

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de Estructura en Configuración Y4 para Dron**

Trabajo de graduación presentado por German Humberto García  
Aguilar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

2019







UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Diseño de Estructura en Configuración Y4 para Dron**

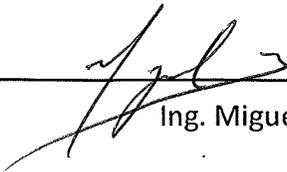
Trabajo de graduación presentado por German Humberto García  
Aguilar para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Mecatrónica

Guatemala,

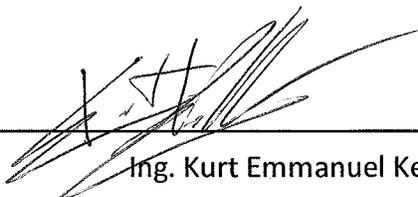
2019

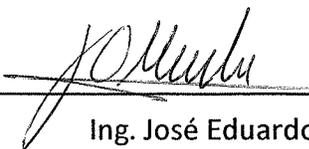


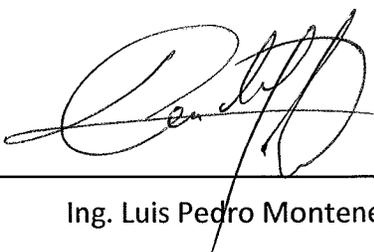
Vo.Bo.:

(f)   
Ing. Miguel Zea

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Kurt Emmanuel Kellner

(f)   
Ing. José Eduardo Morales

(f)   
Ing. Luis Pedro Montenegro

Fecha de aprobación: Guatemala, 4 de diciembre de 2019.



Quiero comenzar agradeciendo a