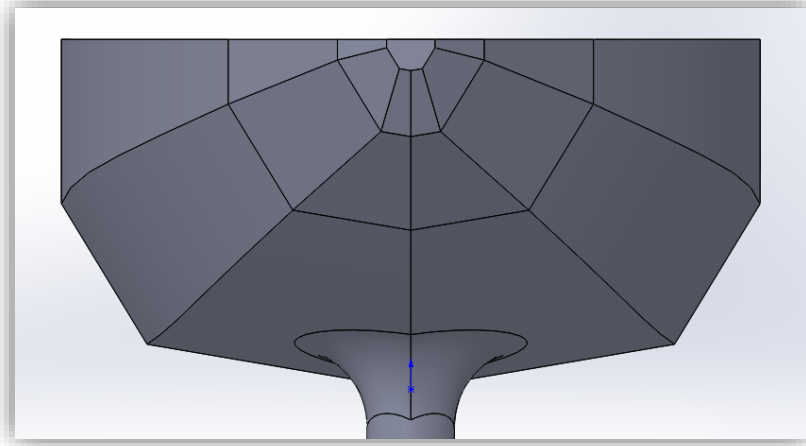


Ilustración 2. Diseño de los patines

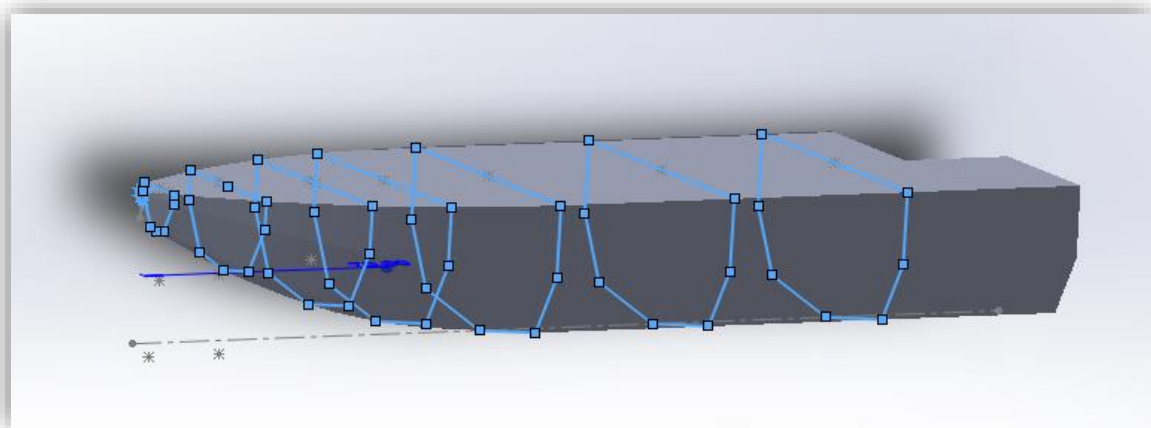


Las formas del casco se diseñan formando un modelo multi-pantoque. Este tipo de diseño, es ampliamente usado en embarcaciones de una sola tirada (embarcaciones que se fabrican una a una sin técnicas de construcción en serie) dada su simplicidad de diseño y construcción y sus buenas prestaciones hidrodinámicas.



**Ilustración 3. Formas del casco**

Para el diseño del modelo en SolidWorks se han croquizado las formas de las distintas cuadernas que conforman los patines y posteriormente se ha generado el sólido empleando operaciones de recubrimiento entre dichas cuadernas.



**Ilustración 4. Cuadernas**

El resto del diseño de los patines se realiza con operaciones de corte, extrusión y redondeo.

Como en condiciones normales de funcionamiento los patines tienen que ir fuera del agua, no se considera necesario realizar un análisis hidrodinámico. Por otro lado, como que su función es aportar flotabilidad y estabilidad, en apartados posteriores se realizará un estudio hidrostático de estabilidad.

## 2.2 Trampolín

Se conoce como trampolín a las barras encargadas de unir los dos patines.

Al igual que con los patines, también se realiza un diseño en dos piezas debido a las reducidas dimensiones de la cama de la impresora 3D.

Las dimensiones de la barra están pensadas para encajar en las hendiduras de los patines. El acople entre las dos barras está formado por una hendidura la cual presenta dos agujeros para poder pasar dos tornillos de unión.

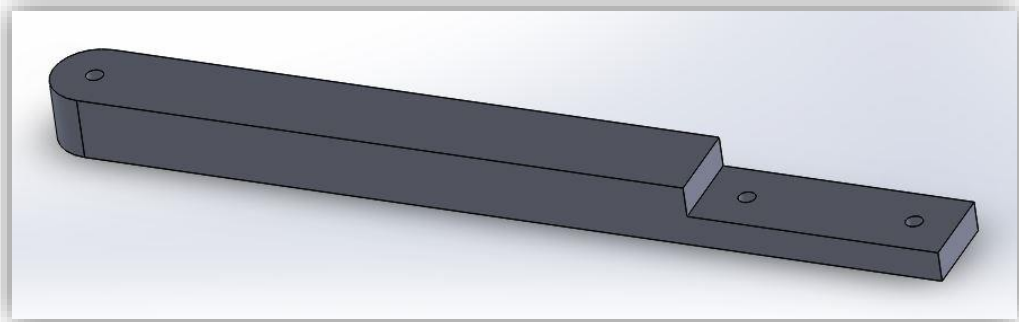


Ilustración 5. Barra del trampolín

Las cuatro piezas que conforman las dos barras del trampolín son idénticas.

Para facilitar el posterior ensamblaje con “*Simscape Multibody*” se realiza una pequeña hendidura que marca la línea de crujía (línea central) de la embarcación.

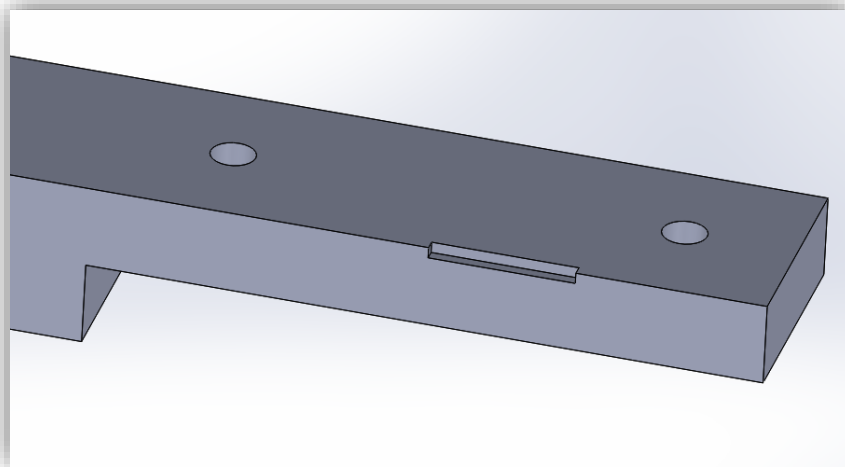


Ilustración 6. Hendidura indicadora de la línea de crujía en las barras del trampolín

### 2.3 Caja estanca

Para albergar y proteger del agua los componentes electrónicos se decide usar una caja de conexiones IP68 como la que se muestra a continuación:



Ilustración 7. Caja de conexiones IP68 [1]

Para el modelo 3D con el que posteriormente se realizará un análisis dinámico se decide simplificar la caja a un sencillo ortoedro:

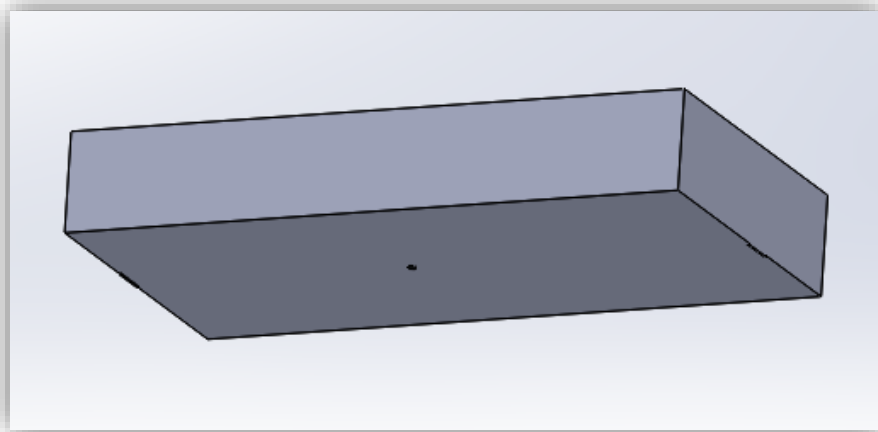
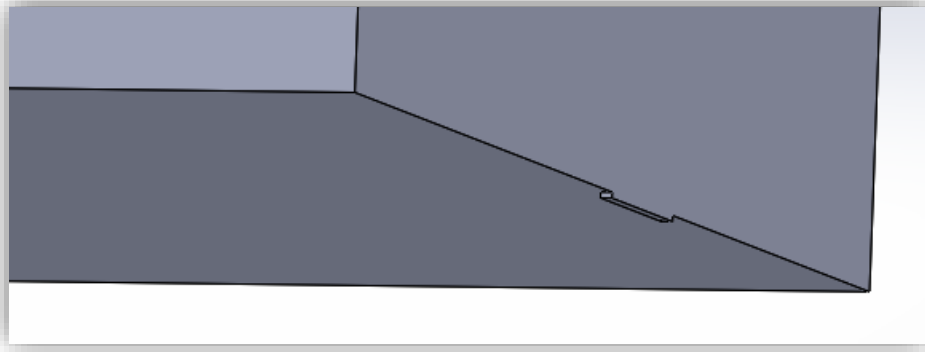


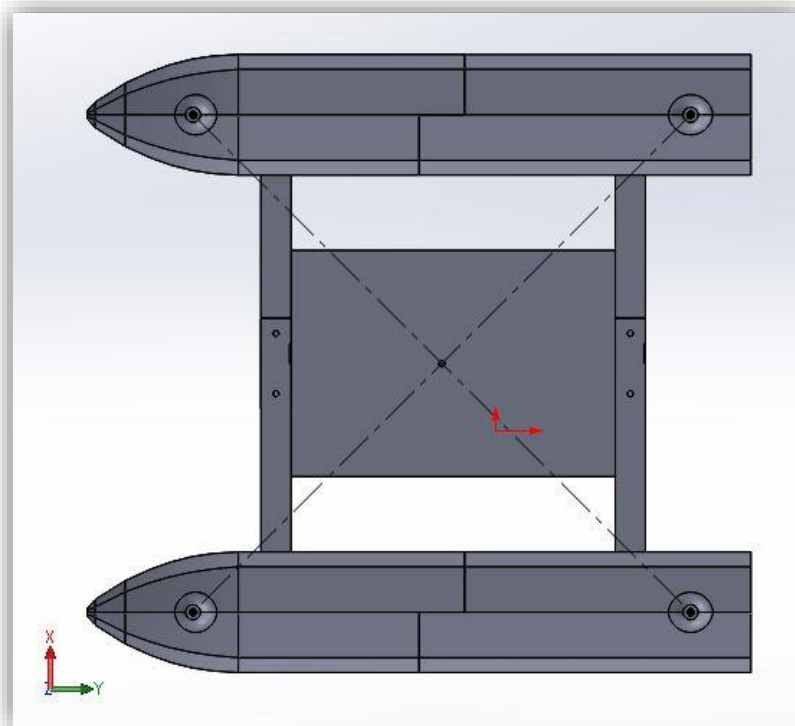
Ilustración 8. Modelado de la caja para la electrónica

Si se aprecia con detenimiento, se puede observar que en la parte central de las aristas de la caja hay un pequeño saliente. Al igual que en las barras del trampolín, su cometido es indicar la parte central de la caja para facilitar su ensamblaje en Simscape.



**Ilustración 9. Saliente de la caja de la electrónica**

A parte, también hay una pequeña prolongación cilíndrica en el centro de la caja. Su cometido es indicar la proyección del punto central entre las cuatro hélices del catamarán. Para saber su localización, se ha montado el ensamblaje en SolidWorks y se ha buscado la intersección entre las líneas imaginarias que unen los cuatro ejes de las hélices.



**Ilustración 10. Punto central entre las hélices**

## 2.4 Motores

Los motores que se tienen en cuenta para el diseño de la embarcación, son motores sin escobillas A2212, los cuales están indicados especialmente para modelismo.

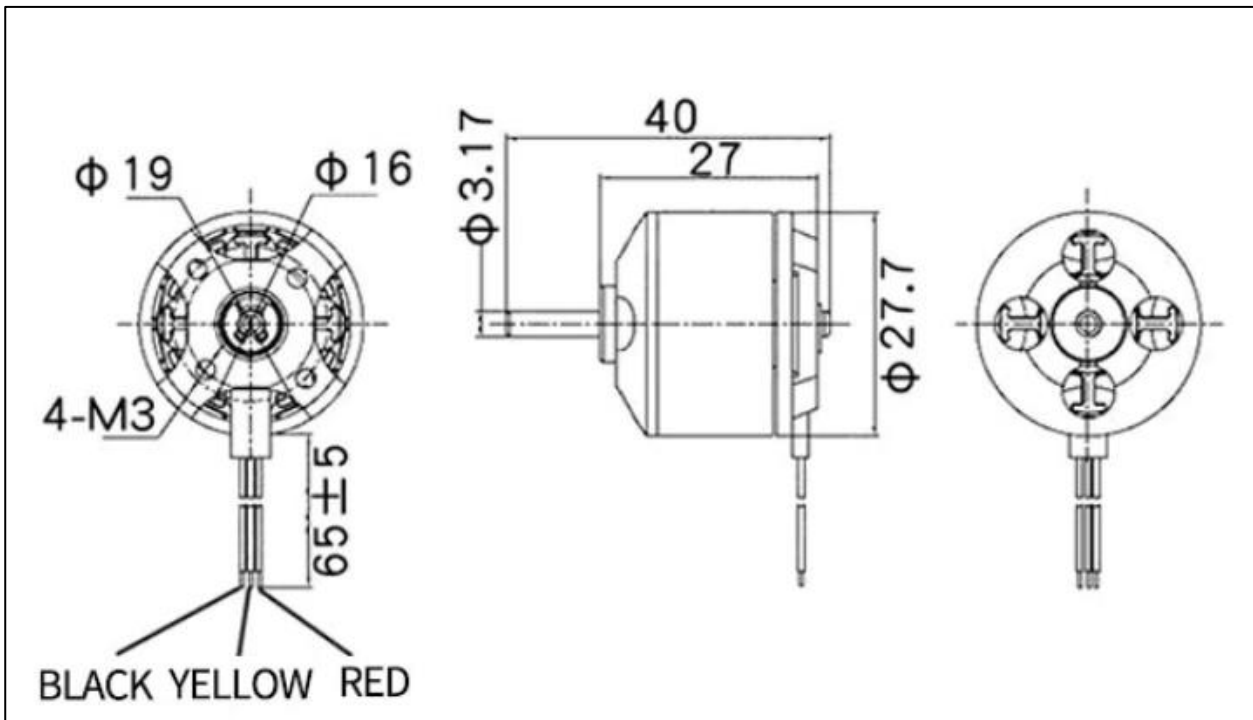


Ilustración 11. Plano de los motores [2]

Para el modelo 3D, se han simplificado a dos cilindros unidos por su parte central:

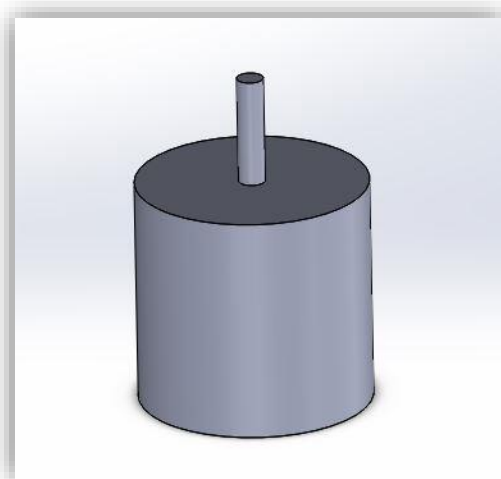
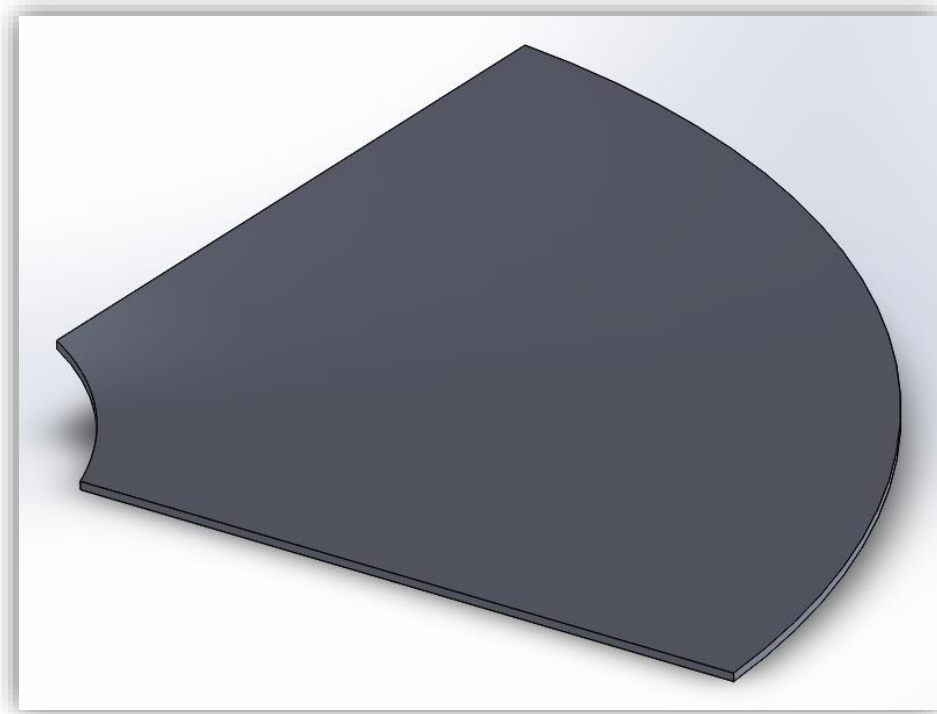


Ilustración 12. Modelo 3D de un motor

## 2.5 Hélices

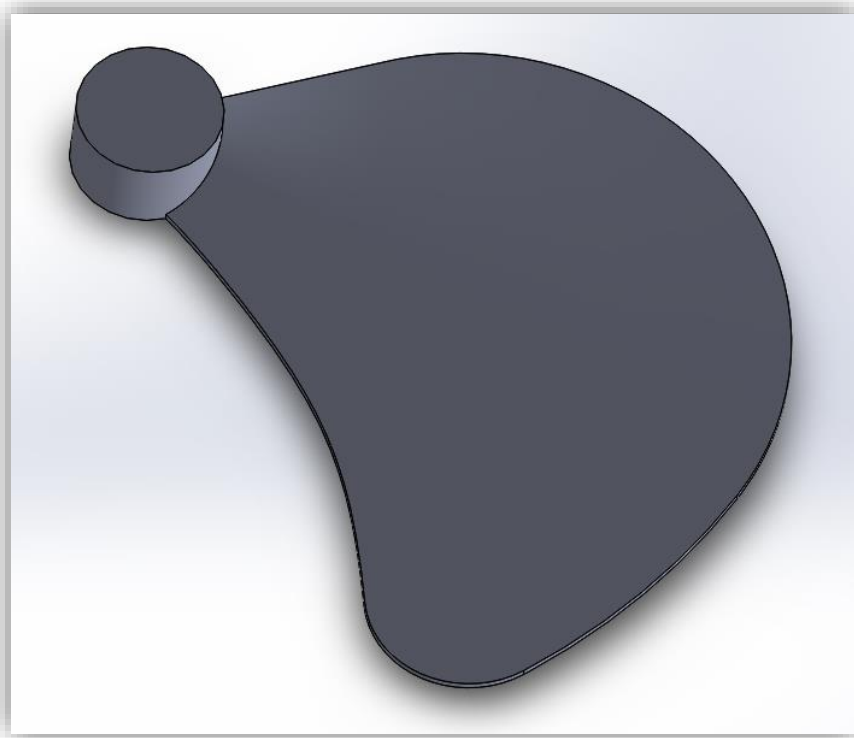
Al igual que en un quadricóptero aéreo, dos hélices tienen que girar en un sentido y las otras dos en otro. Así, se consigue que entre unas y otras se compensen los momentos rotatorios que ejercen, y regulando sus velocidades se puede jugar con dichos momentos para controlar el movimiento de guiñada de la embarcación. Por este motivo es necesario realizar un diseño de hélice que gire a derechas (hélice dextrógira) y otro que gire a izquierdas (hélice levógira).

El diseño de las hélices parte de la generación de una espiral sobre la cual se realiza un barrido rectangular, obteniendo la siguiente forma:



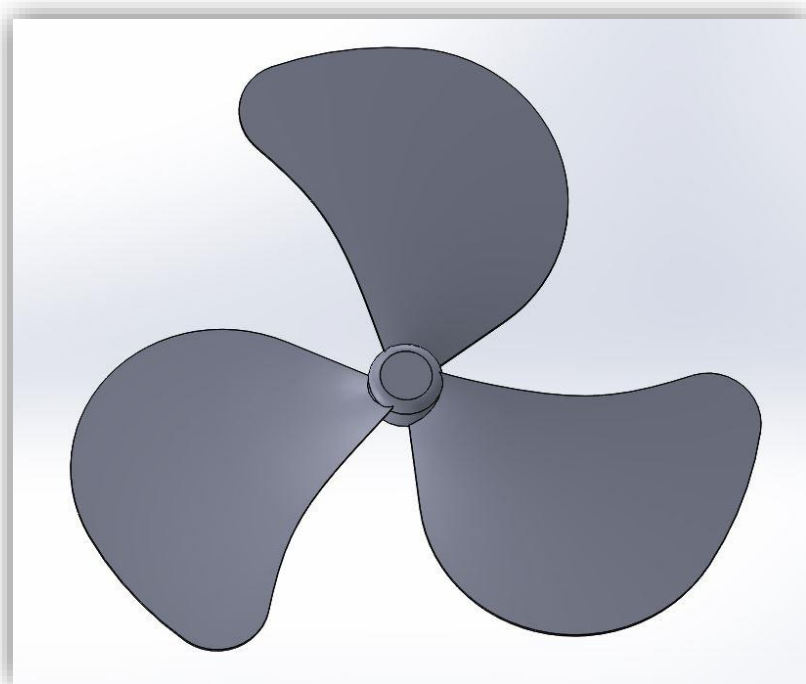
**Ilustración 13. Barrido rectangular sobre la espiral de la hélice**

Una vez realizado el barrido, se croquiza el perfil de una pala y se procede a extruir un corte a partir de dicho croquis. A parte, se extruye el cilindro que hará de eje.



**Ilustración 14. Extrusión del corte del perfil de la pala y generación del eje**

Finalmente, se copian las palas mediante una matriz circular y se pulen algunos detalles con operaciones de redondeo y corte.



**Ilustración 15. Hélice**





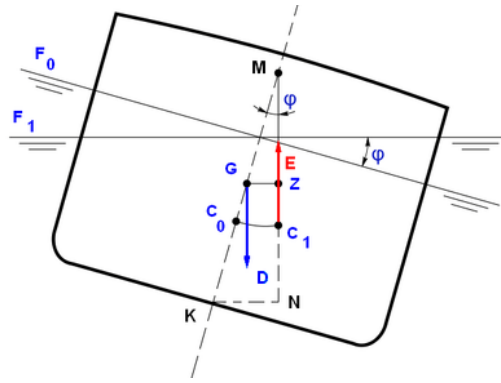


Ilustración 17. Fuerzas hidrostáticas con el buque escorado[4]

Al desplazarse el centro de carena, la fuerza del desplazamiento y la del empuje ya no están alineadas, y como resultado se crea un par que hace volver a la embarcación a su posición estable, dicho par se llama par adrizante. Como se aprecia en la imagen anterior, el brazo que crea el citado par es la distancia entre los puntos  $G$  y  $Z$ , por este motivo se llama brazo  $GZ$ . [5].

La curva **GZ**, representa el valor de dicho brazo para cada uno de los ángulos de escora (alabeo) a los que se pueda someter la embarcación. Observándola, es posible hacerse una idea de la estabilidad de un casco ya que permite analizar el valor del par adrizante para cada ángulo y observar cuando dicho par es nulo (y por tanto la embarcación se vuelve inestable y vuelca).

Para trazar la curva  $GZ$  se usan los softwares “Maxsurf Modeler” y “Maxsurf Stability”.

El primer paso consiste en exportar las formas de la embarcación, las cuales se han diseñado con “SolidWorks” a un formato que “Maxsurf Modeler” pueda leer. Este paso no es trivial, ya que “Modeler” (que es un programa pensado para diseñar cascos des de cero) presenta ciertos problemas de compatibilidad a la hora de importar formatos provenientes de otros softwares.

Para exportar la embarcación des de “SolidWorks” al “Modeler”, se guarda el ensamblaje de media embarcación (la otra mitad se generará en el “Modeler” mediante simetría) en formato **.SLDPRT** luego se vuelve a abrir este archivo desde “SolidWorks” y se guarda en formato **.IGS**. Una vez hecho esto, ya se puede abrir el **.IGS** con “Maxsurf Modeler” (indicando qué ejes corresponden a cada una de las direcciones de la embarcación). El resultado es el siguiente:

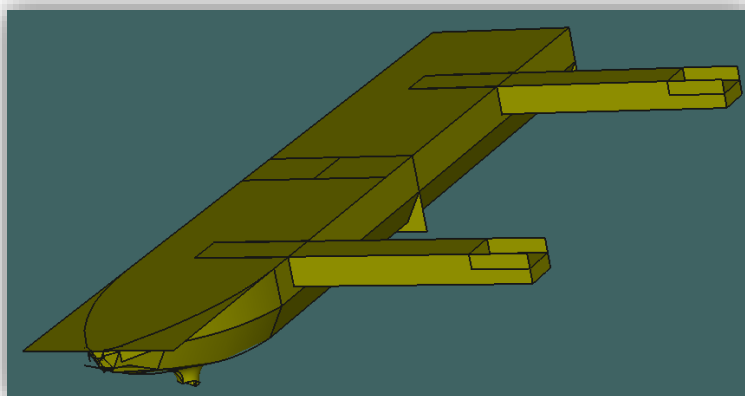


Ilustración 18. Formas importadas a “Maxsurf Modeler”

Como se puede observar, las formas importadas presentan una serie de errores. Esto es debido a que "Maxsurf Modeler" importa las superficies del .IGS sin "trimar" (recortar unas superficies con las otras). Por este motivo, es necesario realizar un refinado del modelo "trimando" las superficies necesarias y eliminando superficies no deseadas:

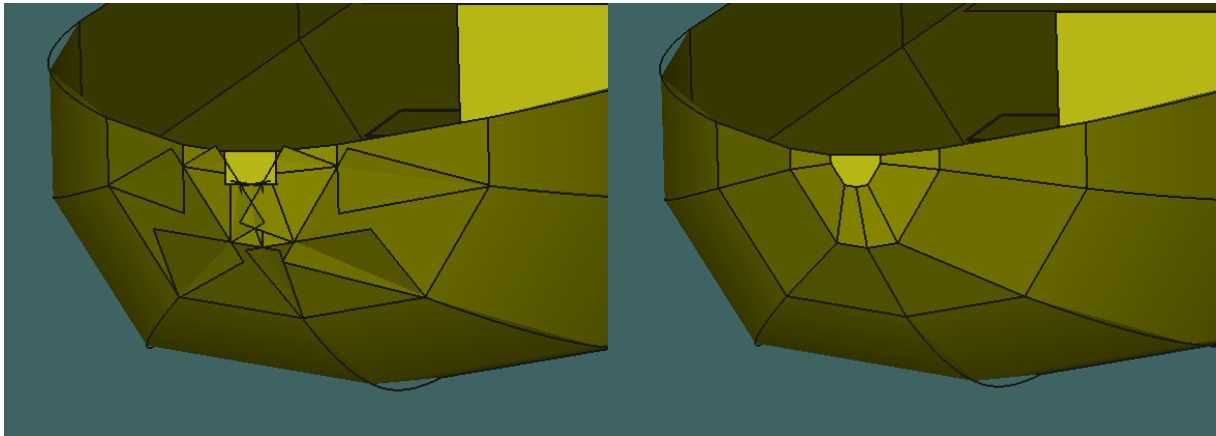


Ilustración 19. Proa antes y después del refinado en "Maxsurf Modeler"

El siguiente paso, es definir el marco de referencia con el calado de diseño y las dimensiones de la embarcación. Y finalmente se realiza la simetría entre los dos patines:

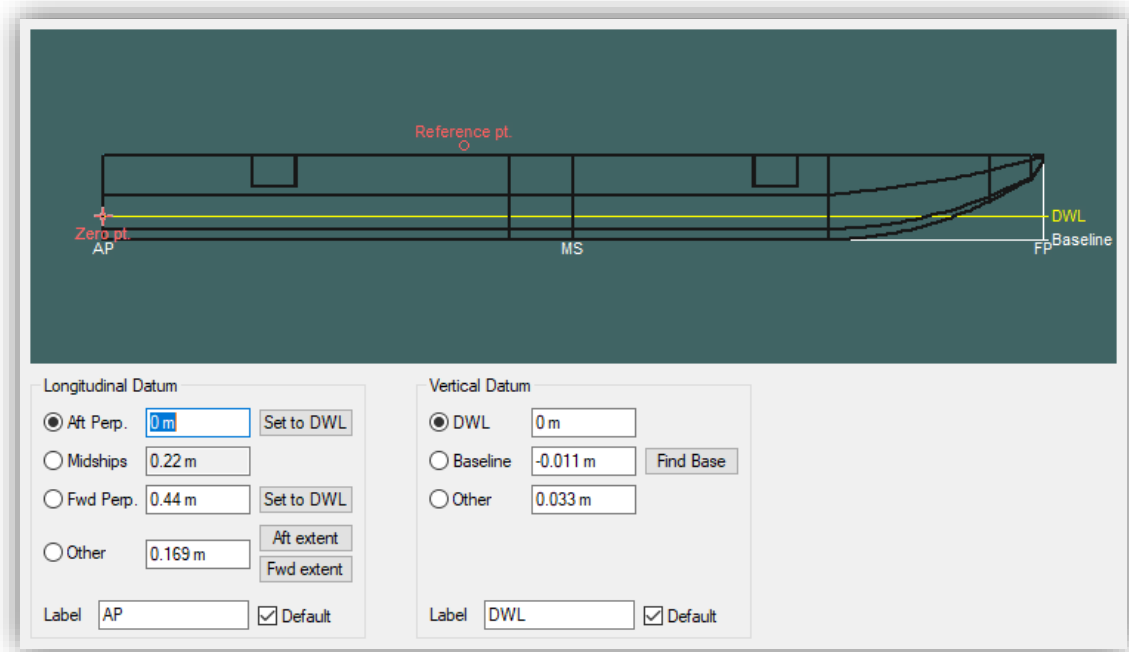


Ilustración 20. Definición del marco de referencia de la embarcación

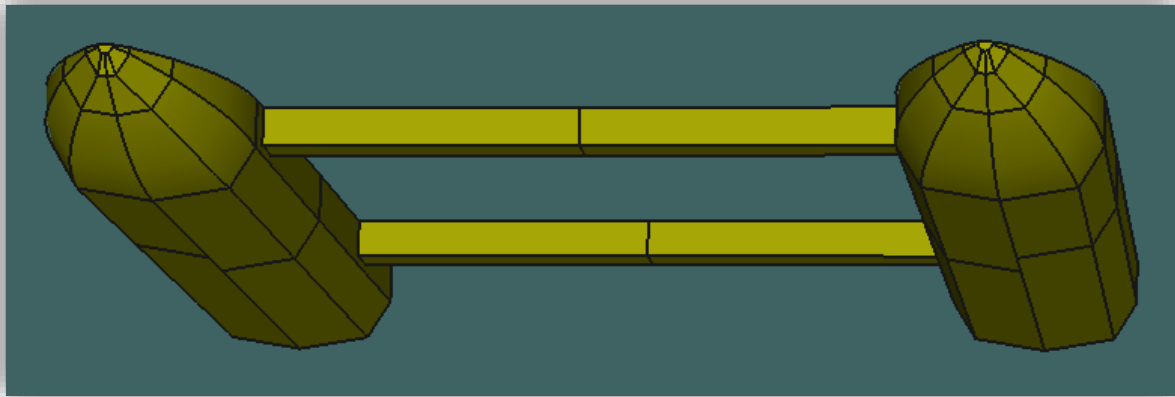


Ilustración 21. Modelo final de “Maxsurf”

Como se puede observar, se ha simplificado el modelo para el análisis hidrostático mediante la eliminación de los ejes de las hélices. Esta simplificación prácticamente no tiene ninguna afectación sobre los resultados, ya que el volumen sumergido de dichos ejes es despreciable comparado con el volumen de los patines.

Una vez definido el modelo mediante “Maxsurf Modeler”, se procede a abrir el archivo en “Maxsurf Stability”. Este software, permite realizar distintos análisis de estabilidad a partir de las formas de cualquier casco.

Para trazar la curva **GZ**, se le debe indicar al programa el tipo de análisis a realizar (se selecciona el tipo “Large Angle Stability”) y se le indica al programa la discretización y los grados para los que se desea trazar la curva.

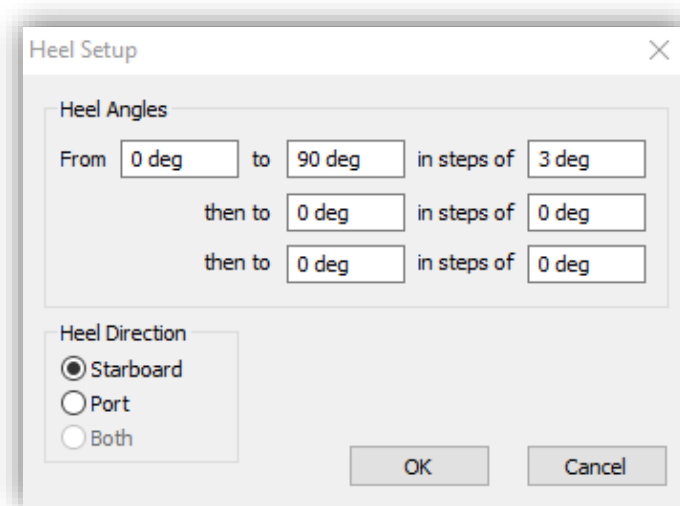
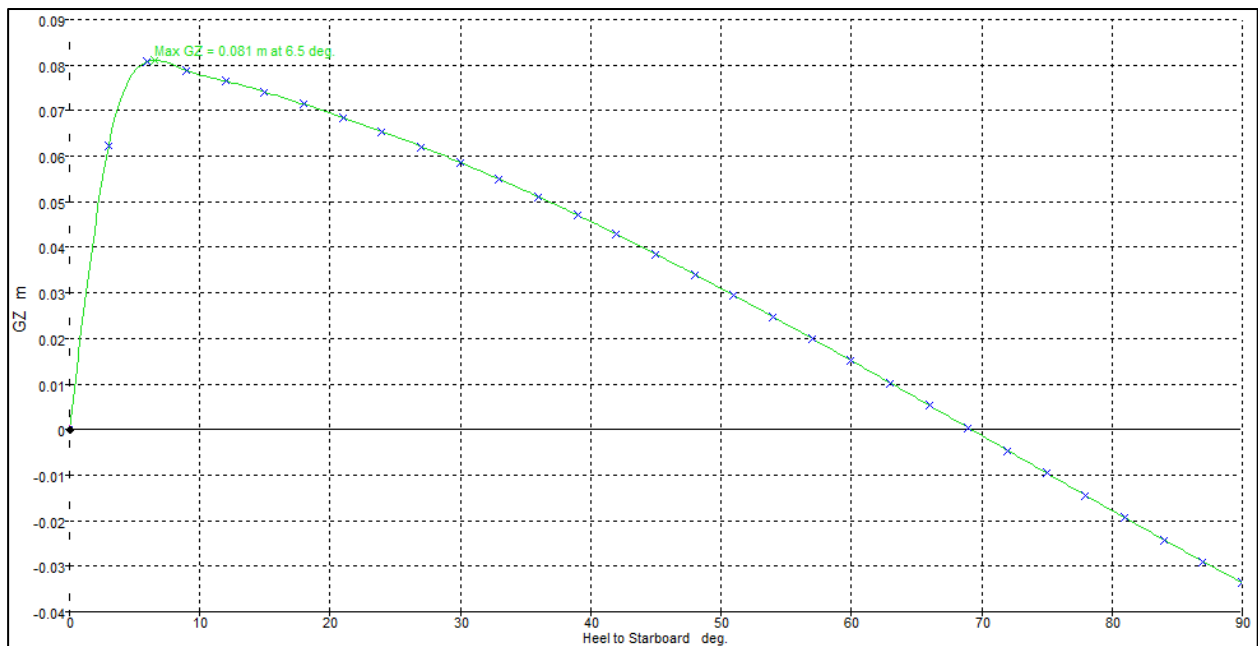


Ilustración 22. Configuración del análisis de estabilidad

Una vez introducidos todos los parámetros necesarios, se procede a trazar la curva:



Gráfica 1. Curva GZ de la embarcación

Como se puede apreciar, el brazo **GZ** aumenta muy rápidamente a medida que se inclina la embarcación. Este comportamiento es el esperado en cualquier catamarán, ya que el hecho de tener dos cascos hace que la embarcación sea muy estable en los primeros grados de inclinación.

Otro aspecto a tener en cuenta es el ángulo nulo, que es el ángulo en el cual el brazo **GZ** tiene un valor nulo. A efectos prácticos, este es el ángulo a partir del cual, si se fuera inclinando la embarcación poco a poco, se produciría el vuelco de la misma. En el análisis se determina que el ángulo nulo de la embarcación es de **69,17°**. Este ángulo da un margen de estabilidad más que aceptable, y de hecho superior al de muchas embarcaciones comerciales.

Por todo lo comentado, se determina que la embarcación cumple sobradamente los requisitos de estabilidad.

# Capítulo 4. Simulación con Simscape Multibody.

En este capítulo se explica cómo se ha implementado la simulación del cuadricóptero (sin el sistema de control) mediante Simscape multibody.

Simscape multibody (que forma parte del paquete de Matlab) es un software que proporciona un entorno de simulación para sistemas multicuerpo (es decir, que estén formados por varias piezas o cuerpos). Con él se pueden modelar dichos sistemas utilizando bloques que representan cuerpos, articulaciones, restricciones, elementos de fuerza y sensores.[6]

Para implementar la simulación, se deben ensamblar los bloques referentes a cada uno de los sólidos que conforman el cuadricóptero, y definir las ecuaciones que determinan el efecto de las hélices sobre la embarcación.

En el presente capítulo se desarrolla el modelo matemático de las hélices y se explica la implementación del modelo en Simscape multibody.

## 4.1 Realización del modelo matemático de las hélices

### 4.1.1 Cálculo del empuje efectuado por las hélices

Para implementar el modelo matemático que define el empuje ejercido por cada una de las hélices, se recurre a las expresiones usualmente utilizadas para calcular el empuje que ejerce una hélice sobre un buque.

La particularidad de este caso, es que las hélices del presente trabajo no trabajan horizontalmente propulsando una embarcación que se desplaza hacia delante, si no que trabajan verticalmente propulsando el cuadricóptero hacia arriba.

A parte, dichas expresiones están pensadas para calcular la velocidad máxima que alcanzará un buque partiendo de todos los datos necesarios y se suele trabajar con ellas de forma iterativa. Pero lo que se pretende en el siguiente desarrollo es obtener una expresión matemática que defina el empuje de la hélice para cualquier velocidad de rotación dada.

El empuje que ejerce una hélice sobre una embarcación se puede definir mediante la siguiente expresión[7]:

$$T = K_T \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

Donde:

- $T$  = empuje (fuerza) que ejercen las hélices (N)
- $K_T$  = coeficiente de empuje de la hélice

- $\rho$  = densidad del agua salada ( $\text{kg/m}^3$ )
- $D$  = diámetro de la hélice (m)
- $n$  = velocidad de giro de los motores (rev/s)

Según [5]:

$K_t$  es un valor que depende del *grado de avance* ( $J$ ) cuya expresión [7] se define mediante:

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D}$$

Dónde:

- $V_a$  = Velocidad de avance de la hélice (m/s)
- $n$  = velocidad de giro de los motores (rev/s)
- $D$  = diámetro de la hélice (m)

El valor de  $K_t$ , se obtiene a partir de las tablas empíricas de la “Serie B de Wageningen”. Estas tablas o gráficas, que se realizaron a partir de una serie de pruebas en el canal de ensayos de Wageningen (Holanda), muestran los valores de distintos coeficientes para una determinada hélice en función del valor del grado de avance ( $J$ ).

Como se puede observar en la tabla, la evolución de la curva  $K_T$  es prácticamente lineal. Por este motivo y con la intención de obtener una ecuación que defina su comportamiento, se simplifica a la ecuación de una recta.

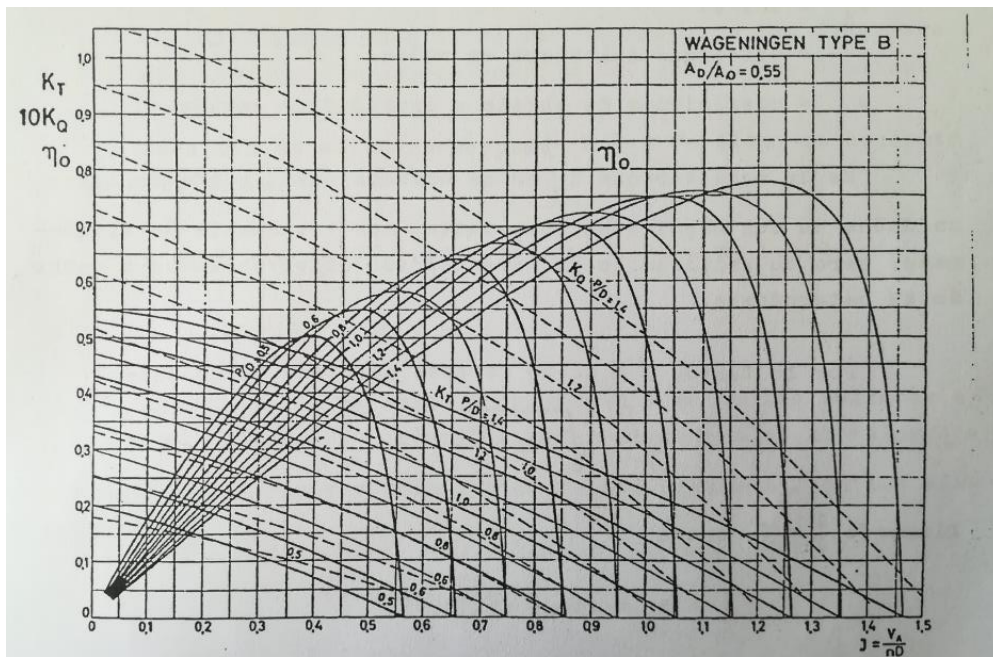


Ilustración 23. Gráfica de la Serie B de Wageningen para una relación  $Ad/Ao$  de 0,55[7]

Se elige una relación paso/diámetro de hélice de **1,4** y se obtiene la siguiente ecuación de la recta:

$$K_T = -0,3767 \cdot J + 0,55$$

Si se sustituye la expresión obtenida para  $K_T$  en la ecuación del empuje se obtiene:

$$T = (-0,3767 \cdot J + 0,55) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

Y si a su vez, se sustituye el término  $J$  por su expresión (anteriormente planteada), se obtiene la siguiente ecuación que define el empuje que realiza cada motor:

$$T = \left(-0,3767 \cdot \frac{V_a}{n \cdot D} + 0,55\right) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^4$$

Dónde:

- $T$  = empuje (fuerza) que ejercen los motores (N)
- $V_a$  = Velocidad de avance de la hélice (m/s)
- $n$  = velocidad de giro de los motores (rev/s)
- $\rho$  = densidad del agua salada (kg/m<sup>3</sup>)
- $D$  = diámetro de la hélice (m)

[5]

Una vez hallada la expresión matemática que define el empuje, se implementa dicha expresión mediante diagrama de bloques en Simulink:

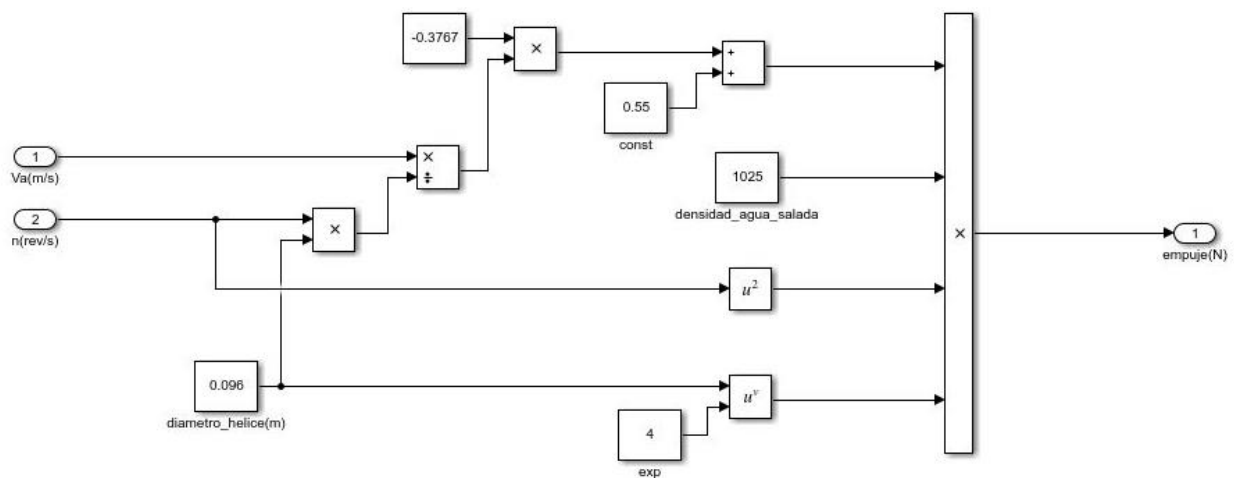


Ilustración 24. Diagrama de bloques de la ecuación del empuje

El problema de esta expresión es que como la velocidad de la hélice aparece como denominador en una división, cuando la hélice está parada, un término de la expresión vale infinito. De hecho, cuando la hélice está parada se está intentando multiplicar cero por infinito ( $T = 0 \cdot \infty$ ) y Matlab arroja el valor “nan”.

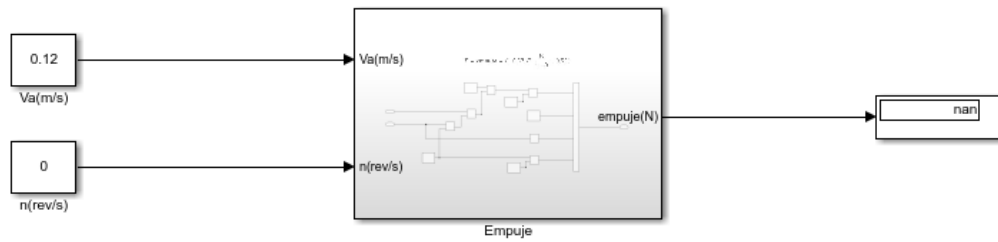


Ilustración 25. Cálculo erróneo del empuje con 0 rpm

Para subsanar este problema, se modifica el subsistema añadiéndole un bloque "Switch". El cuál hace que cuando la velocidad de la hélice valga cero, el valor del empuje sea también 0:

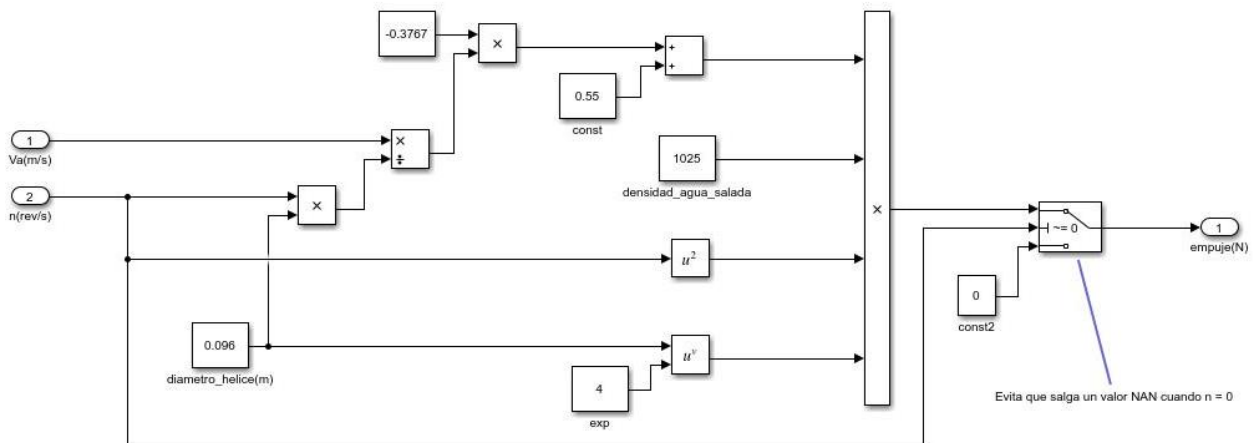


Ilustración 26. Diagrama de bloques del cálculo del empuje con el error a 0 rpm solucionado

#### 4.1.2 Cálculo del par ejercido por las hélices

Para obtener una expresión que defina el par ejercido por las hélices se procede de forma análoga al cálculo del empuje. Se parte de la expresión[7] que define el par en función de una serie de constantes y coeficientes:

$$Q = K_Q \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5$$

Donde:

- $Q$  = par que ejercen las hélices (N·m)
- $K_Q$  = coeficiente de par de la hélice
- $\rho$  = densidad del agua salada ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $D$  = diámetro de la hélice (m)
- $n$  = velocidad de giro de los motores (rev/s)



Al igual que con el coeficiente de empuje, el coeficiente de par también se obtiene de las tablas de la “Serie B de Wageningen”. Y como en el caso anterior, la evolución de la curva presenta un comportamiento lo suficientemente lineal como para extrapolar-la a una recta. La expresión obtenida para la relación paso/diámetro elegida (1,4) es la siguiente:

$$K_Q = -0,575 \cdot J + 1,075$$

Sustituyendo  $K_Q$  en la ecuación del par se obtiene:

$$Q = (-0,575 \cdot J + 1,075) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5$$

Recordando que J se definía como:

$$J = \frac{V_a}{n \cdot D}$$

Si se substituye en la penúltima ecuación se obtiene la siguiente expresión para el par:

$$Q = \left(-0,575 \cdot \frac{V_a}{n \cdot D} + 1,075\right) \cdot \rho \cdot n^2 \cdot D^5$$

Dónde:

- $Q$  = par que ejercen las hélices (N·m)
- $V_a$  = Velocidad de avance de la hélice (m/s)
- $n$  = velocidad de giro de los motores (rev/s)
- $\rho$  = densidad del agua salada (kg/m<sup>3</sup>)
- $D$  = diámetro de la hélice (m)

La implementación de este bloque en Simulink presenta el mismo problema que había en el caso del empuje (cuándo la hélice está parada la expresión intentaría multiplicar cero por infinito y la simulación daría error), al igual que en el caso anterior se soluciona este problema mediante un bloque “Switch”.

El diagrama de bloques implementado es el siguiente:

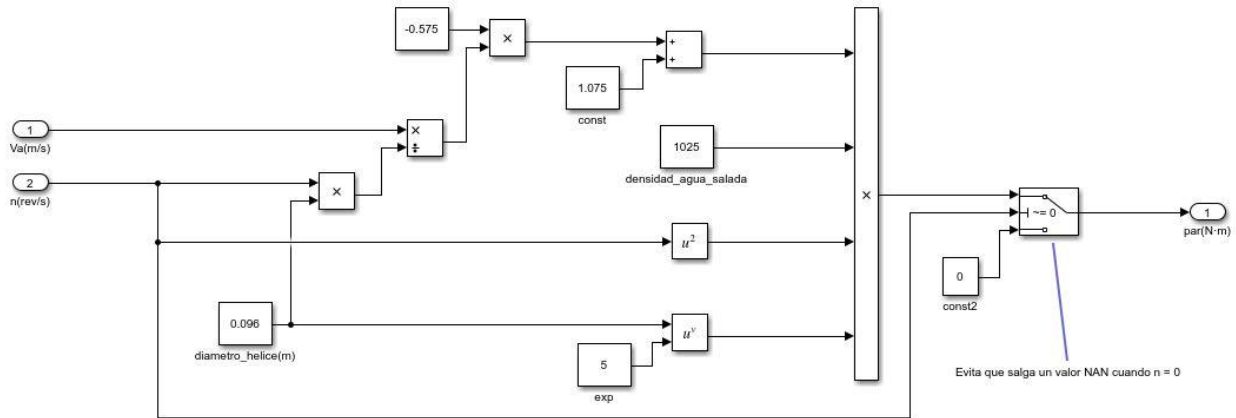


Ilustración 27. Diagrama de bloques del cálculo del par

## 4.2 Ensamblaje del modelo

Con el objetivo de simplificar el proceso de diseño, se decide implementar dos modelos diferentes.

La idea es implementar un primer modelo para el control de actitud, en el cual solo estén permitidos los movimientos de alabeo cabeceo y guiñada. Por tanto, el modelo solo debe presentar 3 grados de libertad:

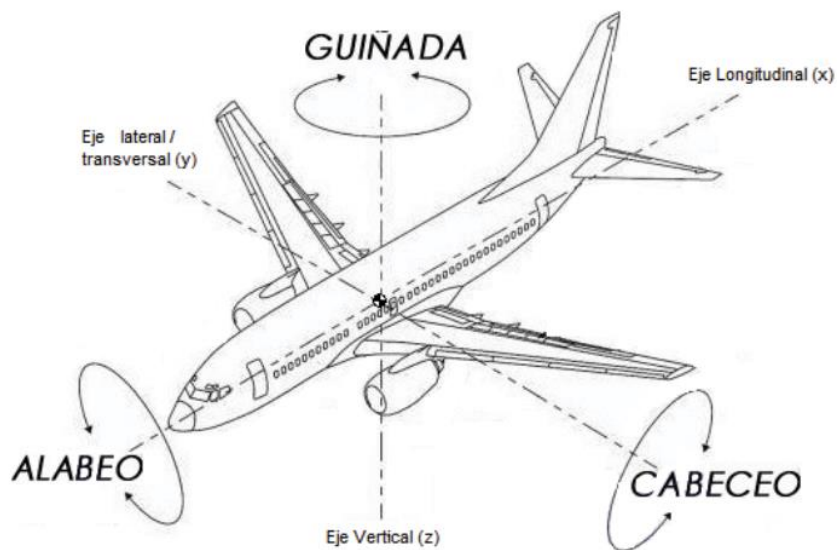


Ilustración 28. Movimientos de alabeo cabeceo y guiñada [8]

Una vez implementado y probado el modelo para el control de actitud, ya se puede proceder a controlar la altura en un modelo con más grados de libertad, y finalmente el resto de desplazamientos.

La parte referente al ensamblaje del cuadricóptero y al comportamiento de las hélices es idéntica en ambos modelos y se desarrolla de la siguiente manera:

Se parte de las piezas diseñadas en SolidWorks en el “Capítulo 2. Diseño de piezas”. Para poder trabajar con Simscape Multibody se deben exportar las piezas desde SolidWorks en formato “.STEP”, una vez exportadas se introducen al espacio de Simulink mediante bloques “File Solid”, los cuales permiten introducir cualquier sólido al espacio de simulación simplemente especificando la ruta del archivo “.STEP”.

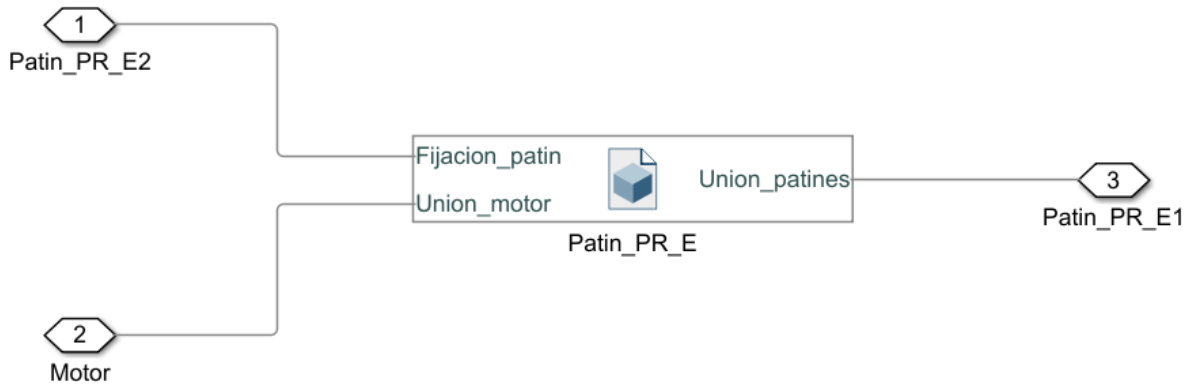


Ilustración 29. Bloque “File Solid”

Una vez se ha introducido cada uno de los sólidos, se procede al ensamblaje del conjunto definiendo y conectando los marcos de referencia (“Frames”) de los distintos sólidos entre ellos. La definición de un marco de referencia consiste en determinar la posición y orientación de una terna de ejes tridimensional respecto a la cual se conectará la terna de otro sólido. El posicionamiento de dichas ternas (o sistemas de tres ejes) se realiza situándolas en puntos clave de la geometría de las piezas (como centros de circunferencias, aristas o bordes).

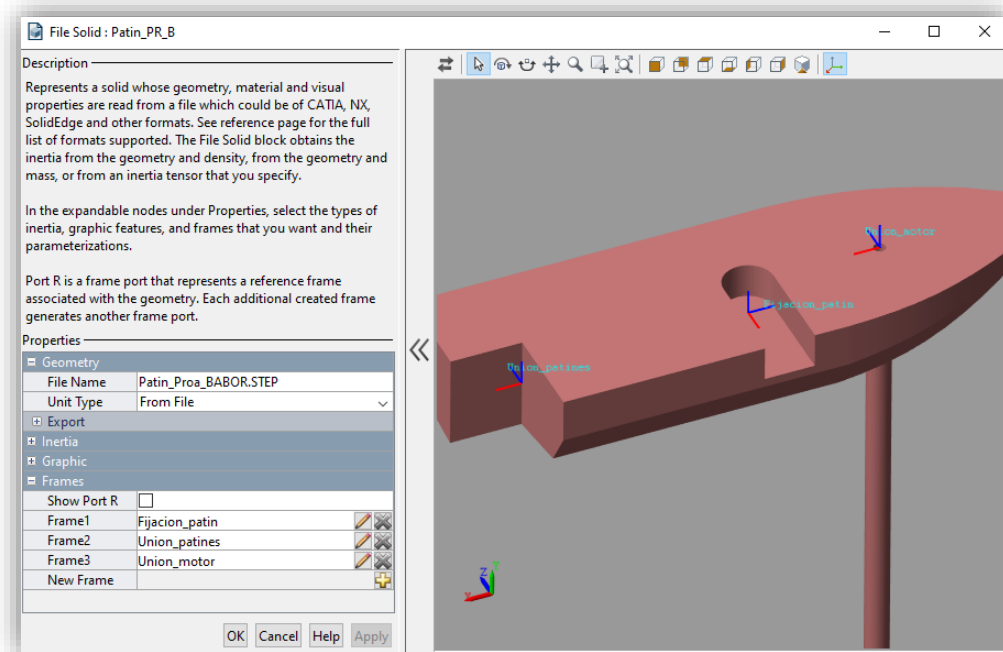
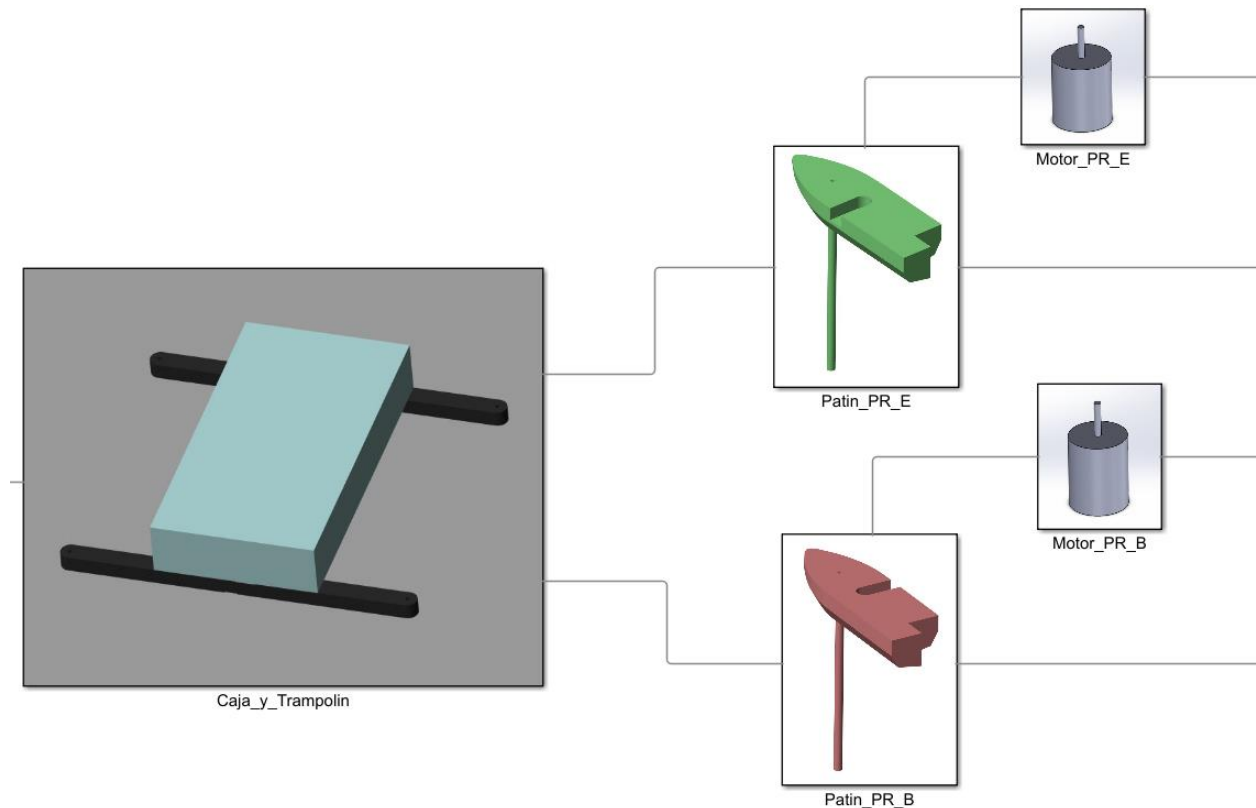


Ilustración 30. Definición de los "Frames" de un sólido

Para facilitar la comprensión del modelo, se pone cada uno de los bloques de “File Solid” dentro de un subsistema con la imagen de su sólido correspondiente:



**Ilustración 31. Conexión entre distintos sólidos**

Los diferentes elementos del sistema se han identificado con las siguientes siglas:

- **PR\_E:** Proa Estribor
- **PR\_B:** Proa Babor
- **PP\_E:** Popa Estribor
- **PP\_B:** Popa Babor

Una vez se han conectado todos los sólidos que presentan uniones fijas entre sí, se conectan los motores a los ejes, dicha conexión se hace mediante una unión de revolución (implementada con el bloque “Revolute Joint”) y finalmente se conectan los extremos de los ejes con las hélices.

A su vez, también se le debe introducir al bloque “Revolute Joint” la posición de las hélices (para que éstas puedan girar en la simulación y se tengan en cuenta los momentos de inercia que generan). Para ello, se integra la velocidad y se aplica una ganancia negativa a las hélices levóginas para que giren en sentido contrario a las otras.

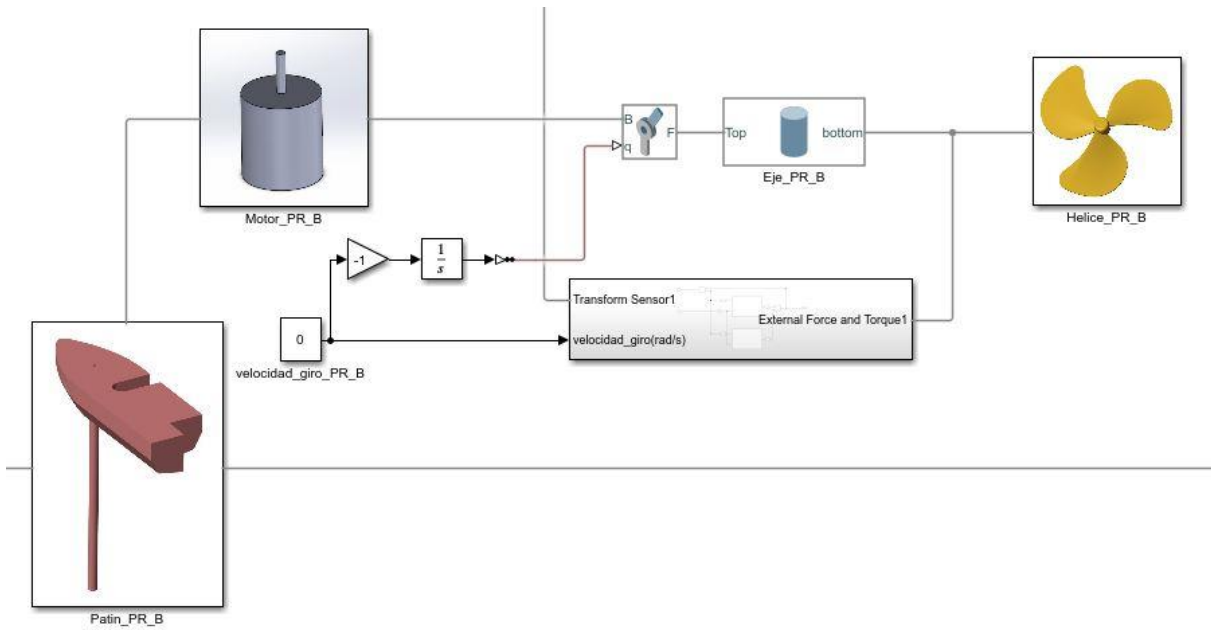


Ilustración 32. Conexión patín-motor-eje-hélice

En la imagen anterior se puede apreciar un bloque de subsistema justo debajo del del eje, este subsistema contiene los modelos de par y empuje (anteriormente descritos en el subapartado “Realización del modelo matemático de las hélices”) y un bloque “External Force and Torque”, el cual se encarga de aplicar al sistema de sólidos los valores de empuje y par calculados:

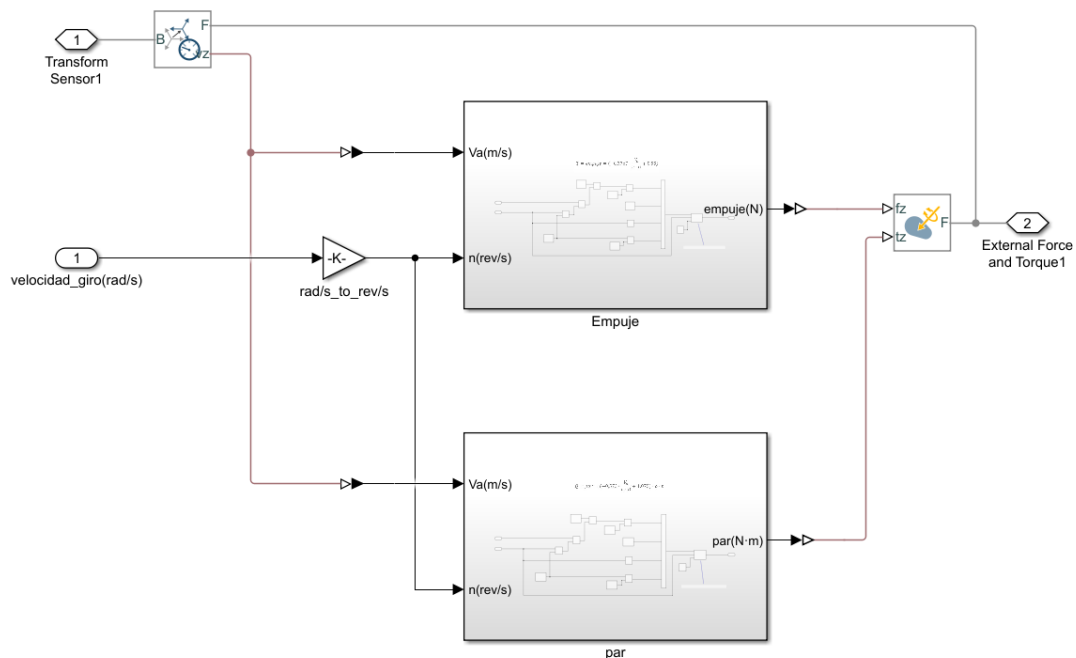


Ilustración 33. Subsistema de par y empuje de la hélice

También se pueden apreciar la ganancia necesaria para cambiar las unidades de la velocidad de giro de las hélices de **rad/s** a **rev/s** (que es la unidad empleada para realizar los cálculos); y un bloque “Transform Sensor” (utilidad del cual se explica en el siguiente apartado).

Finalmente se conecta un bloque cubico al “World Frame” (que es el marco de referencia del mundo, respecto al cual se definen todas las condiciones de contorno del modelo). Dicho bloque cubico, que se sitúa con un cierto desfase lineal (implementado mediante un bloque “Rigid Transform”) tiene la función de simular la superficie del agua, para ello se le define un color azul marino y se le da cierto grado de transparencia.

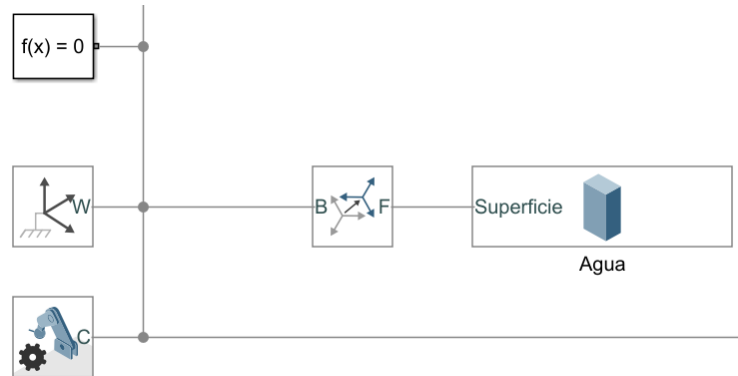


Ilustración 34. Implementación de la superficie del agua

#### 4.2.1 Cálculo de la velocidad de avance de las hélices

Como se puede apreciar en los modelos de par y velocidad de las hélices, es necesario determinar la velocidad de avance de las mismas para calcular tanto el par como el empuje que efectúan. Dicha velocidad, depende en mayor medida de los movimientos de guiñada cabeceo y alaveo de la embarcación.

Y también depende de la velocidad de desplazamiento respecto a los ejes X, Y, Z (Z en menor medida, ya que se prevé la a embarcación esté siempre a una altura más o menos estable).

Para determinar dicha velocidad, se hace uso del bloque “Transform Sensor” de Simscape. Este bloque puede medir cualquier relación dependiente del tiempo entre dos marcos de referencia.

En este caso el bloque se debe configurar para medir la velocidad respecto el eje Z de la propia hélice. Para ello, se conecta el bloque entre el marco de referencia del mundo y el marco de referencia de la hélice, una vez hecho esto se configura el bloque para que muestre la velocidad en Z y en el parámetro “Measurement Frame” se selecciona la opción “Non-Rotating Follower”. Esto se hace para que el sensor muestre la velocidad de avance de la propia hélice respecto al agua en vez de la velocidad a la que varía su altura respecto a la superficie del mar.

### 4.2.2 Particularidades del modelo para el control de actitud

Como se comentaba anteriormente, la función de este modelo es la de simular y controlar un sistema en el cual solo estén permitidas las rotaciones en los tres ejes (movimientos de cabeceo, alabeo y guiñada), por tanto, es un sistema con solo 3 grados de libertad.

Para conseguir lo comentado, se decide unir el sistema de sólidos al “World Frame” mediante una articulación esférica. Llegados a este punto se plantea la decisión de dónde situar el centro de rotación de dicha articulación, la cual se decide situar en el punto medio entre las cuatro hélices. Para ello se conecta la caja central del cuadricóptero a la unión esférica mediante una barra sin masa:

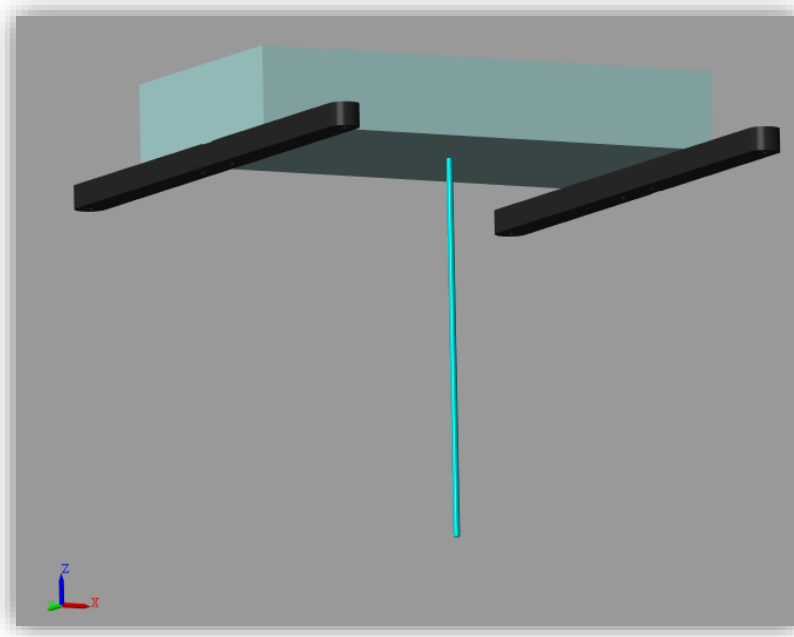


Ilustración 35. Conexión del cuadricóptero con la unión esférica

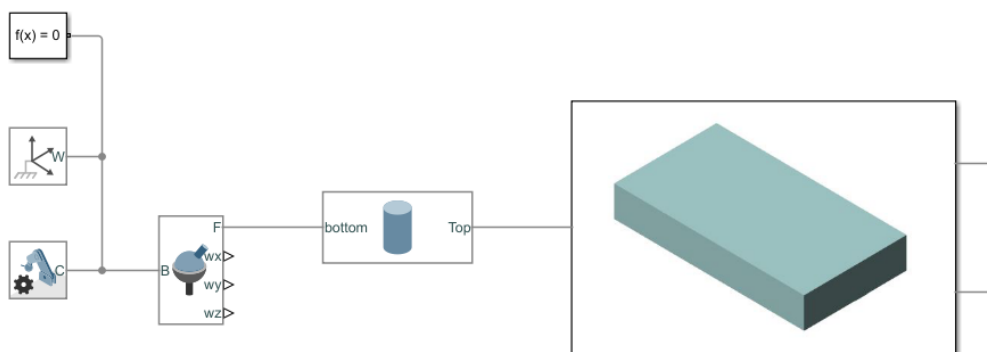


Ilustración 36. Diagrama de bloques de la unión del sistema con la articulación esférica

Por motivos estéticos y para una mejor visualización de la simulación, se le da a la barra una transparencia del **100%**.

A continuación, se muestra la visión general de todo el sistema implementado en Simscape, cabe destacar que su aparente simplicidad se debe al trabajo que se ha llevado a cabo de simplificación y agrupación de las partes más complejas en varios subsistemas.

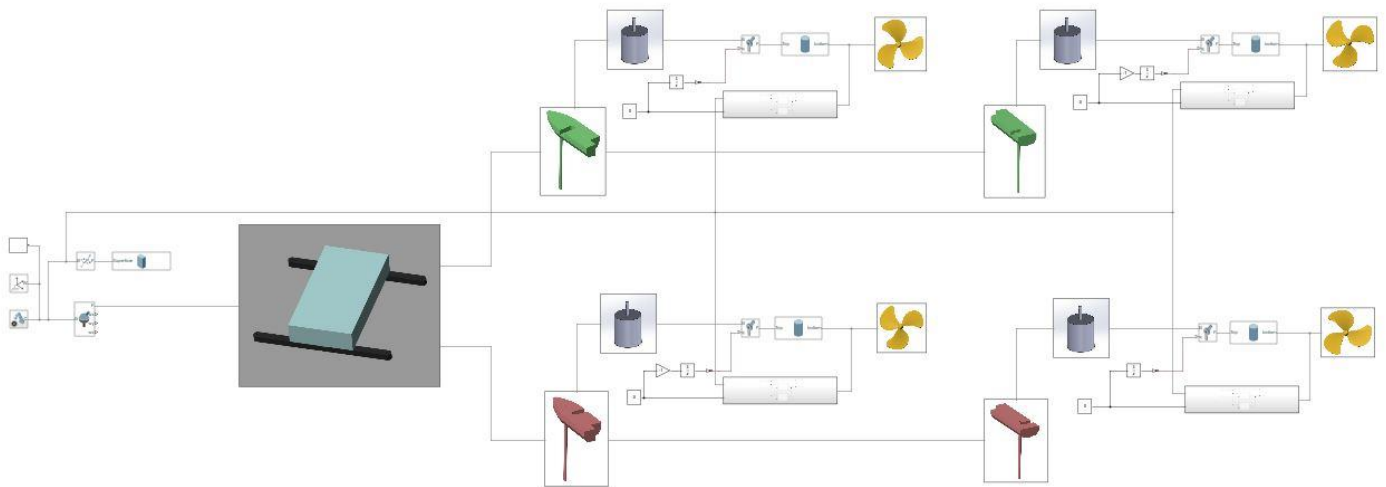


Ilustración 37. Visión general del modelo en Simscape

#### 4.2.3 Particularidades del modelo con más grados de libertad

Como se verá en el próximo capítulo, se acaba sustituyendo la articulación esférica originalmente implementada por una serie de uniones de revolución y transformaciones geométricas que permitirán estudiar los diferentes movimientos del cuadricóptero por separado; e ir añadiendo paulatinamente grados de libertad al sistema.

Una vez se ha probado y verificado el funcionamiento de la simulación del modelo con **3** grados de libertad, se procede a añadir otro grado de libertad mediante una unión prismática para poder simular los desplazamientos en el eje Z. Finalmente se le añade también una articulación cartesiana al conjunto para poder dotar al sistema de los **6** grados de libertad.



# Capítulo 5. Diseño del regulador.

En el presente capítulo se aborda el diseño del regulador encargado de controlar la actitud y altura del cuadricóptero y posteriormente se diseña un control de trayectoria.

## 5.1 Elección del tipo de regulador

El problema de control que se quiere solucionar se puede categorizar en gran medida como un problema de estabilidad.

Lo que se pretende es estabilizar un sistema que de por sí es inestable mediante el control del empuje que ejercen las hélices sobre la embarcación. Por otro lado, observando la configuración del sistema, ya se puede intuir que, al estar las hélices situadas por debajo del centro de masas del conjunto, su empuje también tiende a inestabilizar el sistema. Por poner un ejemplo gráfico, se podría comparar la estabilidad de la embarcación con la de un helicóptero volando del revés:



Ilustración 38. Helicóptero volando del revés[9]

Para realizar el control de un sistema tan complejo, es necesario utilizar sensores (como acelerómetros/giroskopios) que indiquen en que posición se encuentra la embarcación, por lo tanto, se puede categorizar el tipo de control a emplear como control en bucle cerrado.

Existen varios tipos de control en bucle cerrado. Como el control mediante reguladores **PID**, el control por espacio de estados, o incluso estructuras avanzadas de control como son los reguladores **PID** con dos grados de libertad, el control en cascada, el control por pre-alimentación, etc.

Ante las distintas posibilidades que hay para la elección del tipo de control, se decide optar por los reguladores **PID**. Ya que son el tipo de control más básico, su implementación y sintonización es relativamente sencilla, y son el tipo de regulador más extendido en la industria.

A continuación, se muestra la estructura de un proceso cualquiera controlado mediante un regulador (o controlador) **PID**:

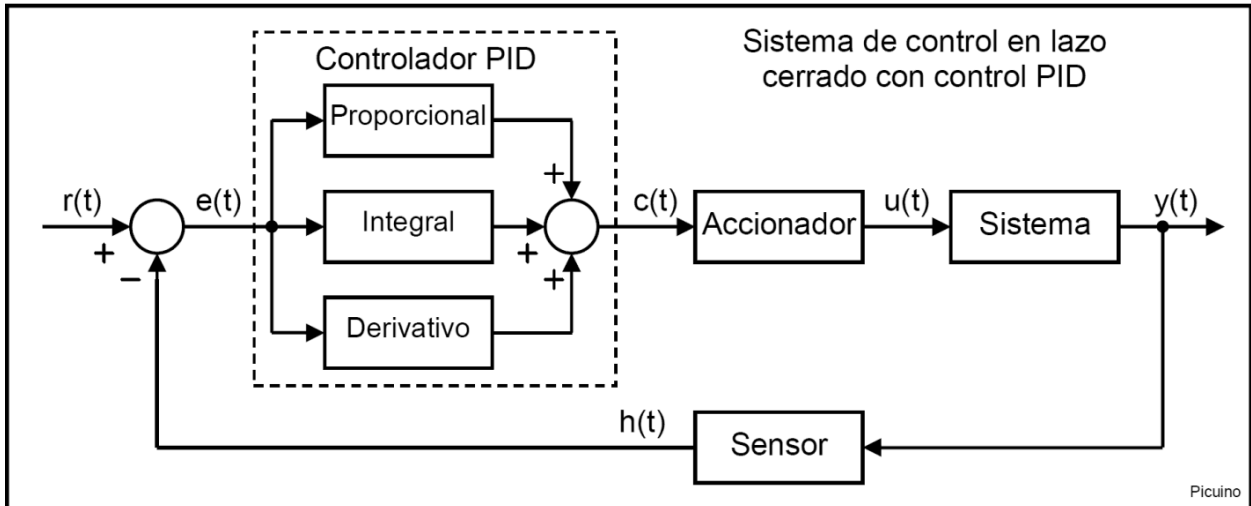


Ilustración 39. Estructura de un proceso controlado mediante un PID [10]

Como se puede observar, se cuenta con un sistema cuyo comportamiento se puede modificar mediante un accionador, el cual es controlado por el regulador **PID**. Al regulador le llega la señal del error, que básicamente se obtiene de restar la señal que detecta el sensor al valor de la referencia. Mediante esta disposición, lo que hace el regulador es intentar disminuir la señal de error lo máximo posible mediante el control del accionador.

Este tipo de regulador efectúa tres acciones diferentes. La acción proporcional, la acción integral y la acción derivativa. También cabe destacar que se pueden implementar reguladores que prescindan de algunas de estas acciones, con lo cual se pueden combinar en reguladores tipo: **P**, **PI**, **PD**, **PID**.

Como su nombre indica, la acción proporcional efectúa una respuesta proporcional al error. Dicho en otras palabras, cuanto mayor es el error, mayor es la respuesta que efectúa el controlador para mitigarlo. Su implementación consiste simplemente en aplicar una ganancia al error, de esta manera la acción de control será el resultado de multiplicar el error por dicha ganancia.

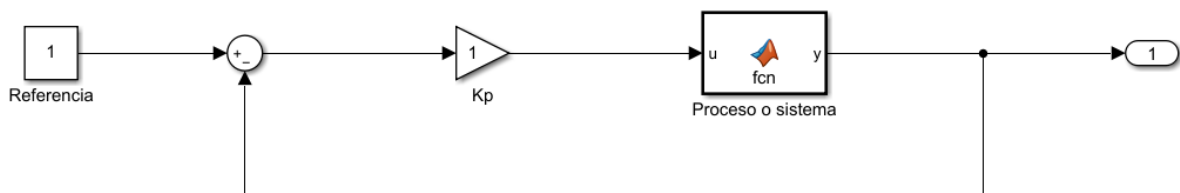


Ilustración 40. Estructura de un regulador P

Los reguladores que solo presentan acción proporcional, son los más sencillos. Pero presentan unas prestaciones inferiores a los otros, ya que no son capaces de eliminar por completo el error y presentan un comportamiento dinámico mejorable.

La acción integral, hace que el error en régimen estacionario tienda a **0**. Esto se consigue integrando la señal del error y multiplicando el resultado por una ganancia (esta ganancia permite ajustar el peso de dicha acción integral). Su funcionamiento se basa en que la integral calcula la “cantidad de error” acumulada hasta el momento, por tanto, si hay un error que no ha sido corregido por las otras acciones del regulador y que se mantiene durante el tiempo, la acción integral tiende a eliminarlo.

El uso de la acción integral es imprescindible si se quiere que el error ante cualquier perturbación sea nulo. Por contrapartida, complica el sintonizado de los parámetros del regulador, empeora el comportamiento dinámico, y si no se sintoniza como es debido, puede inestabilizar el sistema.

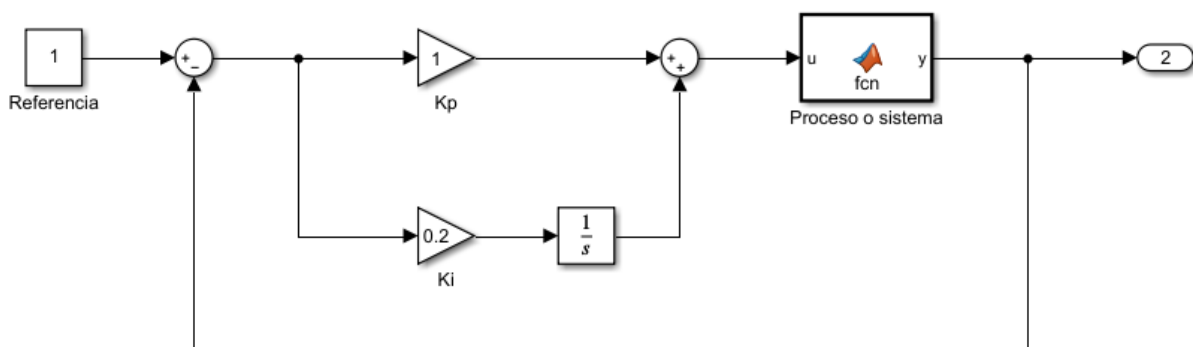


Ilustración 41. Estructura de un regulador PI

La acción derivativa tiene efecto sobre los transitorios. Si se sintoniza bien, reduce el tiempo de reacción y la sobre oscilación del sistema. Su implementación consiste en derivar la señal de error y multiplicar dicha derivada por una ganancia (que al igual que en el caso de las otras acciones determina el peso de dicha acción en el control).

Esta acción se encarga de mitigar los efectos de las perturbaciones que se esperan en un instante futuro. Esto se consigue gracias al hecho de derivar el error, ya que la derivada indica la pendiente de la función de dicho error, y como mayor sea ésta pendiente, mayor será el error en el próximo instante.

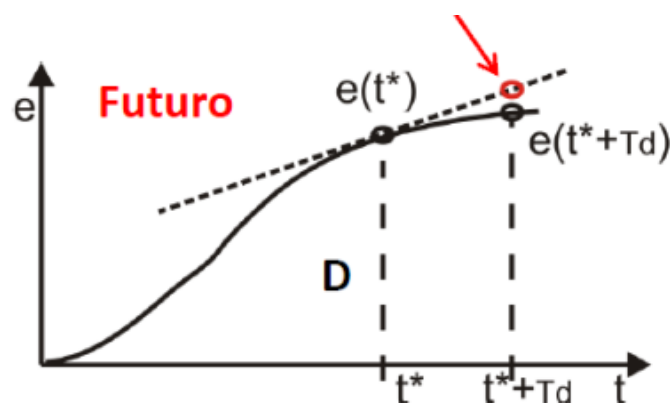


Ilustración 42. Previsión del error futuro gracias a la derivada [11]

La estructura de un regulador PD es la siguiente:

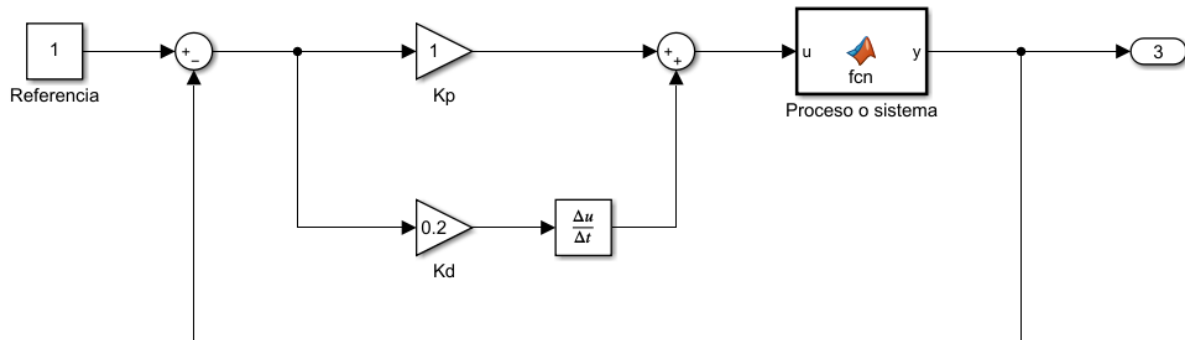


Ilustración 43. Estructura de un regulador PD

Si se combinan las tres acciones, la estructura es la siguiente:

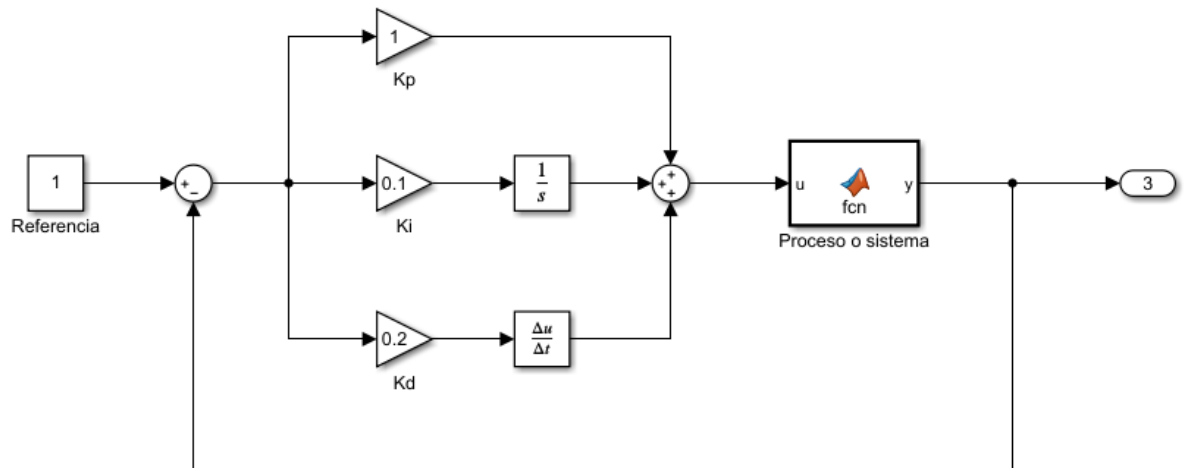


Ilustración 44. Estructura de un regulador PID

## 5.2 Control de actitud y altura

En una primera fase del proyecto, se realiza el control sobre una simulación del cuadricóptero en la que los únicos movimientos permitidos son el alabeo, el cabeceo, la guiñada, y el desplazamiento respecto al eje **Z** (o sea la altura). Por tanto, en esta simulación, la embarcación tiene restringidos los movimientos sobre el plano **X Y**.

Como el sistema descrito tiene **4** grados de libertad, es necesario diseñar cuatro reguladores distintos. Uno para el cabeceo, otro para la altura, otro para la guiñada, y un último para la altura.

Con el fin de simplificar el proceso de diseño y calibración de los reguladores, se decide abordar el problema permitiendo un solo grado de libertad, y cuando ya se controla el movimiento en dicho grado de libertad se van añadiendo el resto de uno en uno.

De esta manera, se implementa primeramente el control del ángulo de cabeceo, posteriormente el alabeo, después la giñada y finalmente la altura. Para lograr introducir los grados de libertad de uno en uno, se sustituye la articulación esférica que unía la embarcación con el "Frame" del mundo, por una serie de uniones de revolución rotadas entre si mediante bloques "Rigid Transform".

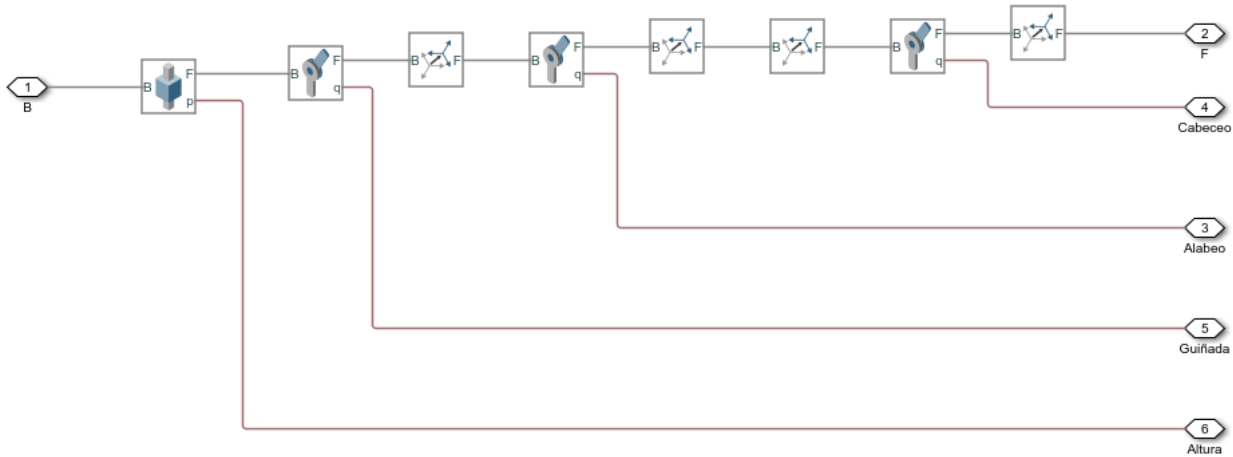


Ilustración 45. Unión de la embarcación con el "Frame" del mundo con 4 GDL

En la imagen anterior, también se puede apreciar una articulación prismática. Su función es la de permitir que el cuadricóptero acuático pueda variar su altura. Para impedir que la embarcación siga bajando una vez los patines tocan el agua, o que siga subiendo, aunque las hélices hayan salido del agua (dos situaciones a las que no se espera llegar durante un funcionamiento normal) se determinan unos límites superior e inferior en dicha articulación.

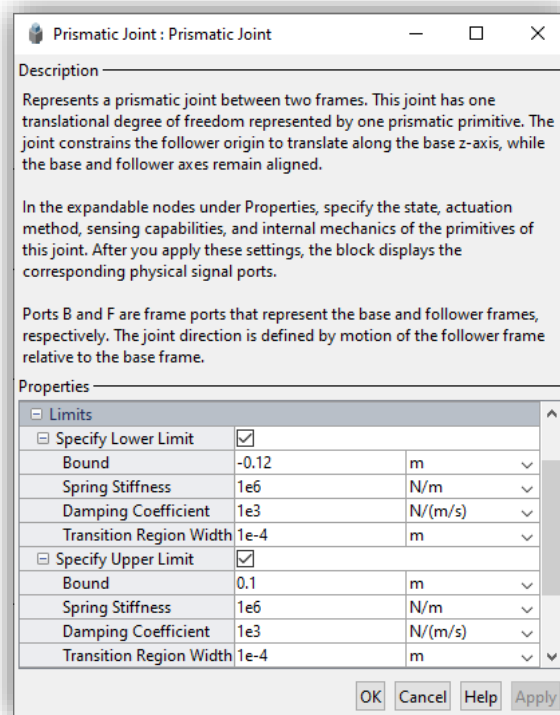


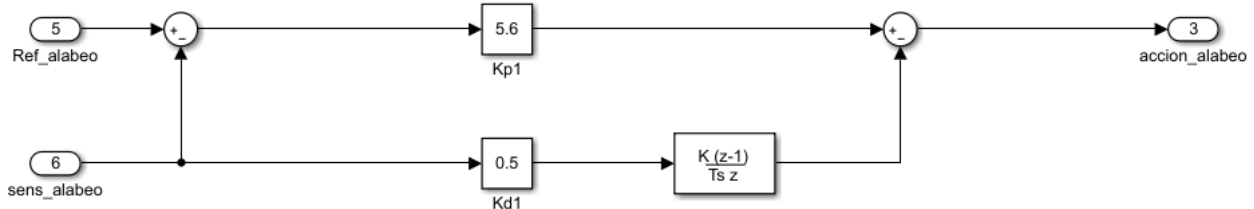
Ilustración 46. Configuración de límites superior e inferior en la articulación prismática

### 5.2.1 Control de alabeo

Como se comenta anteriormente, si se le añade acción integral a un regulador, ésta empeora su respuesta dinámica y puede provocar inestabilidades. Es por este motivo que se ha intentado evitar la acción integral en los sistemas de control del cuadricóptero. Además, en el caso del alabeo, este sistema ya tiene debido a su naturaleza una parte integral, la cual debería permitir un seguimiento casi perfecto de las referencias (no siendo así la respuesta ante perturbaciones). Es por este motivo que se decide implementar un control de tipo PD.

En un primer momento, se implementa un PD clásico como el de la *ilustración 43*. Pero al probar el sistema se observa un problema: en el momento en que se varía la referencia, la pendiente del error vale infinito. Por tanto, la acción derivativa del regulador es muy alta y la acción de control sobre las hélices hace que la embarcación dé un salto.

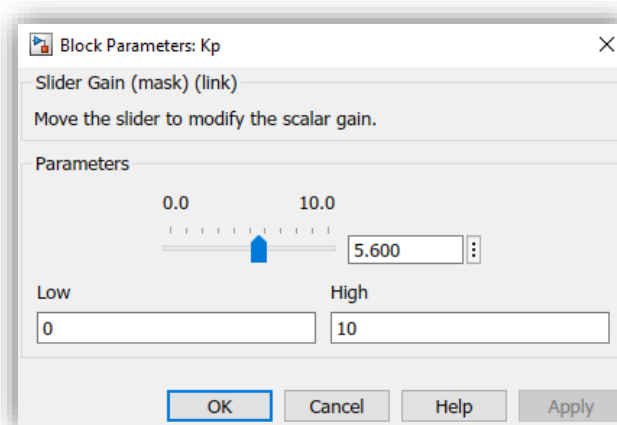
Para evitar que el sistema tenga una respuesta excesiva ante cambios de referencia, se modifica la estructura del regulador de tal manera que la señal que pasa por el derivador no venga directamente de la referencia si no del sensor de inclinación. Esta solución también se adoptará para el resto de controles.



**Ilustración 47. Regulador PD modificado (estructura del control de alabeo)**

Como se aprecia en la imagen, al hacer esto se debe modificar el signo del sumador de la derecha, ya que, si no, la acción derivativa trabajaría en sentido contrario.

Con el fin de poder ajustar las ganancias de las distintas acciones de control en tiempo real, éstas se implementan mediante bloques "Slider Gain", los cuales permiten variar su valor mediante un "slider" mientras está corriendo la simulación:



**Ilustración 48. Bloque "Slider Gain"**

### 5.2.2 Control de cabeceo

Al contrario de lo que sucede con el alabeo (y también con la guiñada), el movimiento de cabeceo del cuadricóptero no tiene una parte integral. Esto es debido a que el centro de gravedad del cuadricóptero no está a la misma distancia respecto al eje X que el centro de las hélices.

Este problema se podría solucionar alineando el **CDG** de la embarcación con el punto central de las cuatro hélices mediante la colocación de algún contrapeso, pero se decide descartar esta opción con el fin de reducir al máximo el peso del cuadricóptero.

Por este motivo, se opta por añadir una pequeña acción integral al control de cabeceo. La estructura implementada es la siguiente:

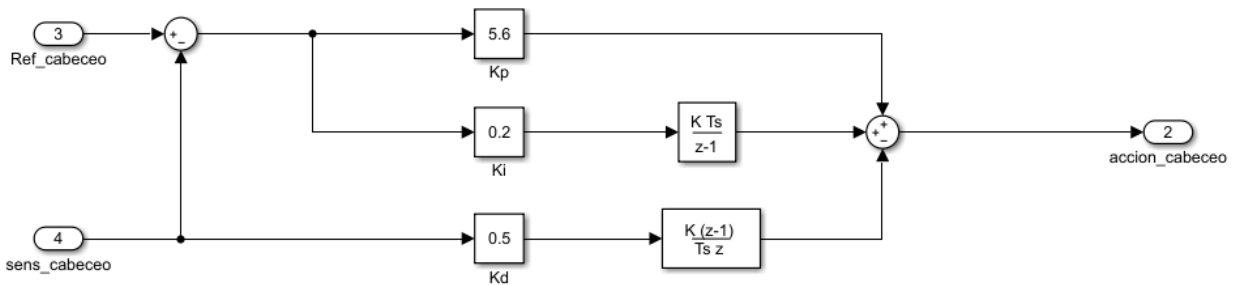


Ilustración 49. Estructura del control de cabeceo

### 5.2.3 Control de guiñada

Al igual que con el alabeo, el movimiento de guiñada de la embarcación sí que presenta una parte integral por sí mismo, por tanto, se elige un control de tipo **PD**.

En los otros movimientos de la embarcación, no se esperan cambios de referencia demasiado bruscos, ya que los rangos de cabeceo y alabeo en funcionamiento normal, no deberían sobrepasar los  $\pm 10^\circ$ . En cambio, la guiñada puede presentar giros de hasta  $180^\circ$ .

Para que no se produzcan acciones de control excesivas en caso de que se le pida a la embarcación que realice un giro muy pronunciado, se incorpora un bloque "Rate Limiter" a la entrada de la referencia en el controlador. La función de este bloque es la de convertir los escalones que le entran en rampas. Después de realizar una serie de pruebas experimentales con la simulación, se determina un valor óptimo de **400** para la pendiente de dichas rampas.

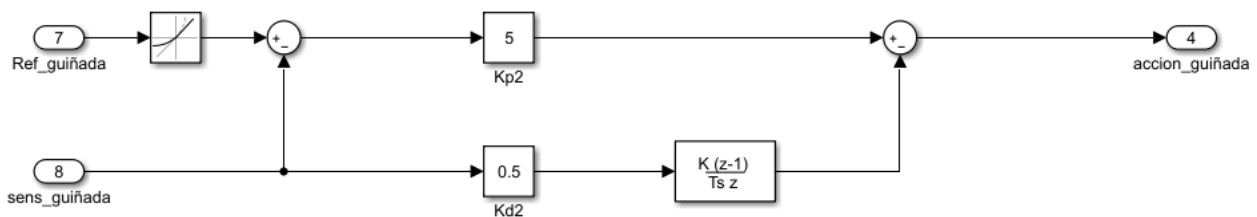


Ilustración 50. Estructura del control de guiñada

### 5.2.4 Control de altura

Este movimiento tampoco presenta parte integral por sí solo, por lo tanto, si no se implementa un controlador con parte integral, no se puede conseguir un error nulo en el seguimiento de la referencia. Pero a diferencia de los otros movimientos, un seguimiento inexacto de esta referencia no implica errores en la trayectoria del cuadricóptero acuático.

El control de altura simplemente se encarga de que la embarcación se sitúe a una altura determinada respecto a la superficie del agua. Si la altura es demasiado baja, los patines tocarán el agua y la embarcación no trabajará como se quiere (dejará de estar “en vuelo”); pero si la altura es demasiado alta, se corre el riesgo de que alguna hélice salga del agua y se pierda su capacidad para estabilizar la embarcación.

Teniendo en cuenta todo lo comentado, se decide implementar un regulador tipo **PID** para este control.

El único cambio en la referencia que se espera que haya en este regulador se da en el momento en el que empieza a funcionar el cuadricóptero. Se partiría de una situación de reposo en la cual la embarcación estaría parada flotando sobre sus patines, para pasar a una segunda fase donde la embarcación entraría “en vuelo”. Como la diferencia de altura entre estas dos fases es bastante significativa (**11 cm**), se decide poner un bloque “Rate Limiter” para suavizar dicho cambio en la referencia, y evitar así que la embarcación dé un salto demasiado grande al entrar en funcionamiento:

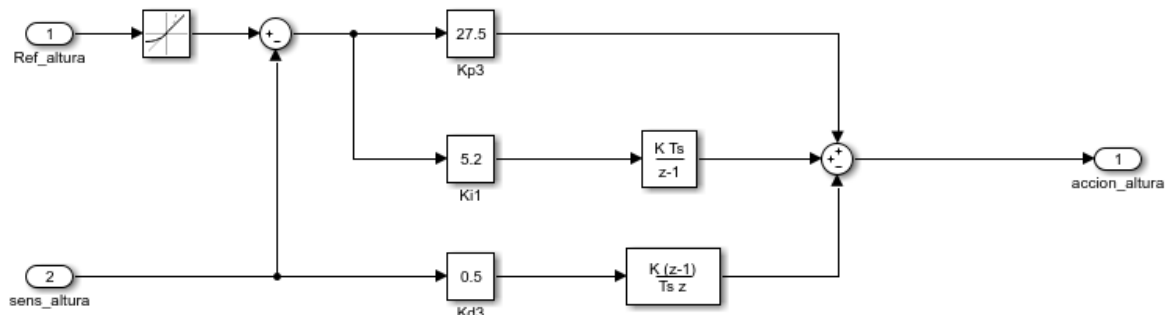


Ilustración 51. Estructura del control de altura

### 5.2.5 Actuación de las acciones de control sobre las hélices

Como su nombre indica, el cuadricóptero acuático tiene cuatro hélices, las cuáles deben realizar las acciones necesarias para que la embarcación se posicione de la manera deseada.

Todos los movimientos en los 4 grados de libertad que se pretende controlar, están influidos por cada una de las cuatro hélices. Por ejemplo, para que la embarcación cabecee hacia delante, se tiene que aumentar la velocidad de las hélices de popa y disminuir la de las de proa. Por tanto, es necesario determinar cómo influyen las acciones de control de cada uno de los controladores en cada una de las hélices.

Para definir sobre qué hélice y en qué sentido actúa cada una de las acciones de control, se coloca un sumador de cuatro valores a la entrada de cada una de las hélices. Determinando el signo de cada valor, se consigue que las acciones de control actúen en el sentido correcto.



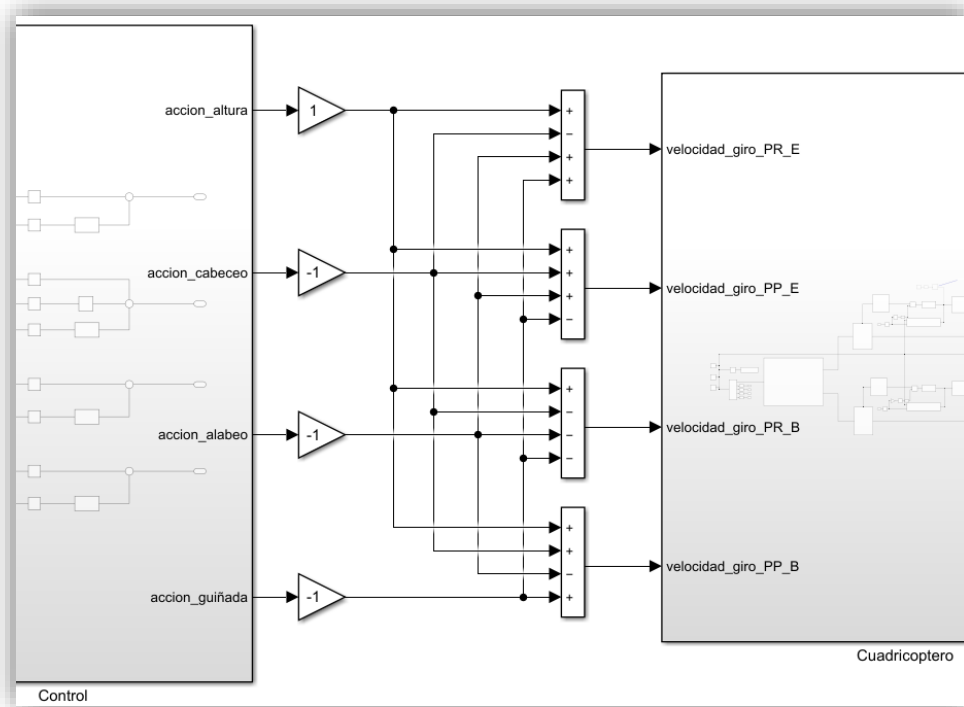


Ilustración 52. Actuación de las acciones de control sobre las hélices

### 5.2.6 Estructura final del control de actitud y altura

Además de los elementos descritos en apartados anteriores, también se sitúan otra serie de elementos cuya función es probar el control y analizar los resultados.

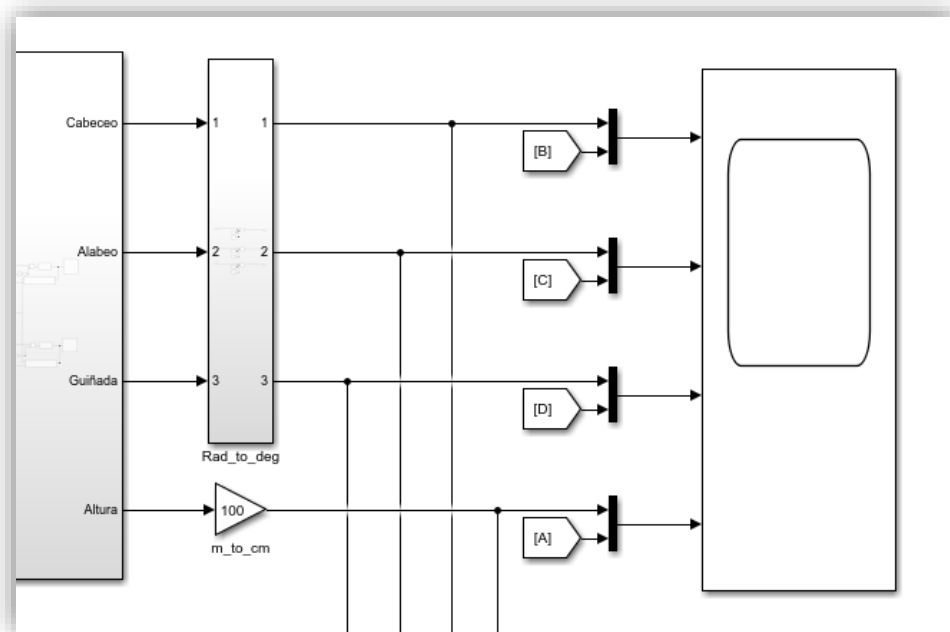
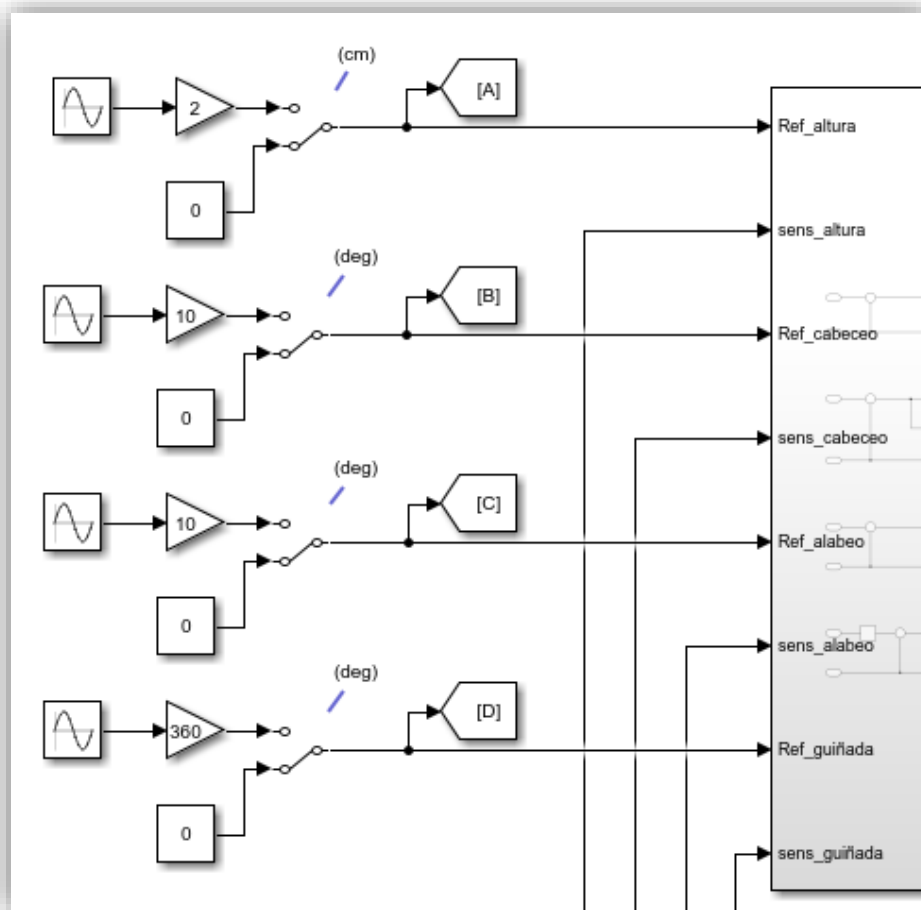


Ilustración 53. Salida de las variables a controlar

En la imagen anterior se puede apreciar como en la salida de los distintos ángulos del cuadricóptero se conecta el subsistema “Rad\_to\_deg” cuya única función es la de pasar el valor obtenido por los sensores de inclinación de radianes a grados decimales para una mayor comodidad.

También se puede observar un “Scope” con varias entradas, el cual se encarga de mostrar las gráficas que contraponen las referencias de posición con sus valores reales.

A continuación, se muestran los elementos situados a la entrada del controlador:



**Ilustración 54. Elementos para determinar las referencias de actitud y altura**

La función de estos elementos es poder determinar en tiempo real las referencias que se introducen a los reguladores. Tal como se ha implementado, se pueden determinar estas referencias mediante constantes numéricas, o se pueden introducir mediante ondas sinusoidales.

A continuación, se muestra una imagen general de todos los elementos de la simulación y el control:

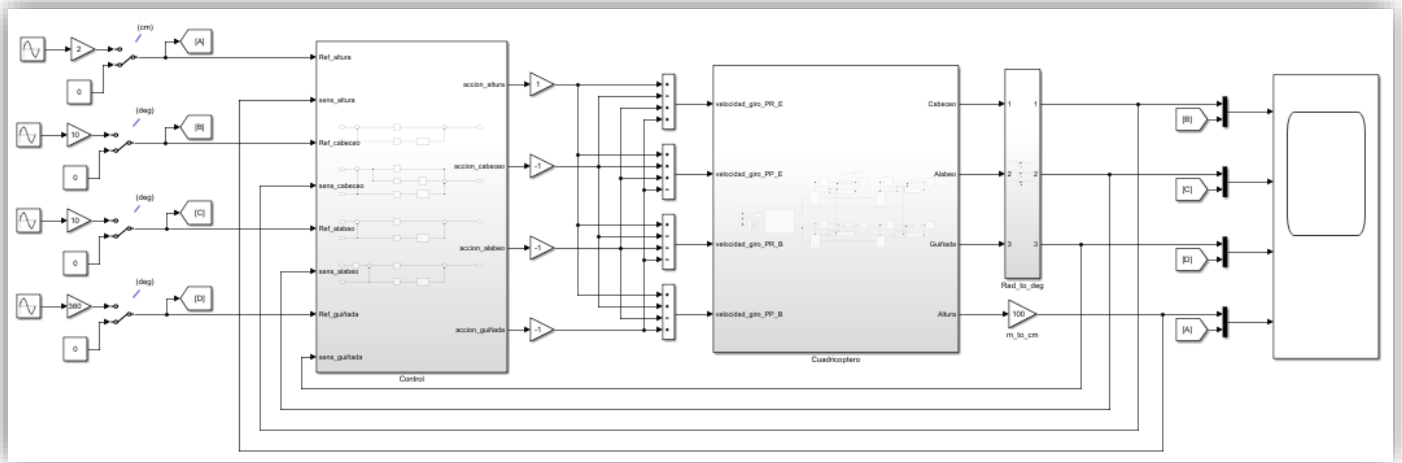


Ilustración 55. Diagrama de bloques de todo el conjunto

### 5.2.7 Sintonización de las ganancias de los controladores

Existen varios métodos para sintonizar las ganancias de un regulador PID, algunos de ellos son analíticos y otros experimentales. Los métodos analíticos utilizan la función de transferencia (función que define el comportamiento de un proceso) del sistema a controlar, por otro lado, los experimentales se basan en observar el comportamiento del propio sistema.

Algunos de los métodos experimentales más usados son los de: Ziegler-Nichols, el método del relé, CHR (Chien, Hrones y Reswick) y Cohen-Coon. Mientras que el método analítico por excelencia es el estudio del Lugar de las Raíces.

Se use el método que se use para determinar las ganancias, siempre suele ser necesario acabar de ajustarlas de forma manual. Esta sintonización manual se basa en las siguientes reglas:

#### Kp:

- Al aumentar la  $K_p$  se mejora el tiempo de establecimiento y se reduce el error en régimen estacionario.
- Al aumentar la  $K_p$ , aumenta la sobre oscilación y la inestabilidad del sistema

#### Ki:

- Al aumentar la  $K_i$ , se reduce el tiempo de establecimiento
- Al aumentar la  $K_i$ , se reduce la estabilidad

#### Kd:

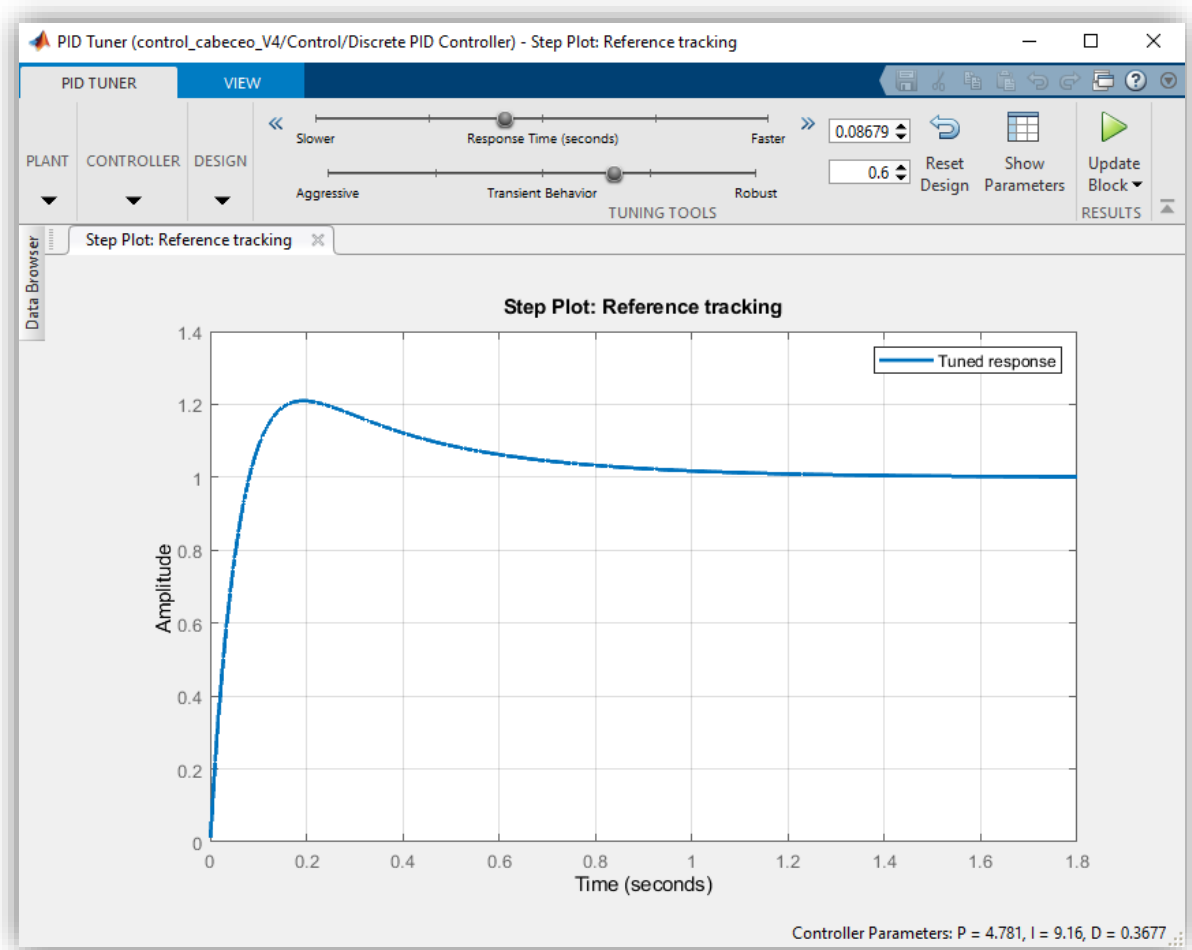
- Al aumentar la  $K_d$ , se aumenta la estabilidad y se reduce el tiempo de establecimiento
- Al aumentar la  $K_d$ , el sistema se vuelve más sensible a ruidos

Aprovechando la potencia de Matlab y Simulink, se decide ajustar las ganancias de los controladores mediante la herramienta “PID Tuner”, la cual determina automáticamente la función de transferencia aproximada del sistema y a partir de ella permite ajustar las ganancias del controlador basándose en la respuesta temporal del sistema.

Esta herramienta, permite ajustar el tiempo de establecimiento y el amortiguamiento de la respuesta del sistema ante una referencia de entrada con forma de escalón unitario. Estos parámetros se pueden ajustar mediante dos “slyders”. Al variarlos, se muestra el comportamiento del sistema mediante una gráfica con su respuesta temporal.

A continuación, se muestran las gráficas y las ganancias obtenidas para cada uno de los controles:

### Control de cabeceo



Gráfica 2. Sintonizado analítico del control de cabeceo

Después de ajustar las variables para obtener la respuesta deseada, las ganancias obtenidas son:

$$K_p = 4,781$$

$$K_i = 9,16$$

**Kd = 0,3677**

Estas ganancias se utilizan como punto de partida para acabarlas de ajustar manualmente a partir de la simulación. Se prueba el comportamiento ante distintos cambios de referencia y con introducción de perturbaciones y se van modificando las ganancias basándose en las reglas de comportamiento anteriormente comentadas.

Las ganancias obtenidas mediante el ajuste manual son:

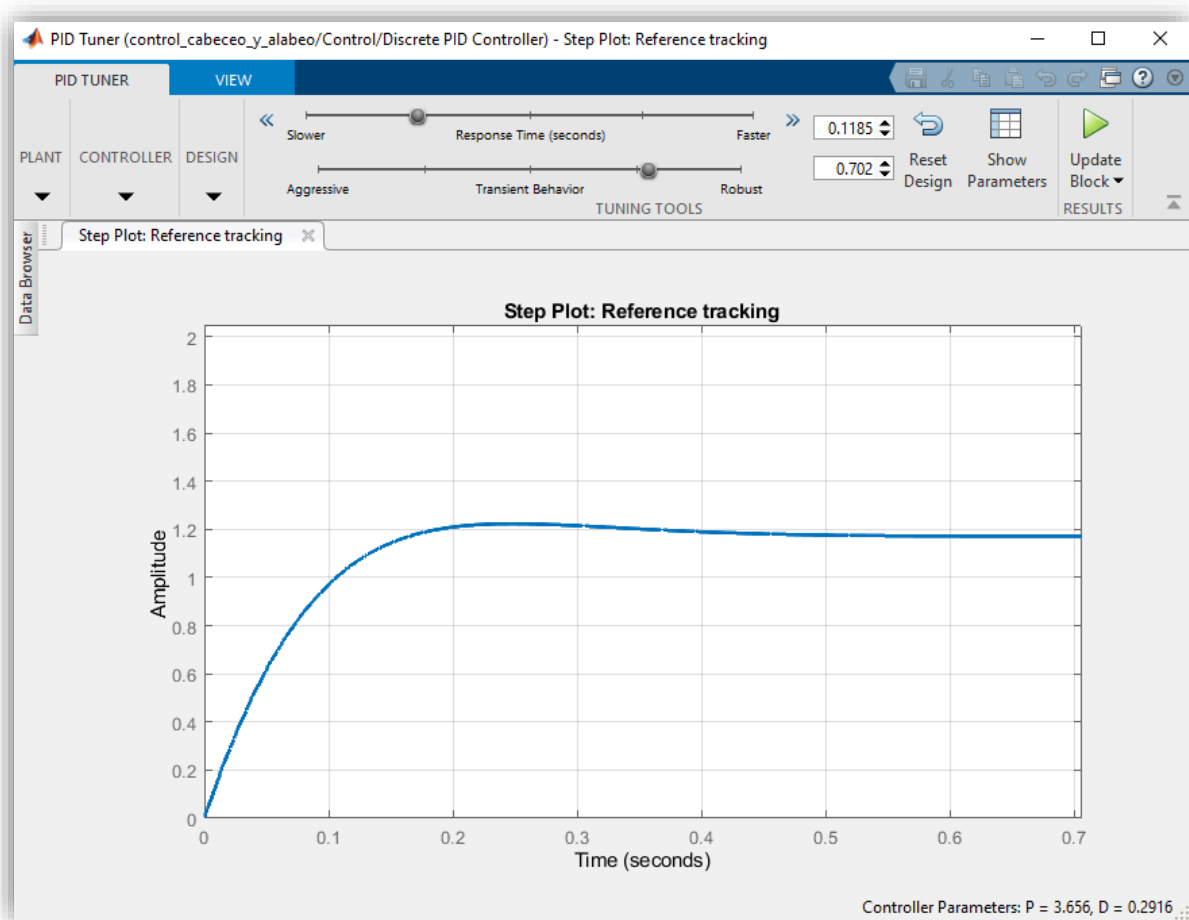
**Kp = 5,6**

**Ki = 3,0**

**Kd = 0,5**

Aunque las ganancias ajustadas no difieren demasiado de las propuestas por el método analítico, si cabe destacar la importante reducción de la **Ki**. Como se comenta anteriormente, en el problema de control de este artillugio es mucho más importante la estabilidad que el error estacionario, es por este motivo que se decide reducir notablemente esta ganancia para garantizar la estabilidad del sistema.

### Control de alabeo



Gráfica 3. Sintonizado analítico del control de alabeo

Después de ajustar las variables para obtener la respuesta deseada, las ganancias obtenidas son:

$$K_p = 3,656$$

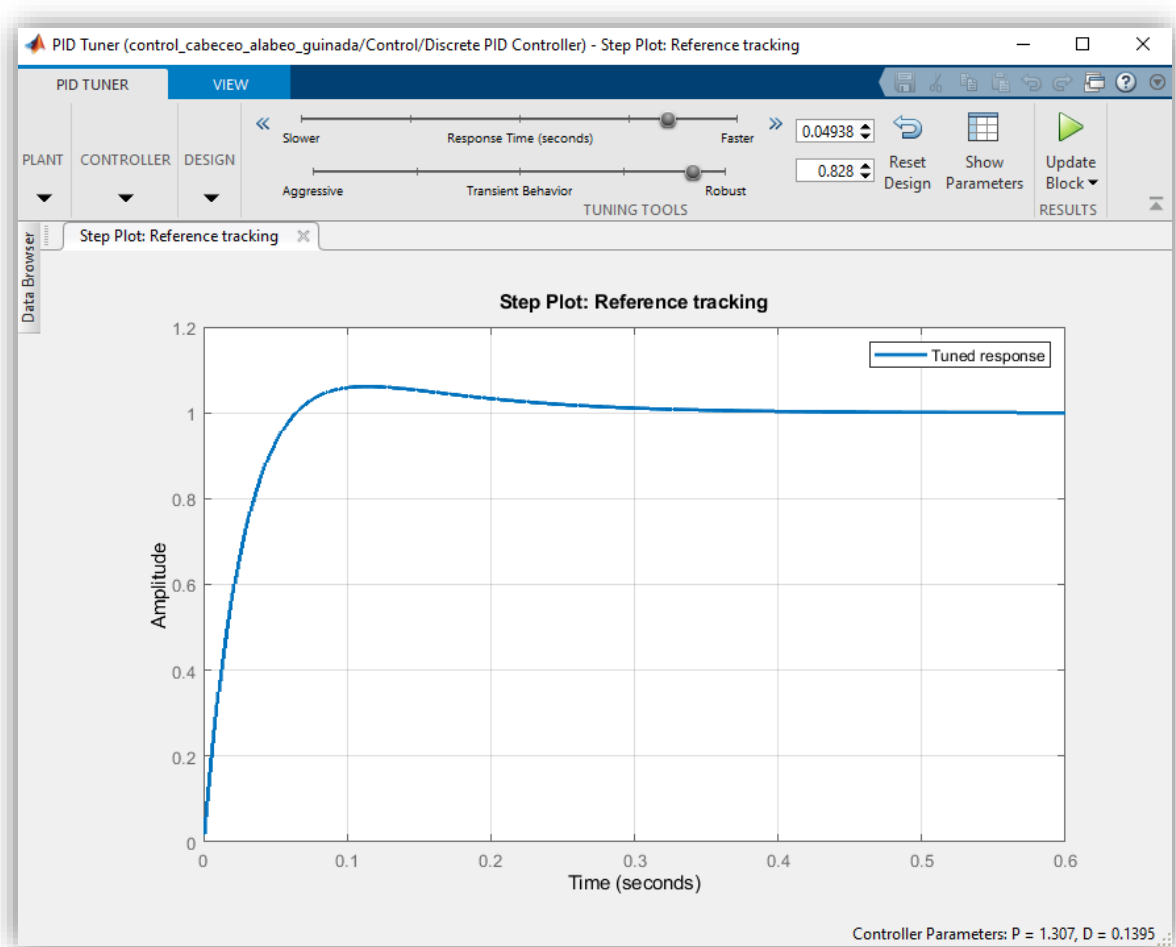
$$K_d = 0,2916$$

Las ganancias obtenidas mediante el ajuste manual son:

$$K_p = 4,6$$

$$K_d = 0,5$$

## Control de guiñada



Gráfica 4. Sintonizado analítico del control de guiñada

Después de ajustar las variables para obtener la respuesta deseada, las ganancias obtenidas son:

$$K_p = 1,307$$

$$K_d = 0,1395$$

Las ganancias obtenidas mediante el ajuste manual son:

$$K_p = 5$$

$$K_d = 0,4$$

En este caso se puede apreciar una notable diferencia entre los valores analíticos y los ajustados manualmente. Esto se debe a que la regulación de este parámetro tiene una incidencia muy importante sobre la altura del cuadricóptero, ya que al hacer rotar las hélices para que generen un determinado par que haga girar la embarcación, éstas también generan un elevado empuje.

Es por este motivo que, como ya se ha expuesto anteriormente, se modifica la estructura de control añadiendo un bloque "Rate Limiter". Esto modifica el comportamiento del control haciendo que lleguen cambios de referencia más suaves al regulador, permitiendo poner unas ganancias más altas.

### Control de altura

Como se ha expuesto anteriormente, el control de altura es el menos crítico de todos, y se acepta un amplio margen de error en el seguimiento de las referencias. Es por este motivo que se descarta realizar el estudio mediante métodos analíticos que se ha usado para determinar las ganancias de los otros controladores.

La metodología para sintonizar este controlador consiste simplemente en ajustar la  $K_p$  de tal manera que el error en régimen estacionario sea aceptable, aumentar poco a poco la  $K_i$  hasta que la reducción del error estacionario sea lo suficientemente rápida, y luego modificar la  $K_d$  hasta conseguir un comportamiento dinámico óptimo. Las ganancias obtenidas son las siguientes:

$$K_p = 27,5$$

$$K_i = 5,2$$

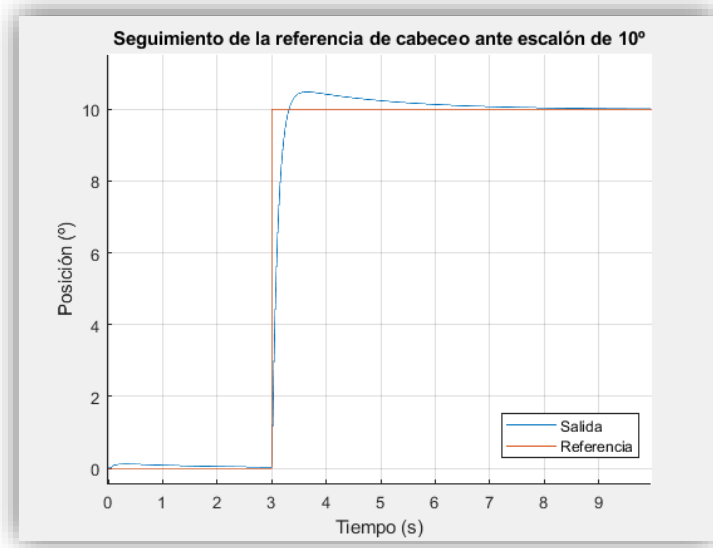
$$K_d = 0,5$$

#### 5.2.8 Pruebas de seguimiento de referencias

A continuación, se muestran las pruebas de seguimiento de referencias para cada uno de los grados de libertad del control de actitud y altura.

### Cabeceo

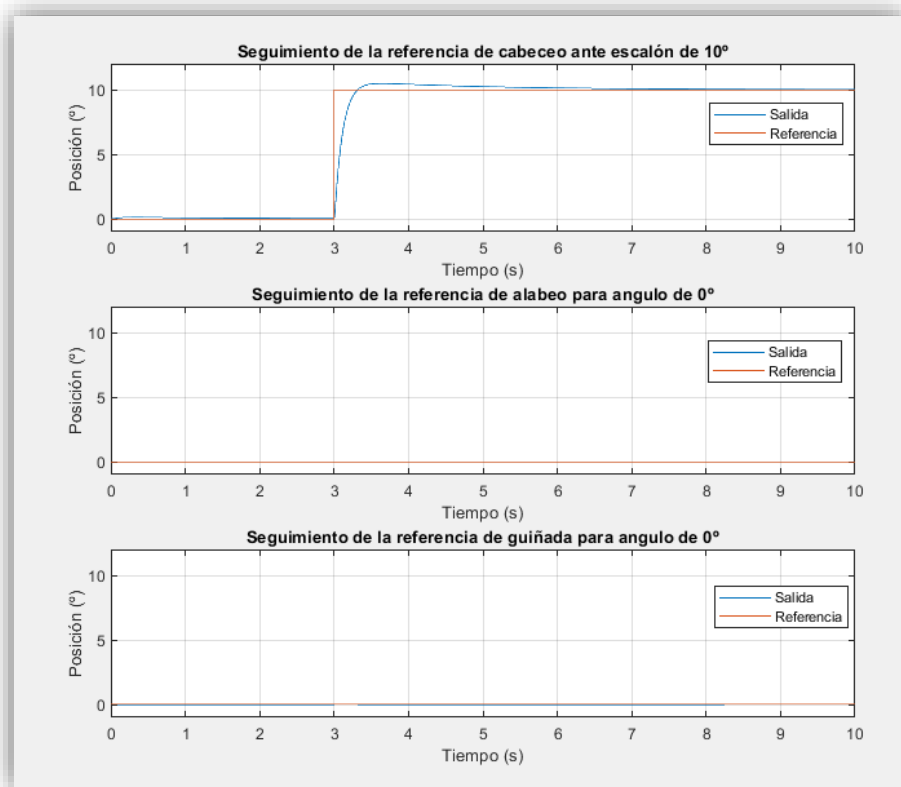
En primer lugar, se muestra el seguimiento de la referencia de cabeceo ante un escalón de  $10^\circ$ , el cual es el máximo valor esperado durante un funcionamiento normal de la embarcación.



Gráfica 5. Seguimiento de la referencia de cabeceo

Como se puede observar, hay una pequeña sobre oscilación la cual es provocada por la inercia del sistema y sobre todo por la acción integral del controlador. Dicha sobre oscilación es del **4,8%**, lo cual se encuentra dentro de valores seguros y aceptables.

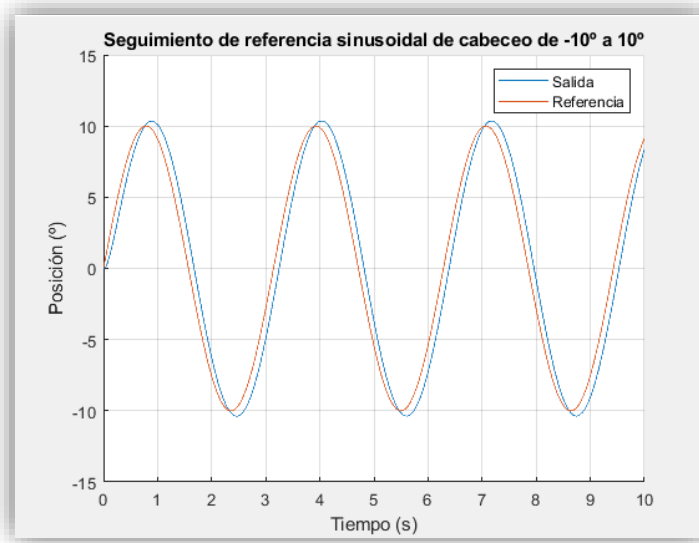
A continuación, se muestra la respuesta del resto de controles de actitud ante el cambio en la referencia de cabeceo:



Gráfica 6. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de cabeceo



Como se puede apreciar, el cambio en la referencia de cabeceo provoca una perturbación prácticamente nula en el resto de variables, la cual cosa indica un correcto funcionamiento de los otros controladores.

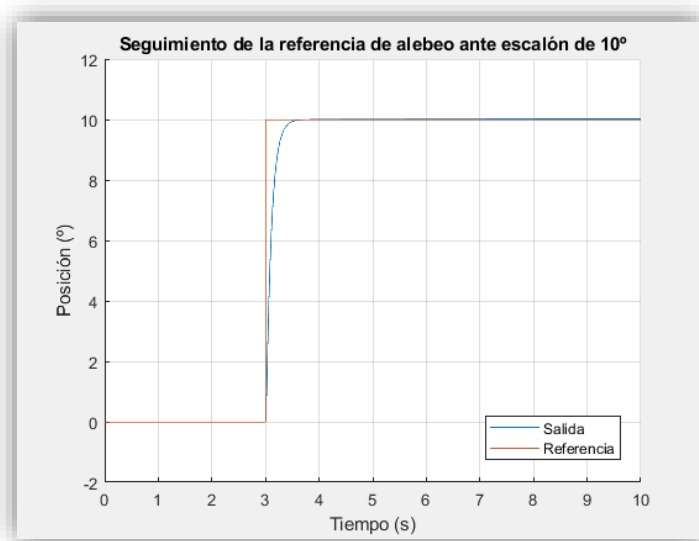


Gráfica 7. Seguimiento de referencia sinusoidal de cabeceo

En el seguimiento de la referencia sinusoidal, también se obtiene el comportamiento esperado.

Se puede apreciar un ligero retraso en el seguimiento de la referencia, el cual es totalmente normal y se debe a que el controlador necesita un mínimo de tiempo para actuar. También se observa que en los picos de la onda sinusoidal el valor de salida es ligeramente superior al de la referencia, esto se debe a la acción integral del controlador. Este comportamiento no afecta al correcto funcionamiento de la embarcación.

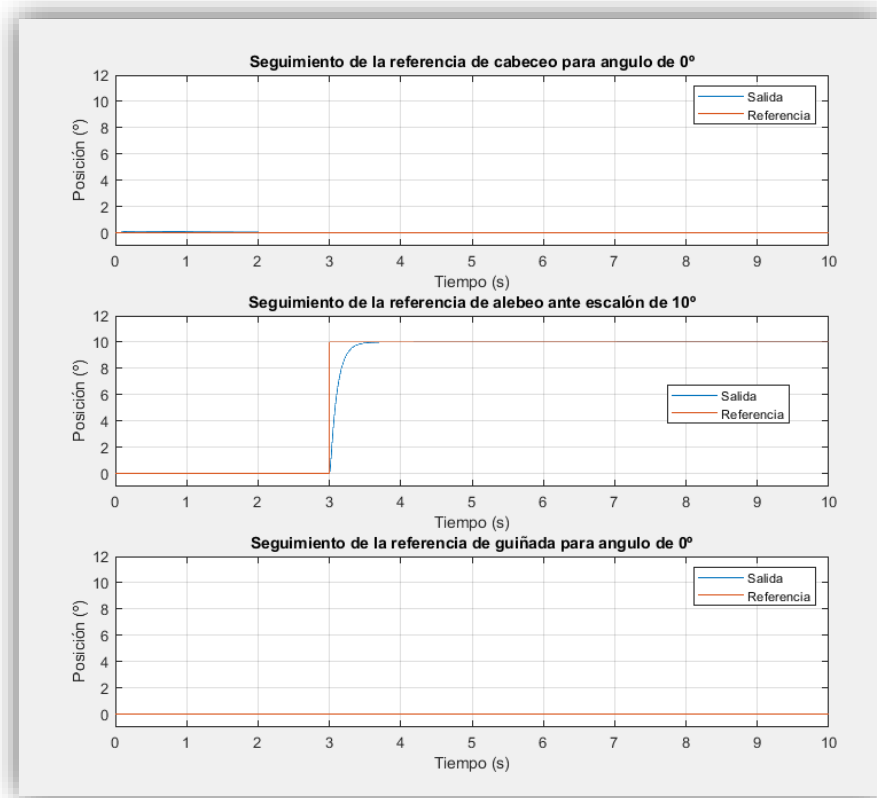
## Alabeo



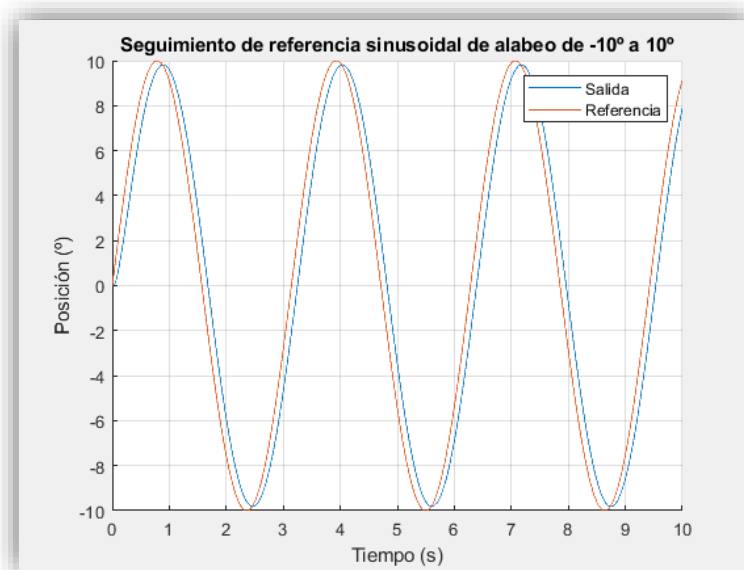
Gráfica 8. Seguimiento de la referencia de alabeo

En la gráfica del seguimiento de la referencia en el alabeo se puede apreciar un excelente comportamiento, con una sobre oscilación prácticamente nula.

Al igual que con el control de cabeceo, el seguimiento de la referencia no implica variaciones significativas en el resto de ángulos del cuadricóptero:

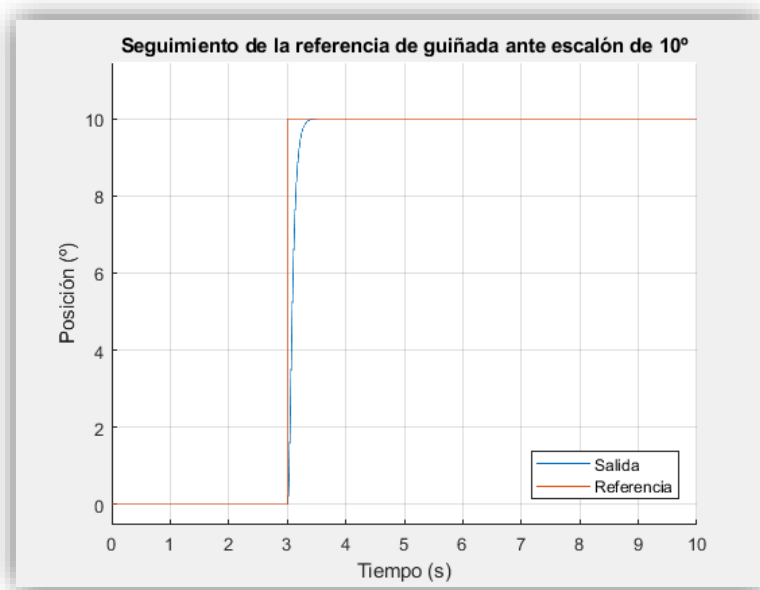


Gráfica 9. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de alabeo



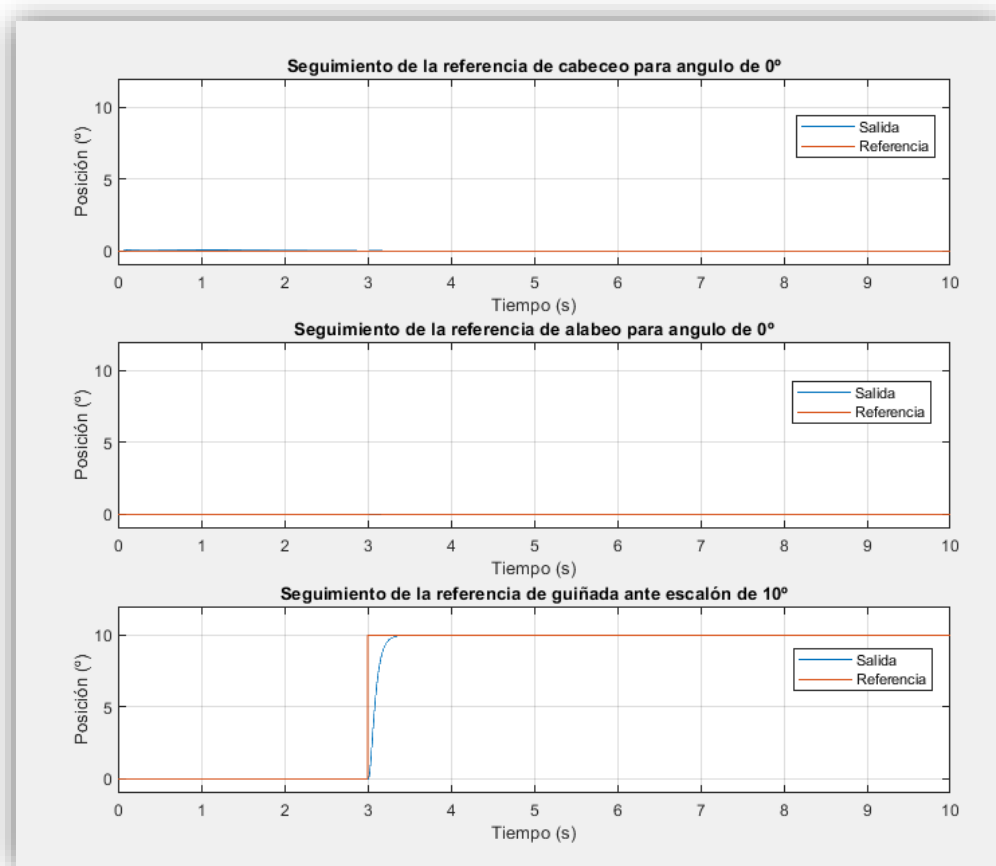
Gráfica 10. Seguimiento de referencia sinusoidal de alabeo

## Guiñada



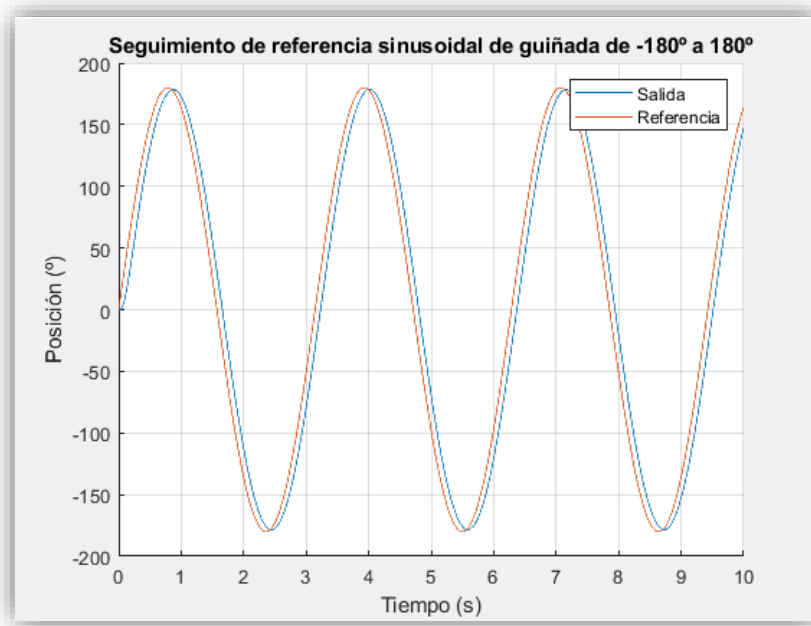
Gráfica 11. Seguimiento de la referencia de guiñada

Se aprecia un seguimiento correcto de la referencia sin error en régimen permanente ni sobre oscilación.



Gráfica 12. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de guiñada

Al igual que con el resto de controladores, la regulación de la guiñada no tiene afectaciones negativas en el resto de movimientos.



Gráfica 13. Seguimiento de referencia sinusoidal de guiñada

Se puede apreciar un correcto seguimiento de la onda sinusoidal con muy poco retraso entre la señal de referencia y la de salida.

### Altura

Esta variable de control tiene la particularidad de que no se esperan cambios de referencia durante el funcionamiento normal del cuadricóptero.

El único cambio esperado se da en el momento en el que la embarcación empieza a funcionar, en el que pasa de estar en reposo con las hélices paradas y los patines flotando sobre el agua, a estar “en vuelo”.

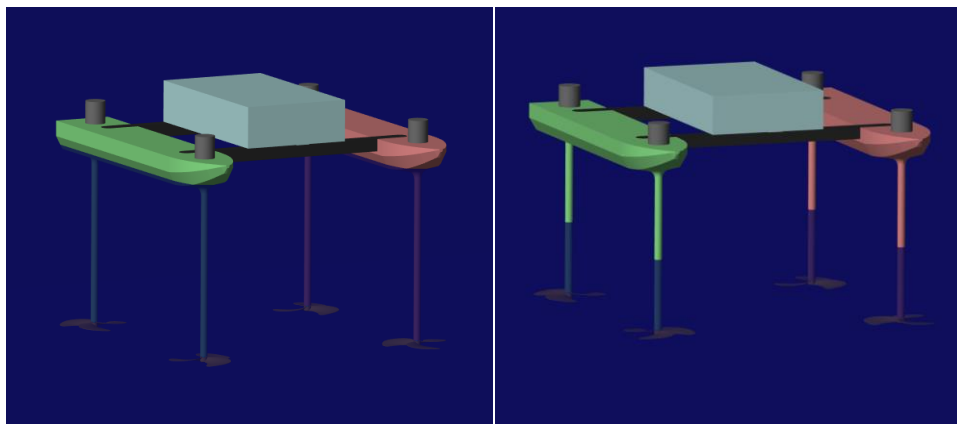
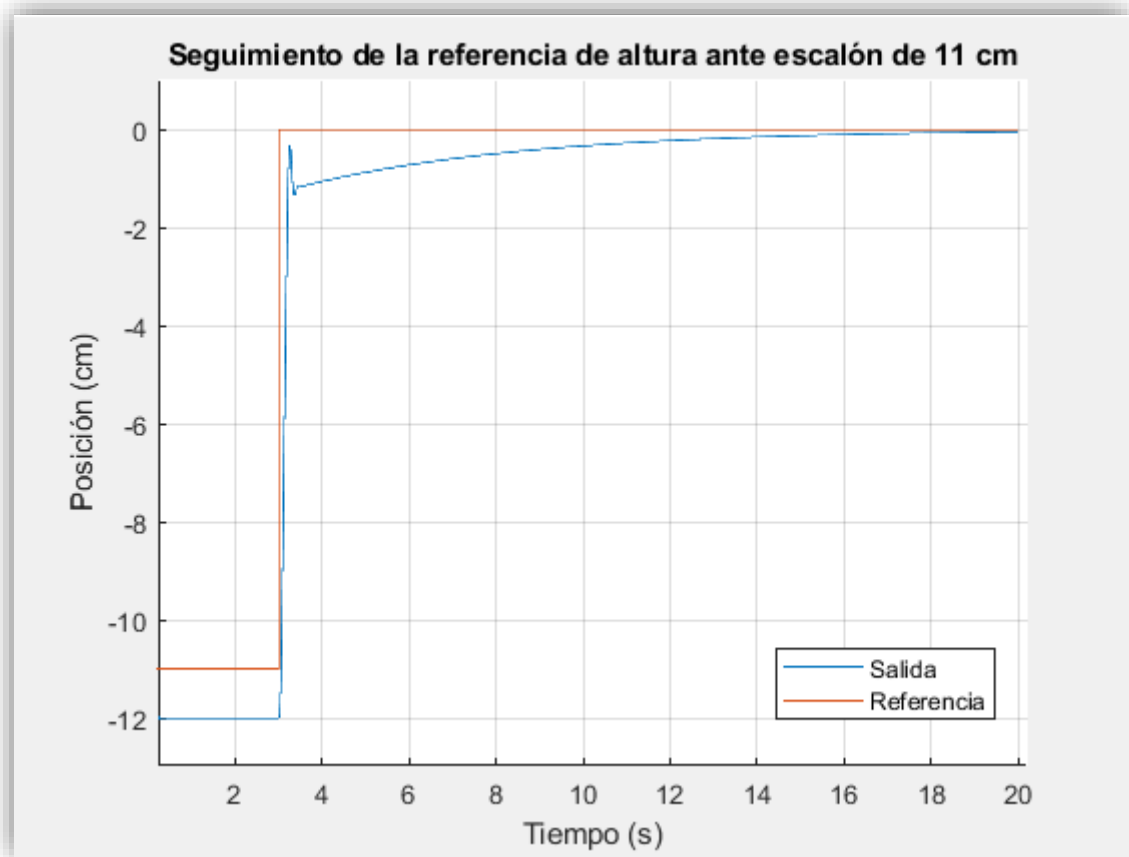


Ilustración 56. Paso de embarcación a flote a embarcación en vuelo

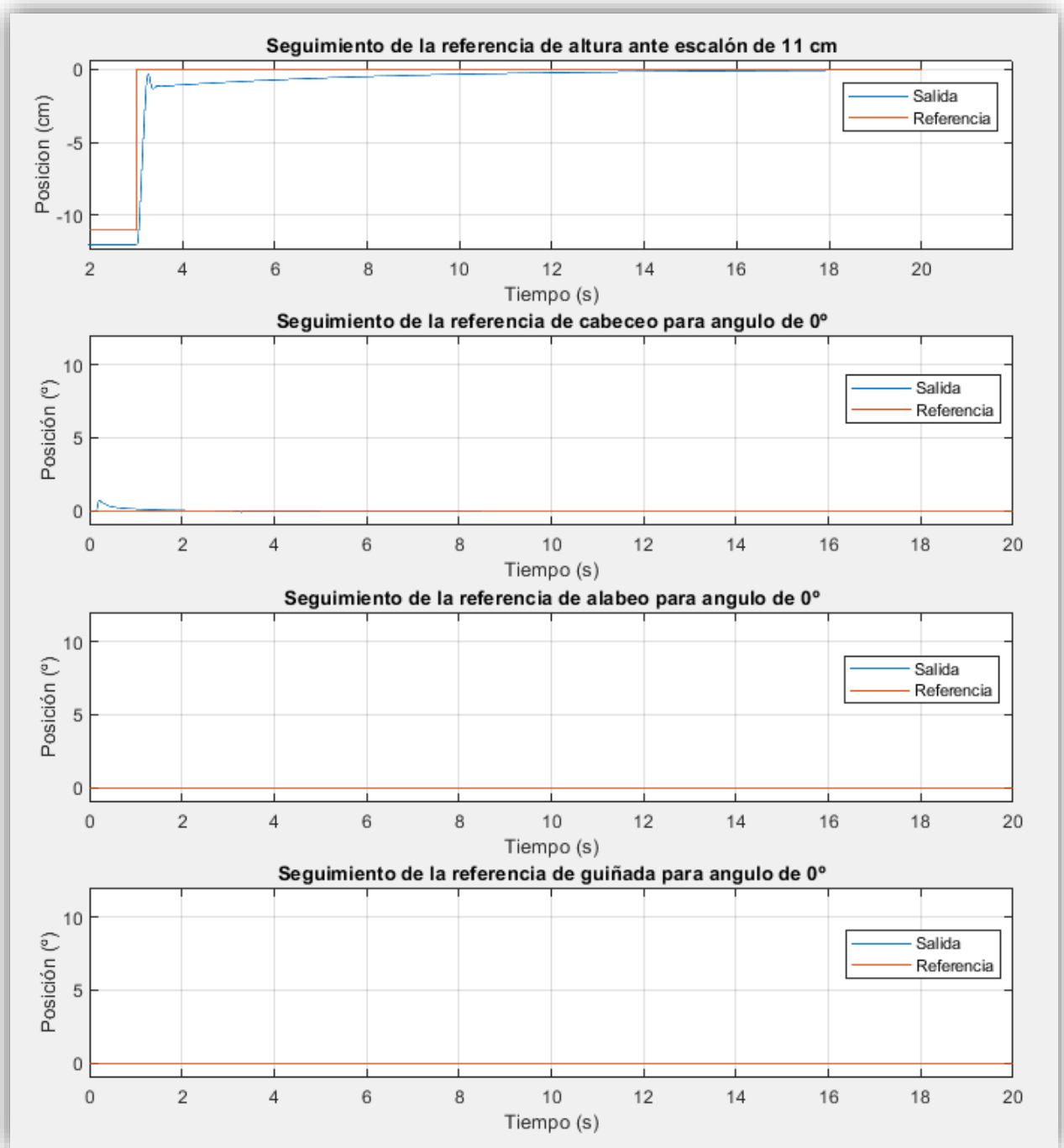
Tal como se ha implementado el modelo, la posición con la embarcación en vuelo presenta un valor de **0 cm** de altura. Por contra, la posición con la embarcación a flote presenta una altura de **-11 cm**. Es por este motivo que las pruebas de seguimiento de la referencia para este controlador se realizan partiendo de una posición de **-11 cm** para pasar a la posición de **0 cm**.



Gráfica 14. Seguimiento de la referencia de altura

De la anterior gráfica se puede apreciar como en el estado inicial la salida dista mucho de la referencia, en este momento los motores están parados y por tanto el controlador no actúa. Una vez la embarcación entra en vuelo el seguimiento de la referencia es correcto y no se provoca ninguna sobre oscilación peligrosa.

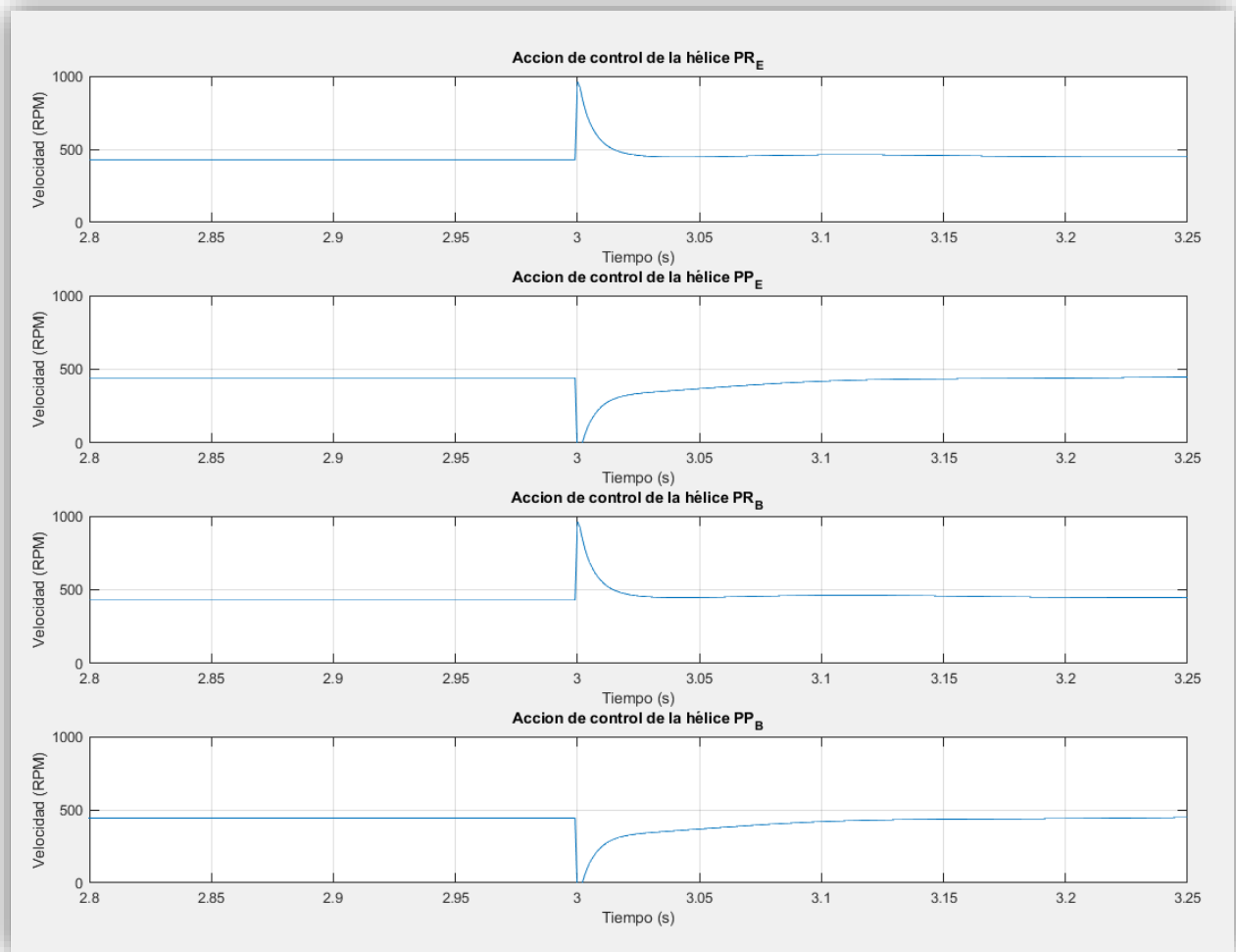
Como se aprecia en la siguiente gráfica, al igual que en el resto de controladores, el cambio en la referencia de esta variable no afecta a las otras variables. Con lo cual se puede afirmar que todos los reguladores funcionan correctamente y que la implementación de las acciones de control sobre las hélices es correcta.



Gráfica 15. Respuesta de los controles de actitud ante un cambio en la referencia de altura

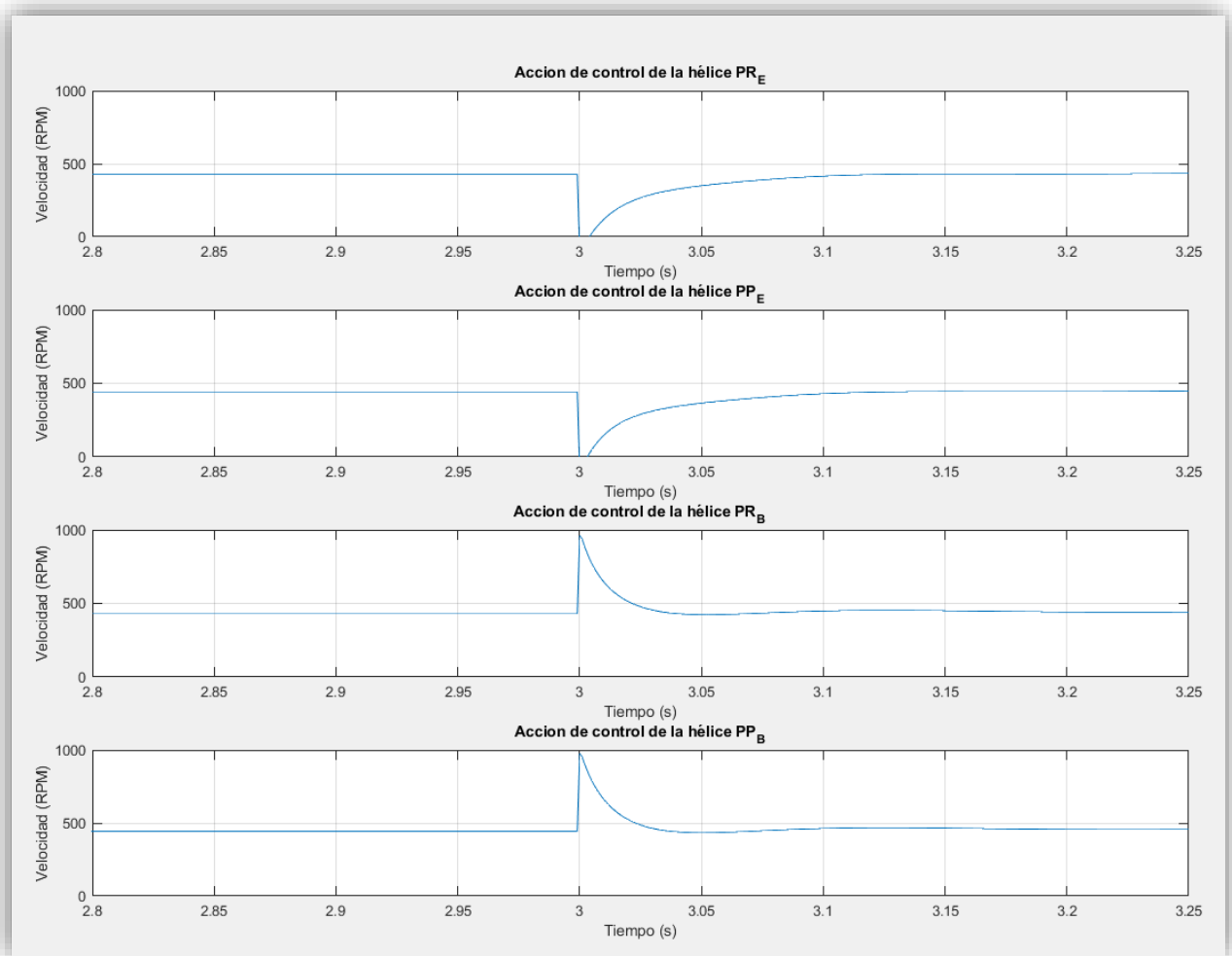
### Acciones de control

A continuación, se muestran las acciones de control para los cambios de referencia estudiados anteriormente.



Gráfica 16. Acciones de control para cambio de 10° en la referencia de cabeceo

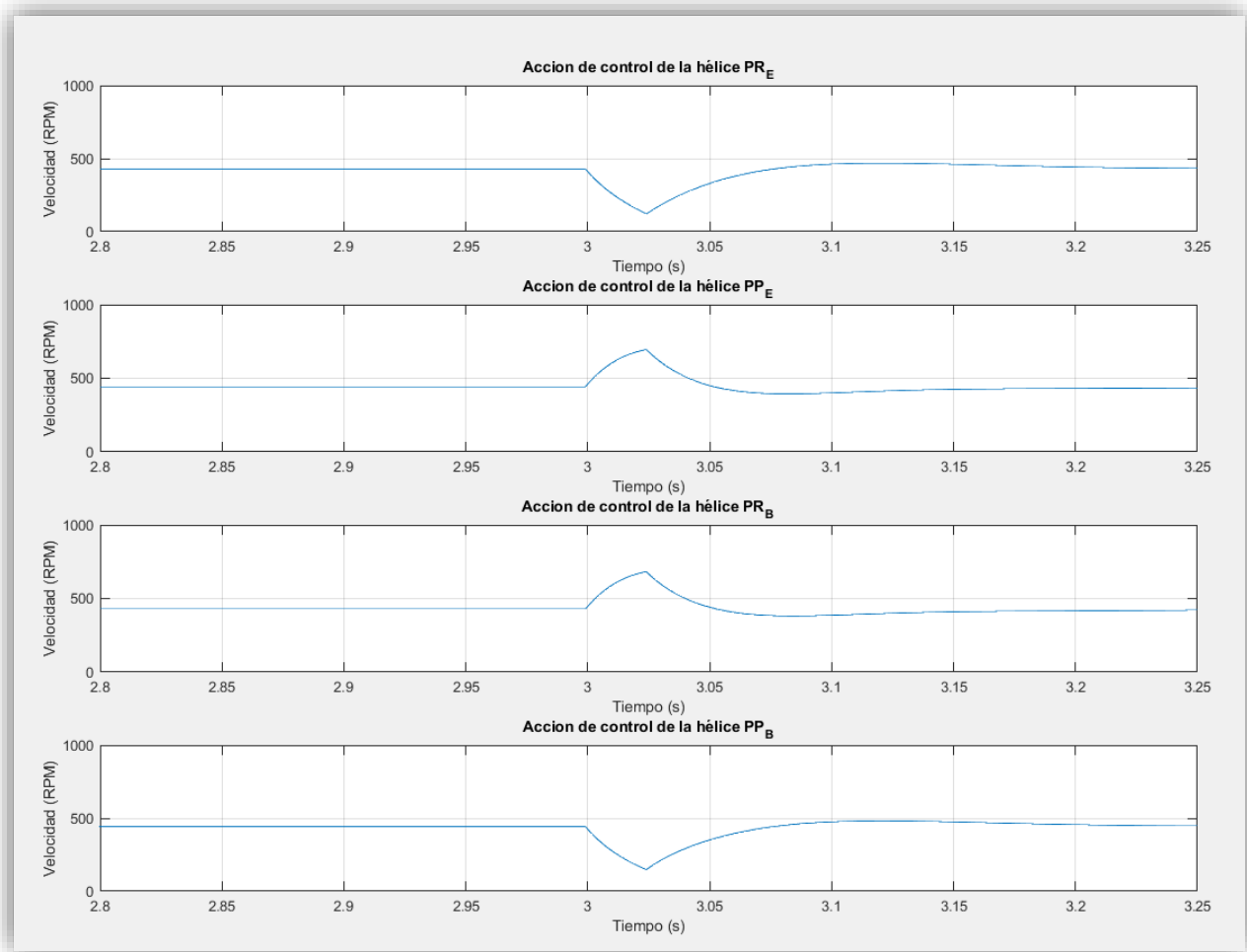
Como es de esperar, se puede apreciar como las acciones de control de las hélices de proa son opuestas a las de popa.



**Gráfica 17. Acciones de control para cambio de 10° en la referencia de alabeo**

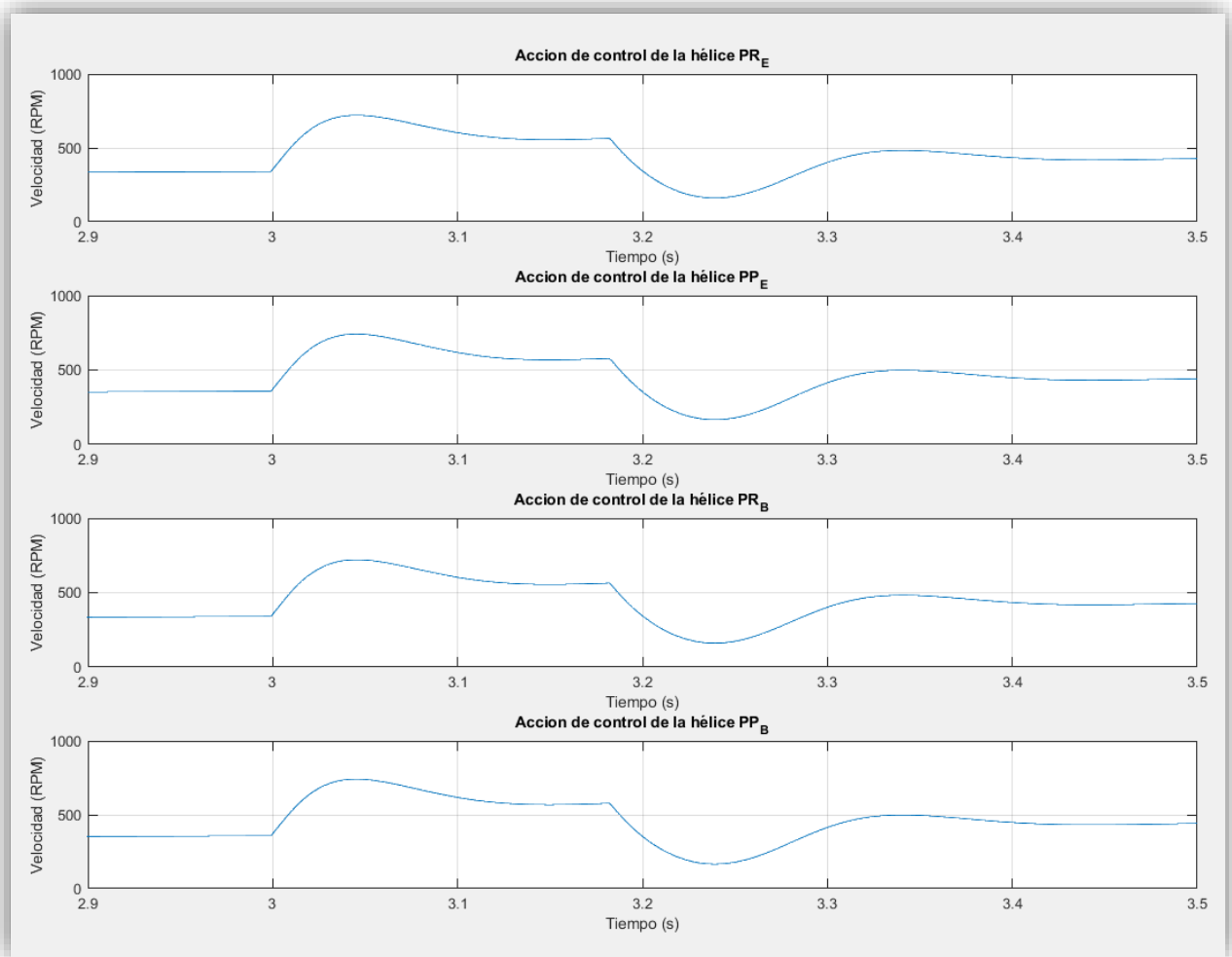
De forma análoga a lo sucedido en el movimiento de cabeceo, en este caso se puede observar como las acciones de las hélices de cada uno de los costados actúan a la par, y que las de estribor tienen una respuesta contraria a las de babor.





Gráfica 18. Acciones de control para cambio de 10° en la referencia de guiñada

En el movimiento de guiñada, se puede observar como las hélices dextrógiras giran a la par y su comportamiento es contrario a las levógiras.



Gráfica 19. Acciones de control durante la puesta en vuelo de la embarcación

En esta última grafica se muestran las acciones de control en el momento de elevación del cuadricóptero.

Se puede observar como las salidas son prácticamente idénticas, la cual cosa tiene sentido ya que lo único que se pretende es propulsar la embarcación hacia arriba sin que se produzca ningún par que pueda generar otros movimientos.

Algo que puede llamar la atención es que, en el momento previo a la elevación del cuadricóptero, la simulación muestra que las hélices ya están girando a cierta velocidad. Esto es debido a que la simulación no contempla el efecto estabilizador de los patines cuando estos están tocando el agua, por tanto, en este momento las hélices ya están girando para intentar mantener estable la embarcación.

Los motores sin escobillas utilizados para modelismo suelen alcanzar velocidades de **3.000 RPM** (y algunos modelos de altas prestaciones pueden llegar incluso a **10.000 RPM**). Por tanto, del análisis de todas las acciones de control estudiadas se concluye que el sistema funciona correctamente y que su implementación real sería viable, ya que el valor de las acciones de control en ningún caso supera las **1.000 RPM**, la cual cosa proporciona un amplio margen.

### 5.2.9 Pruebas de respuesta ante perturbaciones

Para probar la respuesta del sistema ante perturbaciones, se acopla un bloque “External Force and Torque” en uno de los extremos de la embarcación. Este bloque tiene como input la suma de dos “steps” que le hacen ejercer una fuerza de **5 N** en el eje X durante 2 segundos.

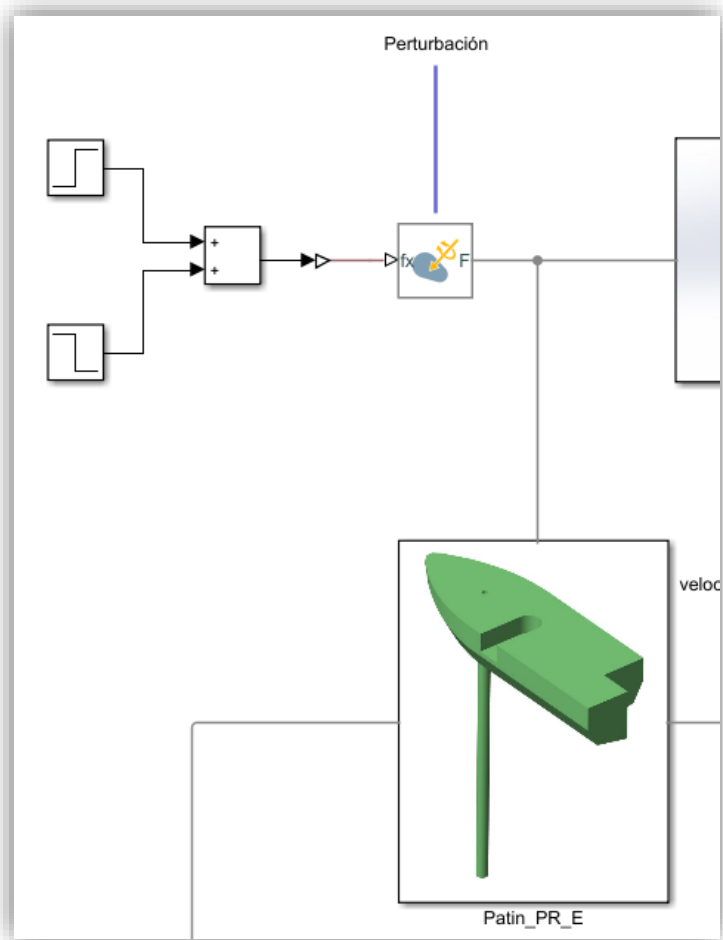
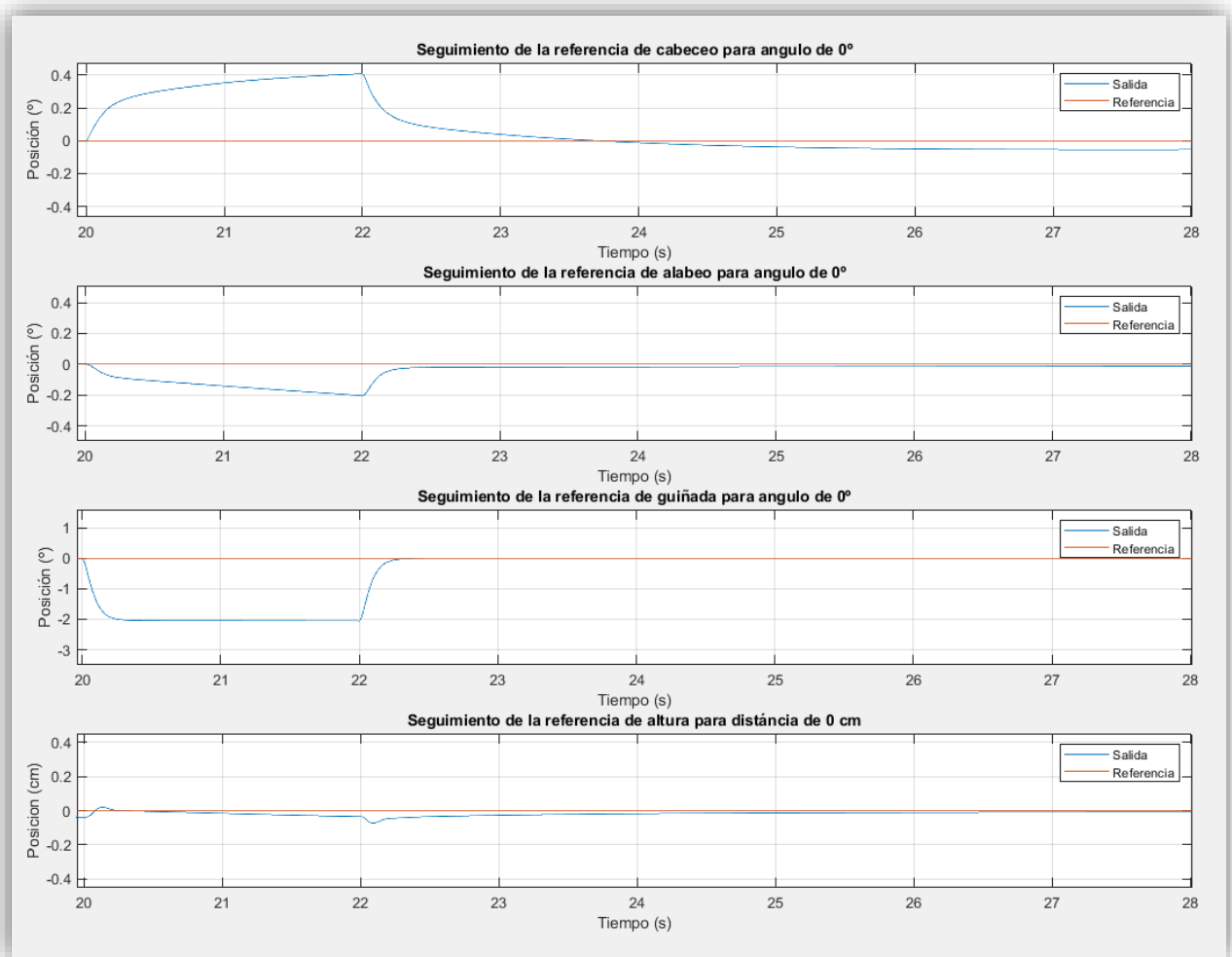


Ilustración 57. Introducción de perturbaciones en el modelo

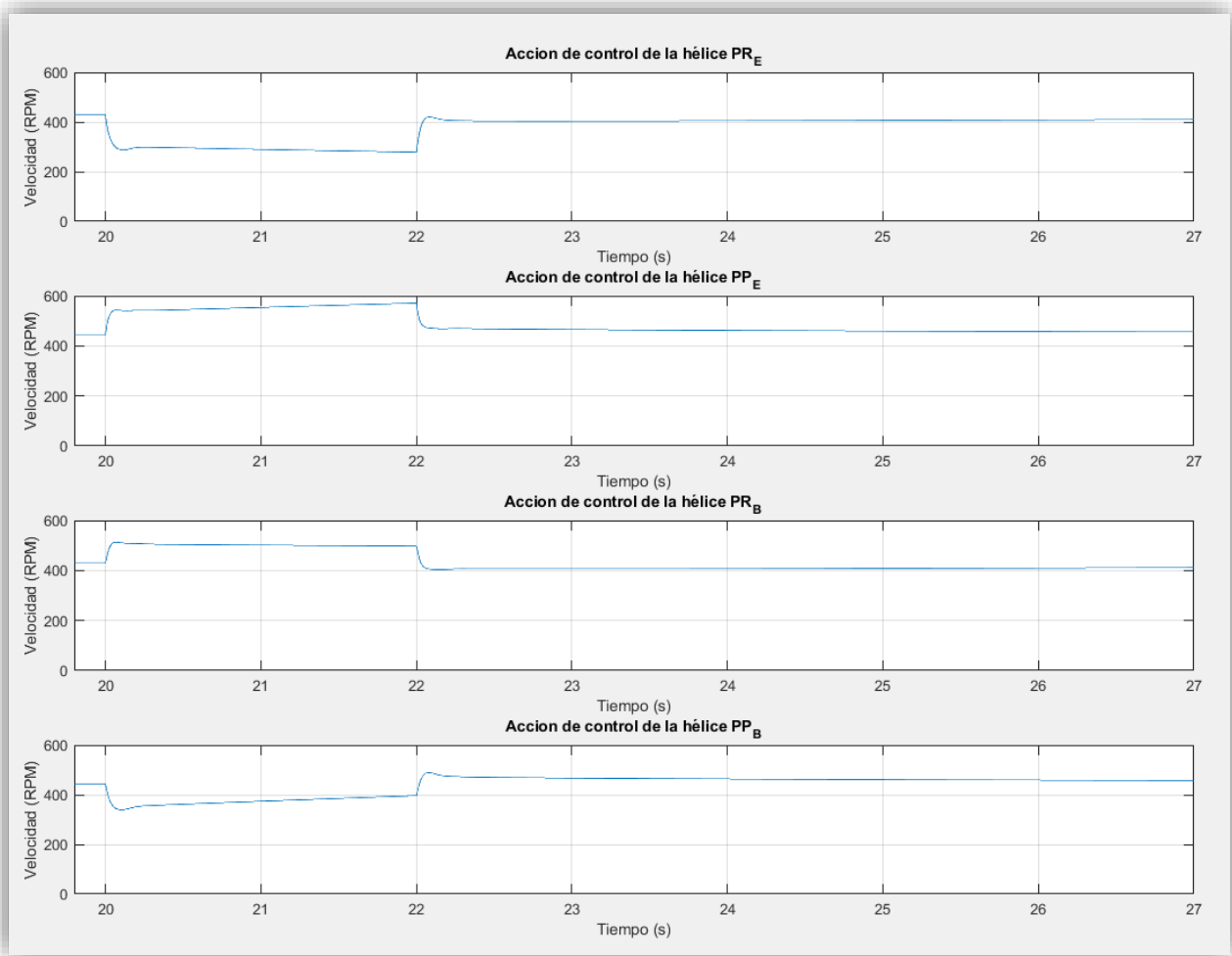
Teniendo en cuenta las reducidas dimensiones y peso de la embarcación, se puede concluir que, si reacciona correctamente a esta perturbación de **5N**, el sistema de estabilización es suficientemente robusto.

A continuación, se muestra como varían los movimientos de actitud y altura intentando seguir una referencia de valor **0**, cuando el sistema se somete a la citada perturbación:



Gráfica 20. Seguimiento de referencias nulas ante perturbación de 5 N

Como se puede apreciar en las unidades del eje Y de las gráficas, las variaciones de los parámetros a controlar son muy bajas. Por lo tanto, se puede afirmar que el sistema de control funciona correctamente ante perturbaciones.



Gráfica 21. Acciones de control ante perturbación de 5 N

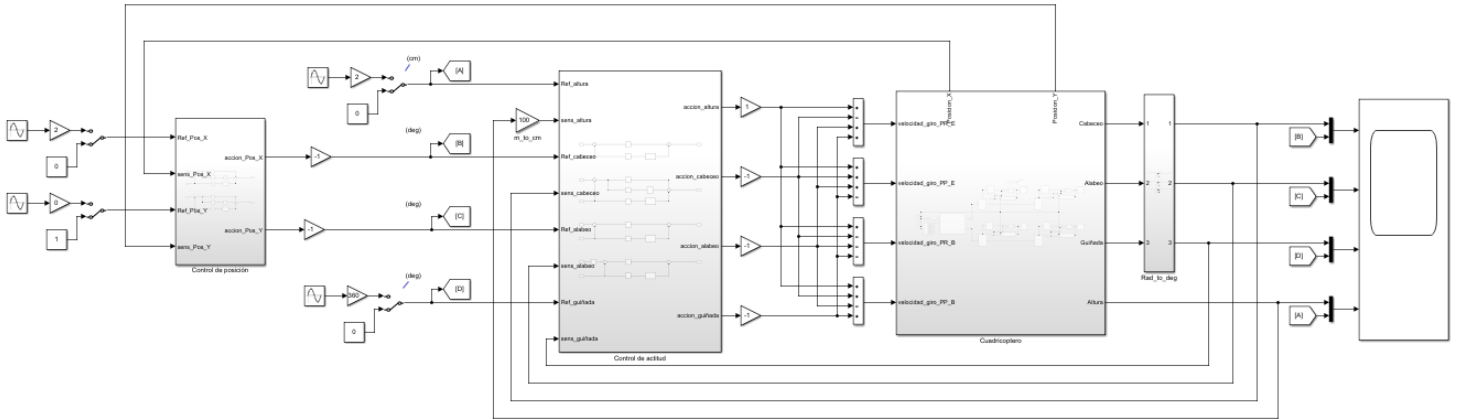
También se puede apreciar como el valor de las acciones de control frente a la perturbación se mantiene dentro de unos márgenes más que aceptables.

### 5.3 Control de posición

La idea del control de posición es poder situar la embarcación en cualquier punto deseado del plano **XY**, es decir de la superficie del agua.

Con el fin de simplificar el control, se decide que el posicionamiento de la embarcación sea controlado solamente mediante los ángulos de cabeceo y alabeo.

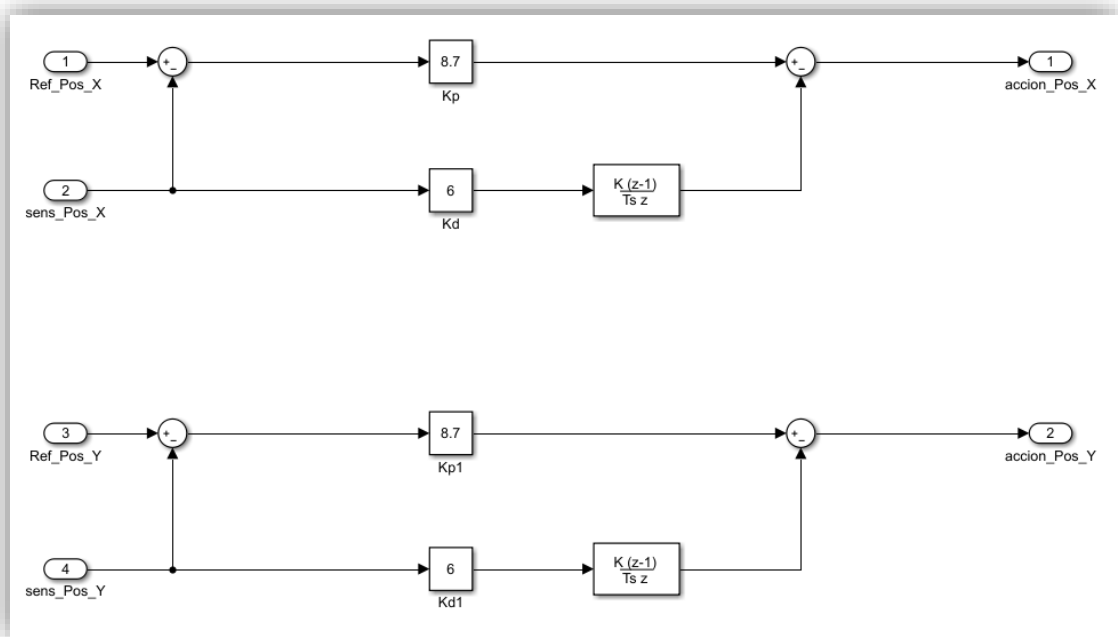
Partiendo de estas premisas, lo que se debe hacer para implementar el control de posición, es cerrar otro bucle de control que actúe sobre la determinación de las referencias de cabeceo y alabeo del control de actitud.



**Ilustración 58. Implementación del control de posición**

Este segundo bloque de control cuenta con dos reguladores PD (uno para el cabeceo y otro para el alabeo) y obtiene las señales de posición de la articulación cartesiana que lo une con el “Frame” del mundo, en una implementación real estos valores vendrían dados por un GPS.

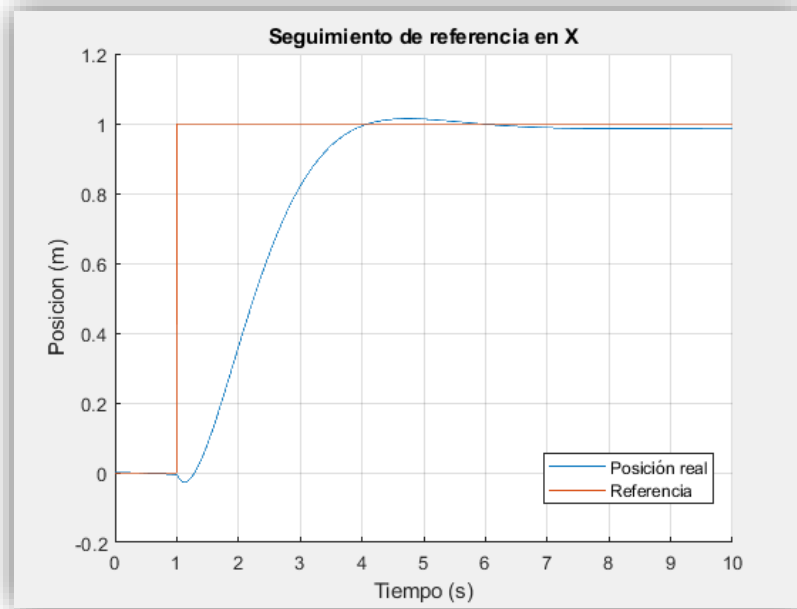
A continuación, se puede observar la implementación dentro del subsistema “Control de Posición”:



**Ilustración 59. Estructura del control de posición**

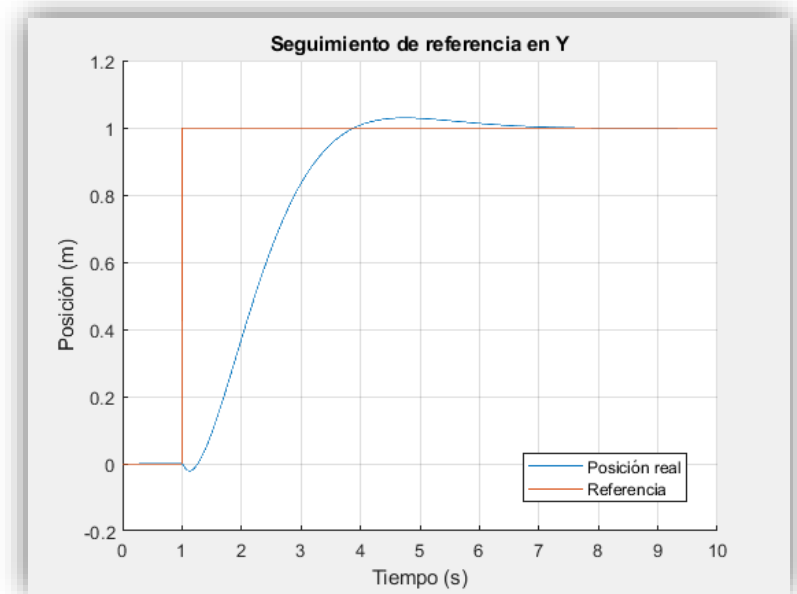
### 5.3.1 Pruebas de seguimiento de referencias

A continuación, se muestra la respuesta temporal del sistema ante un escalón unitario en la referencia de posición en X:



Gráfica 22. Seguimiento de la referencia de posición en X

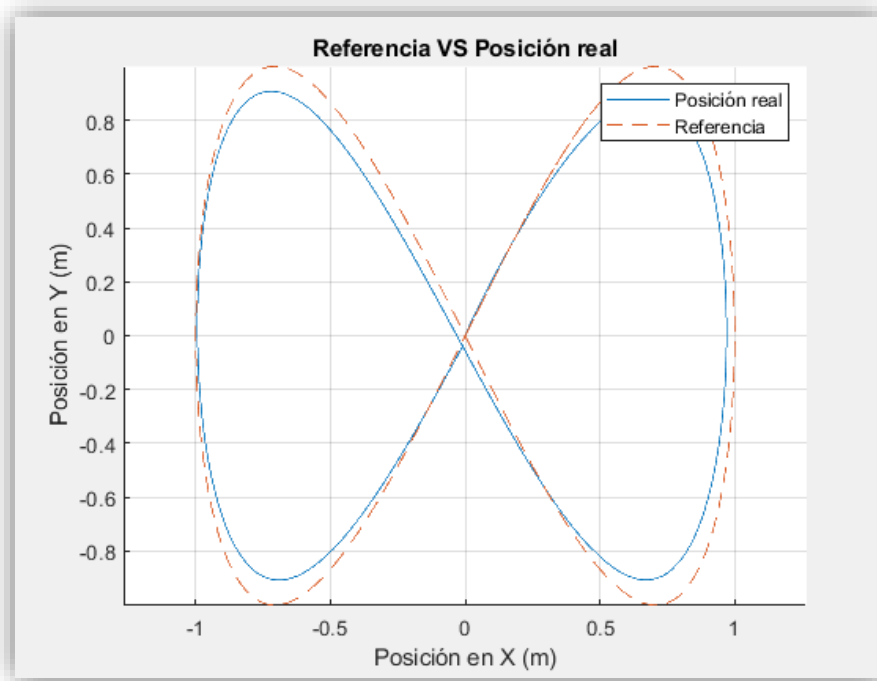
Se puede apreciar un seguimiento de la referencia aceptable (con solo un error del **1,32%**). En cuanto al tiempo de establecimiento, el valor también es totalmente aceptable ya que se tolera que la embarcación necesite cierto tiempo para desplazarse hasta la posición deseada.



Gráfica 23. Seguimiento de la referencia de posición en Y

De la respuesta en la posición en el eje Y, se aprecia un seguimiento de la referencia perfecto (debido a la parte integral que presenta el sistema por sí mismo); y un tiempo de establecimiento casi idéntico al de la posición en X.

La última prueba realizada consiste en introducir dos referencias sinusoidales al sistema. Una de las referencias tiene el doble de frecuencia que la otra, con esto se consigue que el cuadricóptero volador describa un movimiento de “ocho”. Las frecuencias de las ondas sinusoidales son de **0,4 rad/s** en el eje X y de **0,8 rad/s** en el eje Y.



Gráfica 24. Seguimiento de referencias sinusoidales simultaneas

El seguimiento de las referencias a tiempo real no es del **100%**, la cual cosa es normal ya que el control necesita un tiempo para que el sistema se establezca en la posición deseada. Aun así, se puede observar un comportamiento optimo.



## Capítulo 6. Impresión 3D del prototipo.

Como se comenta anteriormente, el diseño del cuadricóptero está pensado para poderse imprimir en 3D. En el presente capítulo se definen el proceso y los parámetros para poder imprimir cada una de las piezas.

La impresión 3D es una tecnología que permite fabricar casi cualquier tipo de objeto mediante la adición de capas de material termofusible. Para ello, se desplaza un extrusor (o boquilla), el cual es accionado por motores paso a paso, que va depositando material en los sitios necesarios para poder formar la pieza deseada a partir de estratos de material. Es por este motivo que a esta tecnología se le llama fabricación aditiva.

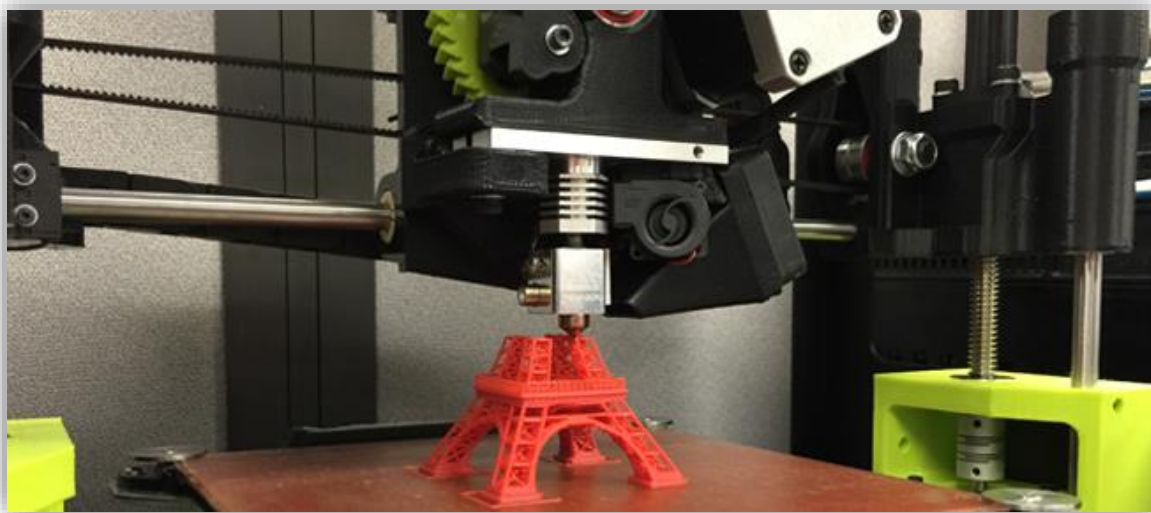


Ilustración 60. Ejemplo de impresión 3D [12]

Una vez se ha diseñado una pieza en 3D y se obtiene un archivo que representa los cuerpos sólidos de dicha pieza (normalmente un archivo tipo **.STL**), este archivo se debe procesar y transformarse en otro tipo de archivo que represente todas las acciones que deberá realizar la impresora 3D para fabricar la pieza en cuestión. Dicho archivo (que suele ser del tipo **.gcode**) contiene parámetros como: posiciones y velocidades de desplazamiento de la boquilla, velocidad a la que se extruye material, temperatura a la que se calienta el material, temperatura de la cama (o base de impresión), activación y desactivación de ventiladores, etc. Este proceso se realiza con un tipo de software llamado “slicer” (o laminador).

Para poder generar los archivos **.gcode** que conforman las distintas piezas del cuadricóptero, se ha usado el software “Ultimaker Cura”, el cual es gratuito y compatible con cualquier impresora.

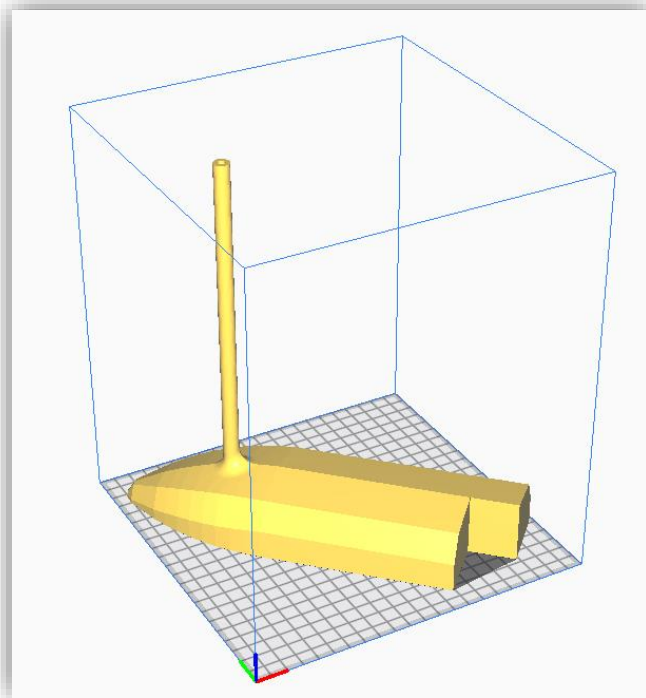
### 6.1 Parámetros de impresión

Si se intenta imprimir una pieza en 3D que contenga voladizos lo más probable es que la impresión salga mal. Ya que, si la boquilla suelta material y éste no tiene donde apoyarse, tiende a caer hacia abajo arrastrado por la fuerza de la gravedad:



**Ilustración 61. Errores de impresión causados por voladizos [13]**

Por este motivo, el primer paso a seguir con el programa “slicer” es posicionar correctamente las piezas para evitar voladizos. También hay que procurar que las piezas se sitúen dentro de la zona de impresión.



**Ilustración 62. Pieza bien posicionada**

Una vez bien posicionada la pieza, se procede al ajuste de parámetros. Aunque existen cientos de parámetros que se pueden modificar, normalmente modificando unos pocos ya se puede obtener una pieza con las características deseadas. A continuación, se describen los principales parámetros a definir para obtener las piezas del cuadricóptero.

### 6.1.1 Altura de capa

La altura de capa, es la altura que tiene cada una de las capas (o estratos) que forman la pieza. Como más pequeño sea este valor, mejores son los acabados de la pieza, ya que su textura será más fina. Si se compara con la impresión convencional en papel de una imagen, se podría decir que la altura de capa es el equivalente a la resolución con la que se imprime la imagen.

Aunque al reducir este valor aumenta la calidad de la impresión, no es conveniente elegir siempre el valor más bajo posible. Ya que, al aumentar el número de capas necesarias para fabricar la pieza, aumenta drásticamente el tiempo necesario para llevar a cabo la impresión.

Un valor típico para piezas muy pequeñas o que requieran detalle es de **0,1 mm**, en piezas más grandes se suele aumentar este valor. El valor de altura de capa que se ha elegido para todas las piezas de la embarcación es de **0,2 mm**.

### 6.1.2 Numero de paredes

El número de paredes, hace referencia al número de líneas de material entre la parte exterior de la pieza y su interior. Este valor, determina en gran medida la resistencia de la pieza (aunque hay parámetros aún más determinantes).

El valor típico que se suele usar en este parámetro es de **2**, pero en este caso se debe garantizar la estanqueidad de las piezas, ya que una entrada de agua en su interior modificaría sus características de flotabilidad y densidad. Con la finalidad de evitar la entrada de agua por alguna hipotética discontinuidad en las paredes, se decide definir un valor de **4** paredes (el cuál ha presentado una estanqueidad total en pruebas realizadas previamente).

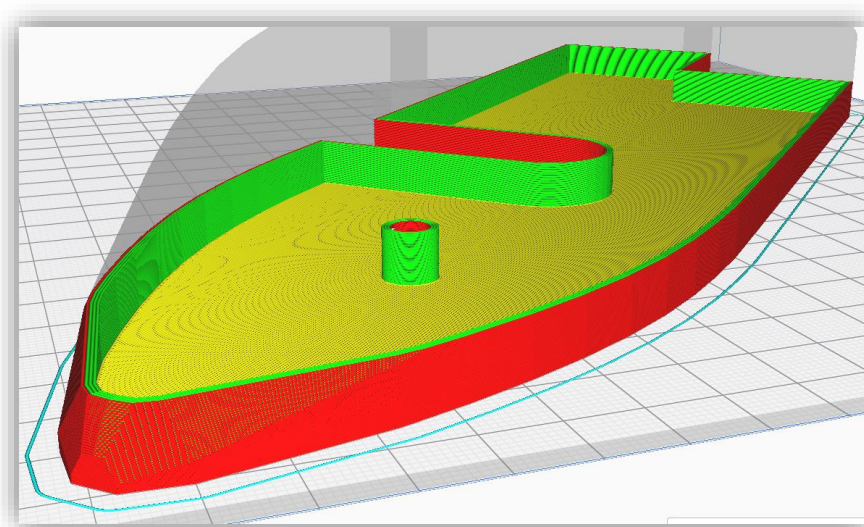


Ilustración 63. Paredes de uno de los patines

### 6.1.3 Porcentaje y tipo de relleno

Normalmente en una impresión 3D, las piezas no suelen ser macizas, ya que esto implicaría un gasto demasiado grande de material y suele ser posible llegar a las características de resistencia deseadas dejando dichas piezas huecas por dentro, pero con un determinado relleno.

Los parámetros de porcentaje y tipo de relleno hacen referencia a la forma que tendrá el relleno y su porcentaje en volumen respecto al volumen total de la pieza. Estos parámetros son los más determinantes para definir la resistencia mecánica de las piezas. Es conveniente no sobredimensionar el relleno de las piezas (sobre todo si son grandes) ya que esto provocaría un aumento de peso y un incremento exponencial de su tiempo de impresión.

Como se comenta en el apartado anterior, el número de paredes también determina la resistencia de las piezas, y en este caso se ha elegido un número muy elevado para garantizar la estanqueidad. Por lo tanto, como las paredes ya aportan suficiente resistencia y rigidez, se ha optado por porcentajes de relleno relativamente bajos.

Como los patines son piezas muy grandes y su corte presenta suficiente inercia, se elige un porcentaje de relleno del **20 %**. Por contra, las barras del trampolín son piezas más pequeñas y además tendrán que soportar mayores esfuerzos mecánicos, por este motivo se elige un porcentaje de relleno del **35 %**.

En referencia al tipo de relleno, se pueden elegir distintas formas (rejilla, líneas, triángulos, trihexagonal, cubico, giroide, etc.). La forma elegida para las piezas del cuadricóptero ha sido la trihexagonal, la cual está formada por triángulos y hexágonos que forman una especie de panal de abeja reforzado. Esta forma ofrece buenas prestaciones de resistencia y rigidez.

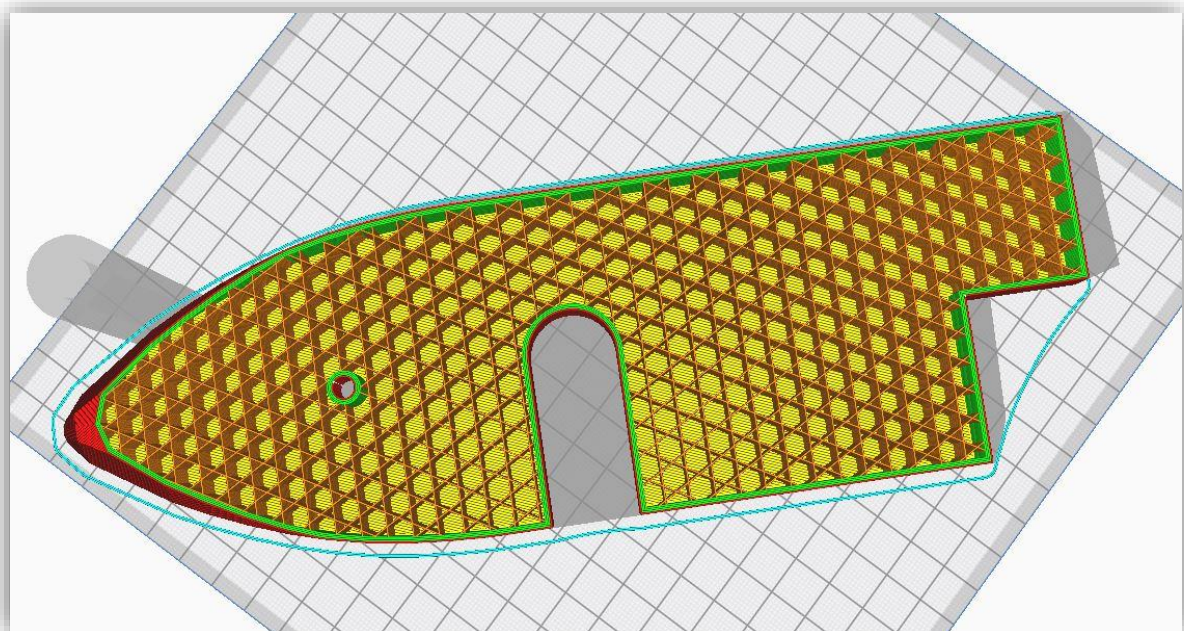


Ilustración 64. Relleno de los patines



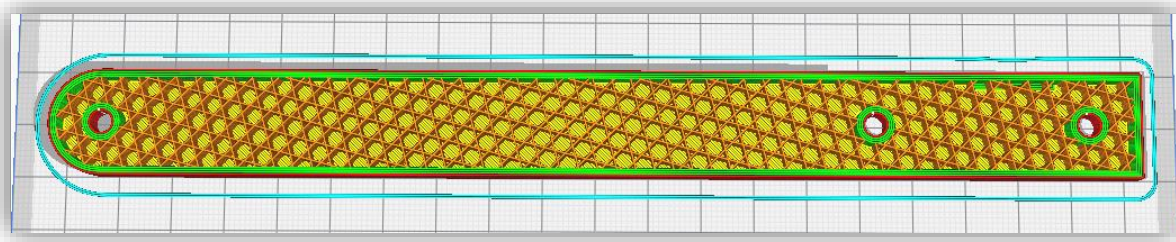


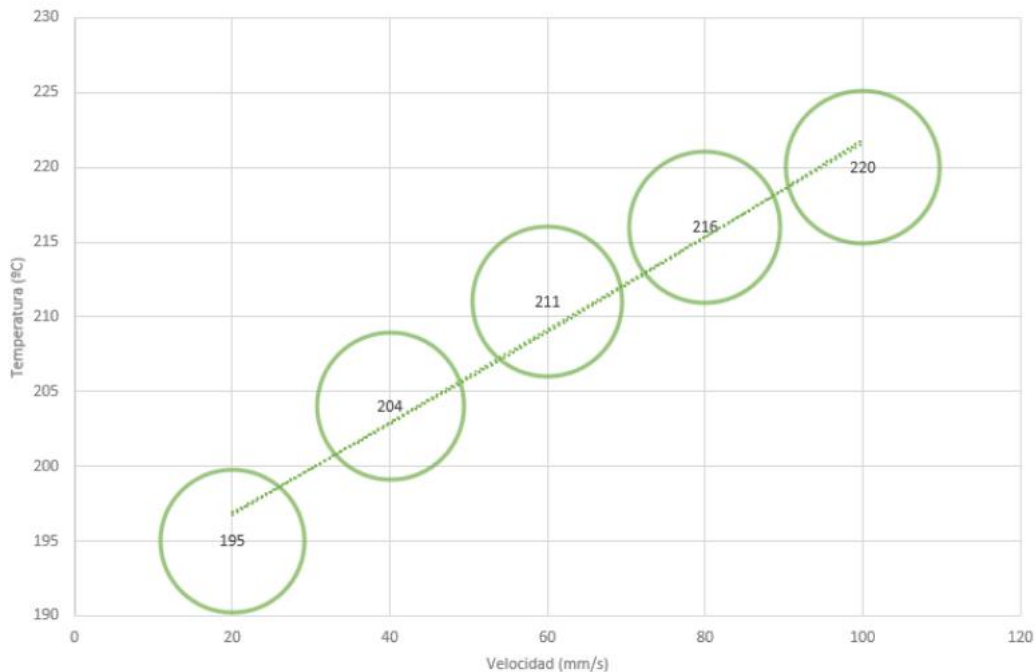
Ilustración 65. Relleno de las barras del trampolín

### 6.1.4 Temperatura de impresión

Este parámetro hace referencia a la temperatura a la que se calienta la boquilla por la cual sale el material de impresión. La elección de su valor ideal depende sobre todo del tipo de material a utilizar.

El material elegido para la impresión de las piezas es el **PLA** (o ácido poliláctico), este material *se deriva de materias primas naturales y renovables, como el maíz, y pertenece a los poliésteres como un polímero sintético* [14]. Sus principales ventajas son que es un plástico biodegradable (aunque dicha degradación es bastante lenta si no se cumplen una serie de condiciones ambientales determinadas) y que es relativamente fácil de imprimir. Su rango de temperaturas de impresión oscila entre los **180°C** y los **220°C**.

Otro aspecto que influye en la elección de la temperatura de impresión es la velocidad a la que se quiera imprimir la pieza. Como más lenta sea la impresión, más baja debe ser la temperatura, ya que si no se puede producir el derretimiento de la pieza. A continuación, se presenta un gráfico orientativo que relaciona la temperatura de impresión recomendada en función de la velocidad:



Gráfica 25. Temperatura de impresión en función de la velocidad [15]

Estas temperaturas son orientativas, ya que su elección también depende de las particularidades de la impresora y del fabricante del PLA que se haya adquirido, por eso conviene hacer pruebas para determinar su valor ideal. Se decide imprimir las piezas del cuadricóptero a una velocidad de **60 mm/s**, la cual cumple un buen compromiso entre velocidad de impresión y calidad de las piezas (a más velocidad menor calidad). Después de varias pruebas con la impresora “Geeetech A10” se decide seleccionar una temperatura de **200 °C**.

### 6.1.5 Estructuras de soporte

Como se comenta anteriormente, es necesario posicionar la pieza para evitar voladizos ya que, si los hubiera el material caería hacia abajo arrastrado por la fuerza de la gravedad. Pero a veces, debido a las formas de la pieza a imprimir es imposible evitar los voladizos. Cuando esto sucede, se debe habilitar un parámetro en el “slicer” para que genere soportes.

Estos soportes no son más que estructuras muy finas situadas en la parte inferior de los voladizos, las cuales se encargan de evitar que éstos queden suspendidos en el aire. Una vez se ha acabado la impresión, dichas estructuras se deben arrancar de la pieza:

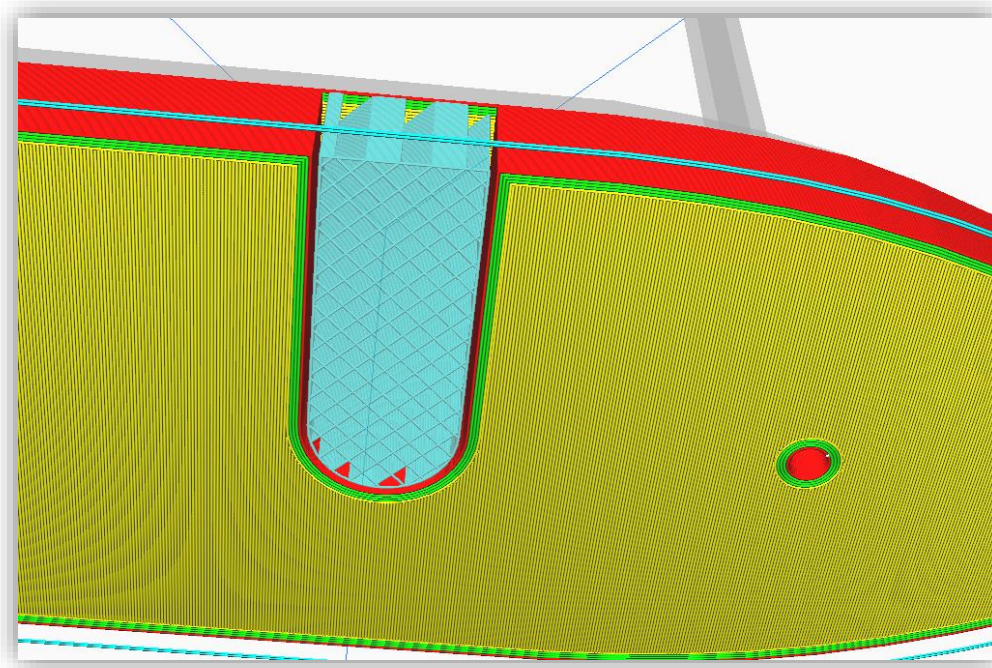


Ilustración 66. Soportes impresión 3D

## 6.2 Tiempos de impresión y pesos

Una vez se han definido los parámetros anteriores, se le indica al programa “slicer” que realice el laminado de las piezas y se obtienen los archivos que se cargarán a la tarjeta de la impresora 3D. Cuando el “slicer” hace el laminado, el programa indica el tiempo de impresión y el peso de cada una de las piezas. Este segundo dato es necesario para la simulación del prototipo (se debe introducir como parámetro en el bloque “File Solid” de Simscape), y también para calcular el coste de fabricación de las piezas.

A continuación, se presentan los tiempos de impresión y los pesos de todas las piezas a imprimir:

- <b>Barra del trampolín</b>	Tiempo: 2 h 34'	Peso: 34 g
- <b>Patín estribor-proa</b>	Tiempo: 13 h 52'	Peso: 201 g
- <b>Patín babor-proa</b>	Tiempo: 13h 50'	Peso: 201 g
- <b>Patín estribor-popa</b>	Tiempo: 14h 33'	Peso: 213 g
- <b>Patín babor-popa</b>	Tiempo: 14 h 33'	Peso: 213 g

# Capítulo 7. Sugerencias para una implementación real.

## 7.1 Hardware sugerido para el sistema de control

A continuación, se definen los elementos y conexiones que formarían parte del hardware. Por lo que hace referencia a la estructura, ya se han definido los elementos en el capítulo de “*Diseño de piezas*” y se pueden ver dichas piezas en el *Anexo 1. Piezas realizadas mediante impresión 3D*. Así que este capítulo se basa en los elementos del sistema de control de la embarcación.

### 7.1.1 Micro controlador

El micro controlador, sería el “cerebro” del prototipo, el cual tiene como función leer las señales de los sensores de inclinación y procesarlas para determinar las acciones de control requeridas.

El micro controlador propuesto para la realización de un prototipo sería un “Arduino”. Este micro controlador está formado por una tarjeta con entradas y salidas (analógicas y digitales) y una serie de buses de comunicación, los cuales permiten su programación y también la comunicación con distintos tipos de sensores.

Dentro de la familia de Arduino existen diferentes micro controladores, para este proyecto se propone el modelo “Arduino Uno”, que es uno de los más sencillos y económicos, pero a su vez tiene unas prestaciones suficientes para esta aplicación. Este micro procesador funciona con el chip **ATMEGA328p**, el cual funciona a una frecuencia de cálculo de **16 MHz**, tiene una memoria flash de **31 KB** y cuenta con **14** entradas/salidas (**6** de ellas analógicas).

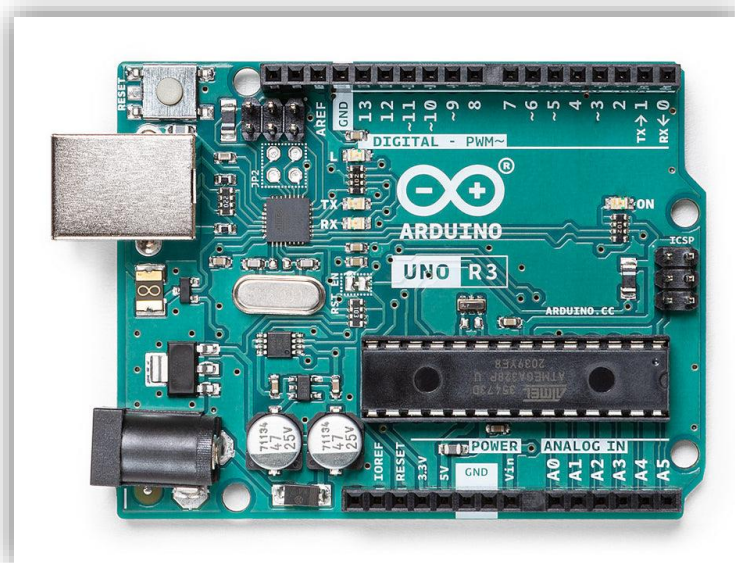


Ilustración 67. Arduino uno[16]



### 7.1.2 Unidad de medida inercial

La unidad de medida inercial (también conocida como IMU) es un dispositivo capaz de medir diferentes magnitudes físicas a través del efecto de las fuerzas de inercia que actúan sobre él.

Para este caso, se propone un acelerómetro/giroscopio, el cual debería ser capaz de determinar los ángulos de actitud del cuadricóptero.

El componente propuesto es el sensor **MPU-6050**. Este dispositivo contiene un acelerómetro, un giroscopio y un termómetro (el cual le permite compensar automáticamente las oscilaciones de lectura provocadas por variaciones térmicas).



Ilustración 68. Sensor MPU-6050

### 7.1.3 Magnetómetro

Para determinar el movimiento de guiñada de la embarcación, se podría usar el propio sensor **MPU-6050** descrito en el apartado anterior, simplemente sería cuestión de integrar las velocidades angulares presentadas en este movimiento. El problema de usar dicho método es que el posible error que pudiera darse en las lecturas del sensor, se iría acumulando indefinidamente. Es por este motivo que se propone compensar esta lectura con la de un magnetómetro.

El magnetómetro, no deja de ser un sensor de campos magnéticos. Por lo tanto, se puede utilizar como brújula digital. Combinando los valores obtenidos por el giroscopio con los de la brújula, se podría obtener un valor en el ángulo de guiñada mucho más preciso.

El componente propuesto es el **HMC5883L**, que es un sensor magnetómetro de **3** ejes el cual cuenta con la electrónica necesaria para facilitar su conexión con Arduino.

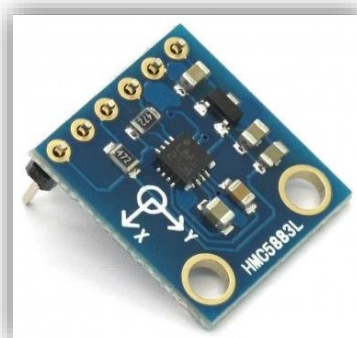


Ilustración 69. Sensor HMC5883L[17]

### 7.1.4 Sensor de ultrasonidos

Una de las variables más importantes a controlar en el funcionamiento del cuadricóptero acuático es la altura de este sobre el nivel del agua. Para medir dicha variable se propone usar sensores de ultra sonidos.

El sensor de ultra sonidos propuesto es el **HC-SR04**, el cual es ampliamente usado con Arduino.

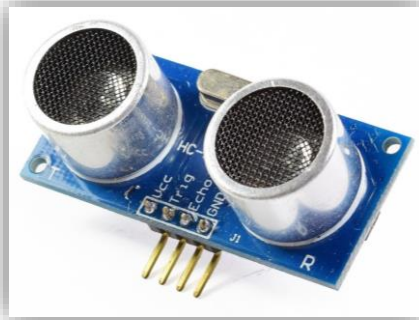


Ilustración 70. Sensor HC-SR04 [18]

Como el valor de esta variable es muy crítico y la superficie del agua puede presentar ciertas irregularidades como pequeñas olas que dificulten la lectura, se propone emplear 4 sensores (situados en el extremo de cada patín).

### 7.1.5 GPS

Si se quiere implementar un control de posición, es necesario poder medir los desplazamientos que realiza el cuadricóptero sobre el plano del agua. Esta medición se podría realizar mediante odometría integrando doblemente las aceleraciones angulares de la unidad de medida inercial, pero dicho valor acumularía indefinidamente los posibles errores de lectura del sensor, y presentaría una deriva inaceptable.

Es por este motivo que se propone el uso de un GPS que sea capaz de determinar en todo momento en que posición se encuentra la embarcación.

El sensor propuesto es el **GY-GPS6MV2**, el cual cuenta con una antena cerámica y una pila de botón que le permite mantener los datos de configuración cuando el sistema está apagado.



Ilustración 71. Sensor GY-GPS6MV2 [19]

### 7.1.6 Motores

Aunque podrían valer centenares de modelos de motores sin escobillas para modelismo, se propone la implementación con “**motores brushless A2212**” porque son una de las mejores opciones basándose en la relación calidad/precio.



Ilustración 72. Motor sin escobillas A2212 [2]

### 7.1.7 Drivers de los motores

Es necesario incorporar algún tipo de driver que transforme la corriente continua de la batería en la corriente trifásica que necesitan los motores sin escobillas anteriormente descritos. También es necesaria la regulación de la frecuencia de la corriente para poder determinar la velocidad de giro de las hélices.

Los drivers que se utilizan para controlar este tipo de motores se llaman **ESC** (Electronic Speed Control), y el modelo que se ha elegido por compatibilidad con los motores anteriormente propuestos es el **XDD ESC 30A**, el cual es capaz de proporcionar una corriente máxima de **30 A**.

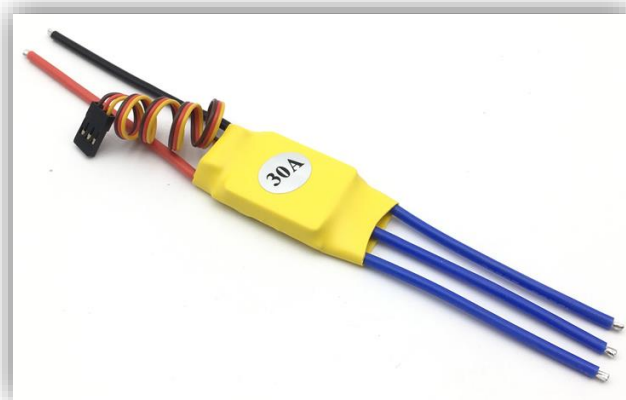


Ilustración 73. Driver XDD ESC 30A [20]

### 7.1.8 Tarjeta WIFI

Para que el cuadricóptero pueda comunicarse con el exterior y recibir órdenes de operación, como comandos de actitud o de posición, es necesario incorporar algún elemento que permita dicha comunicación.

Obviamente, se requiere que la conexión sea inalámbrica. Dentro de las múltiples opciones posibles, se propone incorporar una tarjeta **WIFI** al cuadricóptero. Esta solución es relativamente sencilla y económica, y permitiría una comunicación directa del cuadricóptero con cualquier ordenador portátil o teléfono móvil.



Ilustración 74. Tarjeta WIFI para Arduino [21]

### 7.1.9 Batería

Para la batería, se propone una de tipo polímero de litio. Ya que, aunque son más delicadas que las de otros tipos, son las más ligeras y también las más económicas.

La tensión de alimentación de Arduino es de entre **7 V** y **12 V**. Por este motivo se propone usar una batería de 2 celdas, ya que su tensión nominal es de **7,4 V**. Estas baterías suministran una tensión bastante mayor a la nominal cuando están cargadas, es por este motivo que se decide descartar las baterías de tres celdas (las cuales presentan una tensión nominal de **11,1 V**) porque cargadas al máximo podrían sobrepasar el voltaje máximo admitido por el Arduino.

## 7.2 Presupuesto

### 7.2.1 Cálculo del coste de la impresión 3D

Para el cálculo del coste de las piezas que se han imprimido en 3D, se recurre a una hoja de cálculo [22] publicada por la empresa “BitFab”.

En esta hoja de cálculo se introducen las siguientes variables:

- Coste del material (€/kg)
- Coste de la luz (€/kWh)
- Consumo medio de la impresora (kW)
- Coste de la impresora (€)
- Tiempo de amortización deseado para la impresora (años)
- Días de funcionamiento de la impresora al año (días)
- Horas de la impresora activa por día (h)
- Masa de la pieza (kg)
- Tiempo de impresión (h)

A partir de estos parámetros, se determina el coste de la pieza y también se realiza un desglose de los componentes del precio.

En el *Anexo 2. Cálculo del coste de la impresión 3D*, se muestran las hojas de cálculo y el desglose de precio para cada pieza.

El coste calculado para cada una de las piezas es:

- |                               |                           |
|-------------------------------|---------------------------|
| - <b>Barras del trampolín</b> | 7,96 € (1,99 € por barra) |
| - <b>Patín estribor-proa</b>  | 11,13 €                   |
| - <b>Patín babor-proa</b>     | 11,11 €                   |
| - <b>Patín estribor-popa</b>  | 11,73 €                   |
| - <b>Patín babor-popa</b>     | 11,73 €                   |

**Total: 53,66 €**

## 7.2.2 Desglose total del presupuesto

Una vez definidos todos los elementos del hardware y calculado el coste de impresión 3D de las piezas se procede a la realización del presupuesto. Este presupuesto se desglosa en tres partes claramente diferenciadas: electrónica, impresión 3D y Software:

**Tabla 1. Presupuesto de la electrónica**

Electrónica			
Artículo	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Arduino Uno	1	20 €	20 €
MPU-6050	1	1.38 €	1.38 €
HMC5883L	1	1.31 €	1.31 €
HC-SR04	4	1.14 €	4.56 €
GY-GPS6MV2	1	3.21 €	3.21 €
Wifi Shield	1	10.55 €	10.55 €
Motores brushless A2212	4	6.87 €	27.48 €
XDD ESC 30A	4	4.04 €	16.16 €
Bateria 2s 5200 mah	1	24.2 €	24.2 €
Caja IP 68	1	17.99 €	17.99 €
Cableado	1	3 €	3 €
<b>Total:</b>			<b>129.84 €</b>

**Tabla 2. Presupuesto de la impresión 3D**

Impresión 3D			
Artículo	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Barra del trampolín	4	1.99 €	7.96 €
Patín estribor-proa	1	11.13 €	11.13 €
Patín babor-proa	1	11.11 €	11.11 €
Patín estribor-popa	1	11.73 €	11.73 €
Patín babor-popa	1	11.73 €	11.73 €
<b>Total:</b>			<b>53.66 €</b>

**Tabla 3. Presupuesto del software**

Software	
Licencia Matlab Estandar	800.00 €
Licencia SolidWorks Estandar	8100.00 €
Licencia MAXSURF Ultimate	9.06 €
<b>Total:</b>	<b>8909.06 €</b>

Teniendo en cuenta el coste de estas tres partes el coste del proyecto sería de **9.092,56 €**. Cabe destacar que la parte más cara de este proyecto son las licencias del software utilizado, pero en este caso ya se disponía de las licencias estudiantiles facilitadas por la universidad. Teniendo en cuenta esto, se descuenta el importe del software, por lo tanto, el coste real del proyecto es de **183,50 €**.

## Capítulo 8. Conclusiones.

Este proyecto, parte de la intención de desarrollar un artilugio novedoso e innovador. La vinculación al mundo náutico del autor, ha sido totalmente determinante en la elección del mismo. En él, se ha pretendido diseñar un prototipo de embarcación voladora y auto estabilizada capaz de desplazarse sobre la superficie del agua. Este objetivo se ha cumplido de manera satisfactoria y a su vez, el trabajo ha permitido tocar una gran variedad de disciplinas relacionadas con el mundo del diseño y la ingeniería mecatrónica.

En las primeras etapas del proyecto se han definido las características principales del artilugio, explicando su forma y su modo de funcionamiento. A partir de dichas características se ha realizado el diseño de la embarcación y de sus componentes a partir de modelado 3D, y finalmente se ha adaptado el diseño para poder ser imprimido mediante fabricación aditiva.

Una vez realizado el diseño de la embarcación, se ha estudiado su estabilidad mediante software especializado. Los resultados de dicho análisis han sido satisfactorios.

La siguiente fase ha consistido en desarrollar un modelo capaz de simular el comportamiento de la embarcación, y una vez hecho esto, implementar su sistema de control. Esta ha sido la parte más complicada del proyecto ya que determinar las ecuaciones que definen el comportamiento de las hélices no ha sido nada trivial. A parte, ha sido necesario realizar infinidad de pruebas para asegurarse que el comportamiento de la embarcación era el esperado y, por tanto, la implementación de la simulación era correcta.

Partiendo de la simulación, se han ajustado experimentalmente los parámetros del sistema de control. Este paso resulta sumamente importante en el diseño de cualquier sistema, ya que permite ponerlo a prueba y refinar su diseño sin implicar los costes que tendría hacer-lo en un prototipo real. Después de realizar este paso, la simulación ha permitido verificar el correcto funcionamiento de la embarcación.

La parte final ha consistido en la determinación de todos los parámetros necesarios para la impresión 3D de la estructura de la embarcación, y su posterior impresión. El resultado ha sido excelente, obteniendo unas piezas resistentes y de alta calidad.

Debido al extenso alcance de este proyecto se ha descartado la construcción de un prototipo real, pero se ha realizado una propuesta de los posibles componentes necesarios para la construcción de dicho prototipo y también se ha realizado su presupuesto. Des de la humilde opinión de quien escribe este documento, se pretende alentar a futuros estudiantes a retomar este proyecto des del punto donde se ha dejado y desarrollar una implementación real del sistema.

A cerca de la aplicación real que pueda tener este proyecto, cabe destacar que su principal objetivo, ha sido principalmente didáctico. Se ha pretendido tocar las principales disciplinas estudiadas durante el Master en Ingeniería Mecatrónica, y relacionarlas con el mundo de la Ingeniería Naval, del cual proviene el autor del trabajo. Este objetivo se ha cumplido de manera satisfactoria.

Aun así, aunque la idea de una embarcación voladora de tamaño real que se sustente sobre sus propias hélices, pueda parecer de ciencia ficción. Este trabajo también puede sentar las bases para proyectos de auto estabilización en embarcaciones que sí estén a flote, pero igualmente dispongan de hélices estabilizadoras. También pretende aportar un pequeño grano de arena al estudio en general de la Mecatrónica Naval.



## Bibliografía.

- [1] «Caja de conexiones IP68 resistente al agua 4 conectores de cable para exteriores con 4 cables para caja eléctrica pequeña Ø5mm-Ø12mm de diámetro con terminal exteriores | Luz | Garten | piscina : Amazon.es: Bricolaje y herramientas». [En línea]. Disponible en: [https://www.amazon.es/conexiones-resistente-conectores-exteriores-Ø5mm-Ø12mm/dp/B08VW64SV3/ref=sr\\_1\\_6?\\_\\_mk\\_es\\_ES=ÅMÅŽÕÑ&dchild=1&keywords=caja%2Bip68&qid=1634401763&sr=8-6&th=1](https://www.amazon.es/conexiones-resistente-conectores-exteriores-Ø5mm-Ø12mm/dp/B08VW64SV3/ref=sr_1_6?__mk_es_ES=ÅMÅŽÕÑ&dchild=1&keywords=caja%2Bip68&qid=1634401763&sr=8-6&th=1). [Accedido: 16-oct-2021].
- [2] «Motor sin escobillas para multicóptero de cuatro rotores y avión teledirigido, XXD A2212 930KV/1000KV/1400KV/2200KV/2700KV, 1 Uds. | Partes y accesorios | - AliExpress». [En línea]. Disponible en: [https://es.aliexpress.com/item/32958714154.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.200c6f4885uqhP&algo\\_pvid=null&algo\\_expid=null&btsid=2100bde316159768190814469e2034&ws\\_ab\\_test=searchweb0\\_0,searchweb201602\\_,searchweb201603\\_](https://es.aliexpress.com/item/32958714154.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.200c6f4885uqhP&algo_pvid=null&algo_expid=null&btsid=2100bde316159768190814469e2034&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_,searchweb201603_). [Accedido: 14-abr-2021].
- [3] C.Elias, «Posición inicial de equilibrio (spanish).» .
- [4] C.Elias, «Esquema de estabilidad trasversal (spanish).» .
- [5] J. X. Gracia Borreguero y J. Carreño Hernández, «Control de estabilidad para una embarcación mediante espacio de estados». 2020.
- [6] «Simscape Multibody - MATLAB & Simulink». [En línea]. Disponible en: <https://es.mathworks.com/products/simscape-multibody.html>. [Accedido: 17-feb-2022].
- [7] D. A. Baquero Mayor, *Introducción a la resistencia y propulsión*. Departamento de artes gráficas UPM.
- [8] M. S. Akum, «Diseño del sistema de mandos de vuelo para una cabina de DC9», UPC, 2015.
- [9] «Helicopter Model Flying Upside - Free photo on Pixabay». [En línea]. Disponible en: <https://pixabay.com/photos/helicopter-model-flying-upside-down-1413341/>. [Accedido: 15-mar-2022].
- [10] «Controlador PID - Control Automático - Picuino». [En línea]. Disponible en: <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>. [Accedido: 16-mar-2022].
- [11] J. L. Ruano Díez, «Control Automático, Tema 1, Sintonizado Analítico de Reguladores PID». Universitat Politècnica de València.

- [12] «Servicio Académico de Impresión 3D | Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia». [En línea]. Disponible en: <https://eupla.unizar.es/servicios/servicio-academico-de-impresion-3d>. [Accedido: 21-feb-2022].
- [13] «Voladizos y soportes en la impresión 3D». [En línea]. Disponible en: <https://www.3dworks.cl/post/voladizos-y-soportes-en-la-impresion-3d>. [Accedido: 21-feb-2022].
- [14] «PLA: ¿Es realmente ecológico el filamento? - 3Dnatives». [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/ecologico-realmente-filamento-pla-230720192/#!> [Accedido: 23-feb-2022].
- [15] «Dudas habituales sobre temperatura y velocidad de impresión de PLA y ABS». [En línea]. Disponible en: [https://filament2print.com/es/blog/9\\_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html](https://filament2print.com/es/blog/9_dudas-temperatura-velocidad-impresion-3D.html). [Accedido: 23-feb-2022].
- [16] «Arduino Uno Rev3 — Arduino Official Store». [En línea]. Disponible en: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. [Accedido: 05-abr-2022].
- [17] «Magnetómetro HMC5883L. – Electrónica Práctica Aplicada». [En línea]. Disponible en: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/magnetometro-hmc5883l>. [Accedido: 06-may-2022].
- [18] «Sensor Ultrasonido HC-SR04». [En línea]. Disponible en: <https://naylorlampmechatronics.com/sensores-proximidad/10-sensor-ultrasonido-hc-sr04.html>. [Accedido: 05-abr-2022].
- [19] «NEO-6M GY-GPS6MV2 GPS Modulo - SODIAL(R) Ublox NEO - 6M GPS Modulo Controlador de Vuelo de Aeronaves para Arduino IMU SE04001 G21 (Azul) : Amazon.es: Electrónica». [En línea]. Disponible en: <https://www.amazon.es/NEO-6M-GY-GPS6MV2-GPS-Modulo-Controlador/dp/B01IH2TV6G>. [Accedido: 05-abr-2022].
- [20] «Motor sin escobillas XXD A2212 2212 A2208 2208 930KV 1000KV 1400KV 2200KV 2450KV 30A ESC 1045 Hélice para Dron RC multicóptero FPV | - AliExpress». [En línea]. Disponible en: [https://es.aliexpress.com/item/1005003930865861.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7ce433a9116pxR&algo\\_pvid=eabc86ef-c192-4692-bd68-f3fac187a005&algo\\_exp\\_id=eabc86ef-c192-4692-bd68-f3fac187a005-0&pdp\\_ext\\_f=%7B%22sku\\_id%22%3A%2212000027494288682%22%7D&pdp\\_pi=-1%3B12.77%3B-1%3B-1%40salePrice%3BEUR%3Bsearch-mainSearch](https://es.aliexpress.com/item/1005003930865861.html?spm=a2g0o.productlist.0.0.7ce433a9116pxR&algo_pvid=eabc86ef-c192-4692-bd68-f3fac187a005&algo_exp_id=eabc86ef-c192-4692-bd68-f3fac187a005-0&pdp_ext_f=%7B%22sku_id%22%3A%2212000027494288682%22%7D&pdp_pi=-1%3B12.77%3B-1%3B-1%40salePrice%3BEUR%3Bsearch-mainSearch). [Accedido: 05-abr-2022].

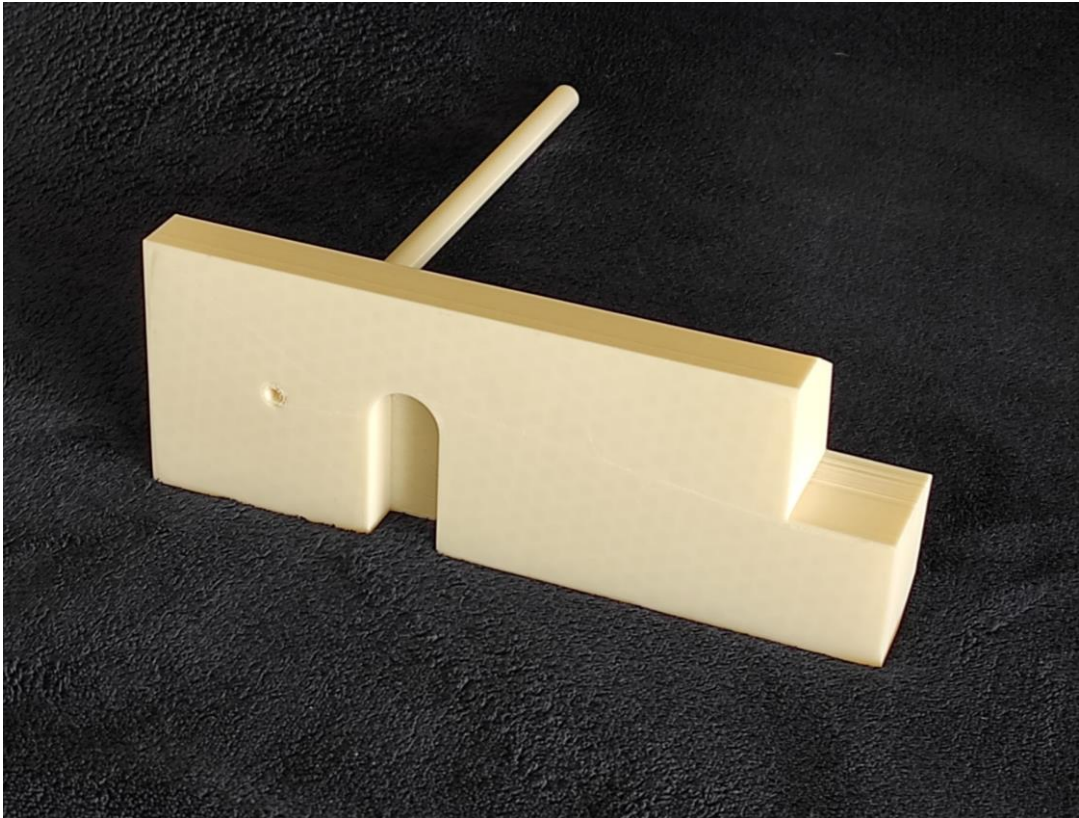
- [21] «Arduino Wifi Shield SD Arduino A000058 | BricoGeek.com». [En línea]. Disponible en: <https://tienda.bricogeek.com/descatalogado/446-arduino-wifi-shield-sd.html>. [Accedido: 06-abr-2022].
- [22] «¿Cuánto cuesta imprimir en 3D? Calculadora del precio de imprimir en 3D». [En línea]. Disponible en: <https://bitfab.io/es/blog/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d/>. [Accedido: 06-abr-2022].

# Anexo 1. Piezas realizadas mediante impresión 3D

## A1.1 Patín de proa



**A1.2 Patín de popa**





### A1.3 Barras del trampolín



**A1.4 Estructura completa**



# Anexo 2. Cálculo del coste de la impresión 3D


## 3D

### A2.1 Barras del trampolín

### Calculadora de costes de impresión 3D

**Cómo usar la calculadora**

<http://bitfab.io/es/blog/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d/>




Datos del modelo		Coste de fabricación de piezas impresas	
Coste plástico [€/kg]	20	Masa de la pieza [kg]	0.034
Coste luz [€/kWh]	0.315	Tiempo impresión [h]	2.56
Consumo medio [kW]	0.35		
<b>Coste por hora de luz [€/h]</b>	<b>0.11025</b>	Coste material	
		- Plástico	0.68 €
Coste de impresora (€)	230.76	- Electricidad	0.28 €
Tiempo amortización [años]	2	Coste operario	
Días activa al año	50	- Preparación	0.00 €
Horas por día [h]	7	- Postproducción	0.00 €
<b>Coste de amortización [€/h]</b>	<b>0.329657143</b>	Coste amortización	0.84 €
Tasa de fallos	10%	Coste fallos	0.18 €
Coste por hora del operador [€/h]	0	<b>Coste pieza</b>	<b>1.99 €</b>
Tiempo preparación [h]	0.5		
Tiempo postproducción [h]	0.5		

Plástico	0.68 €
Electricidad	0.28 €
Coste operario	0.00 €
Coste amortización	0.84 €

#### Componentes del precio




■ Plástico	0.68 €
■ Electricidad	0.28 €
■ Coste operario	0.00 €
■ Coste amortización	0.84 €



A2.2 Patín estribor-proa

## Calculadora de costes de impresión 3D

**Cómo usar la calculadora**



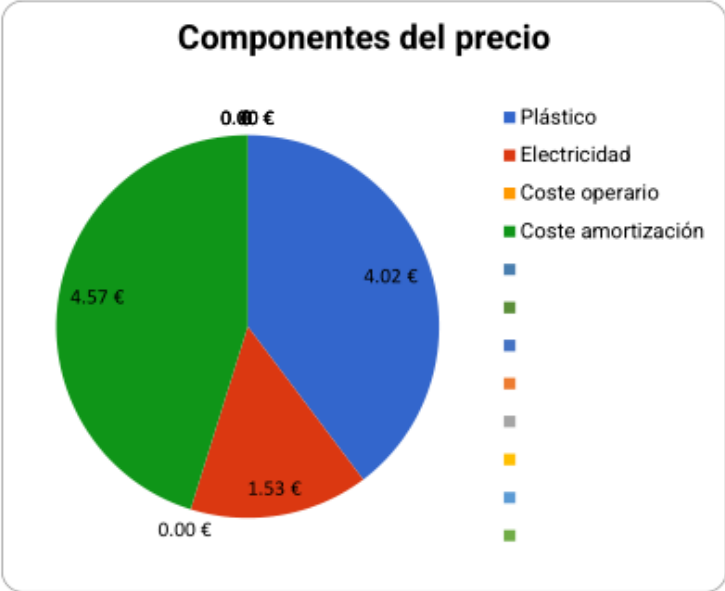
<http://bitfab.io/es/blog/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d/>

Datos del modelo	Coste de fabricación de piezas impresas
Coste plástico [€/kg] <input style="width: 80%;" type="text" value="20"/>	Masa de la pieza [kg] <input style="width: 80%;" type="text" value="0.201"/>
Coste luz [€/kWh] <input style="width: 80%;" type="text" value="0.315"/>	Tiempo impresión [h] <input style="width: 80%;" type="text" value="13.87"/>
Consumo medio [kW] <input style="width: 80%;" type="text" value="0.35"/>	
<b>Coste por hora de luz [€/h]</b> 0.11025	
Coste de impresora (€) <input style="width: 80%;" type="text" value="230.76"/>	Coste material
Tiempo amortización [años] <input style="width: 80%;" type="text" value="2"/>	- Plástico 4.02 €
Días activa al año <input style="width: 80%;" type="text" value="50"/>	- Electricidad 1.53 €
Horas por día [h] <input style="width: 80%;" type="text" value="7"/>	Coste operario
<b>Coste de amortización [€/h]</b> 0.329657143	- Preparación 0.00 €
	- Postproducción 0.00 €
Tasa de fallos <input style="width: 80%;" type="text" value="10%"/>	Coste amortización 4.57 €
Coste por hora del operador [€/h] <input style="width: 80%;" type="text" value="0"/>	Coste fallos 1.01 €
Tiempo preparación [h] <input style="width: 80%;" type="text" value="0.5"/>	
Tiempo postproducción [h] <input style="width: 80%;" type="text" value="0.5"/>	<b>Coste pieza 11.13 €</b>

Plástico	4.02 €
Electricidad	1.53 €
Coste operario	0.00 €
Coste amortización	4.57 €

### Componentes del precio



■ Plástico	4.02 €
■ Electricidad	1.53 €
■ Coste operario	0.00 €
■ Coste amortización	4.57 €

### A2.3 Patín babor-proa

## Calculadora de costes de impresión 3D

**Cómo usar la calculadora**

<http://bitfab.io/es/blog/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d/>

Datos del modelo	Coste de fabricación de piezas impresas
Coste plástico [€/kg] <span style="float: right;">20</span>	Masa de la pieza [kg] <span style="float: right;">0.201</span>
Coste luz [€/kWh] <span style="float: right;">0.315</span>	Tiempo impresión [h] <span style="float: right;">13.83</span>
Consumo medio [kW] <span style="float: right;">0.35</span>	
<b>Coste por hora de luz [€/h]</b> <span style="float: right;"><b>0.11025</b></span>	
Coste de impresora (€) <span style="float: right;">230.76</span>	Coste material
Tiempo amortización [años] <span style="float: right;">2</span>	- Plástico <span style="float: right;">4.02 €</span>
Días activa al año <span style="float: right;">50</span>	- Electricidad <span style="float: right;">1.52 €</span>
Horas por día [h] <span style="float: right;">7</span>	Coste operario
<b>Coste de amortización [€/h]</b> <span style="float: right;"><b>0.329657143</b></span>	- Preparación <span style="float: right;">0.00 €</span>
Tasa de fallos <span style="float: right;">10%</span>	- Postproducción <span style="float: right;">0.00 €</span>
Coste por hora del operador [€/h] <span style="float: right;">0</span>	Coste amortización <span style="float: right;">4.56 €</span>
Tiempo preparación [h] <span style="float: right;">0.5</span>	Coste fallos <span style="float: right;">1.01 €</span>
Tiempo postproducción [h] <span style="float: right;">0.5</span>	<b>Coste pieza</b> <span style="float: right;"><b>11.11 €</b></span>

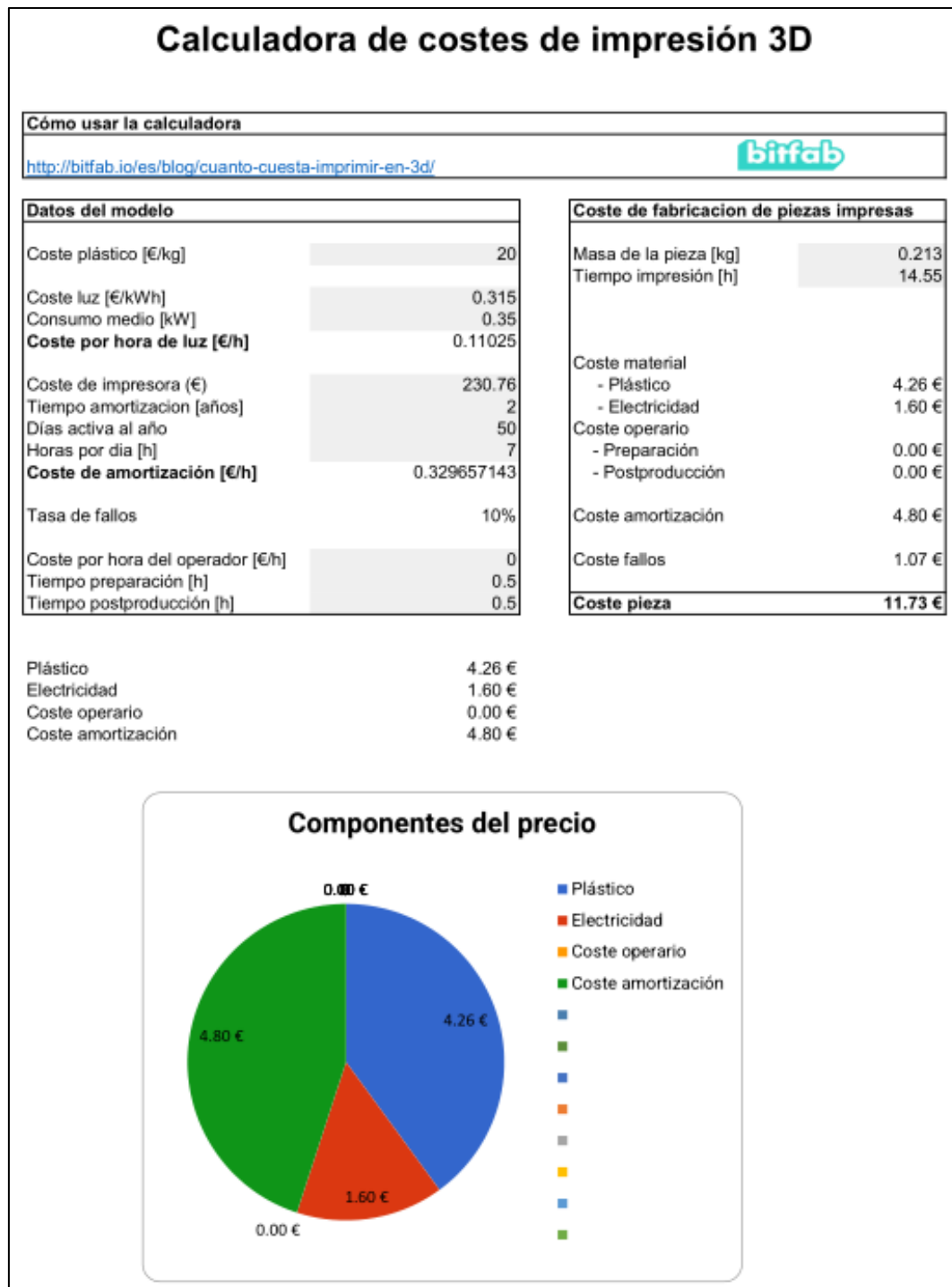
Plástico	4.02 €
Electricidad	1.52 €
Coste operario	0.00 €
Coste amortización	4.56 €

### Componentes del precio

■ Plástico	4.02 €
■ Electricidad	1.52 €
■ Coste operario	0.00 €
■ Coste amortización	4.56 €

A2.4 Patín estribor-popa



### A2.5 Patín babor-popa

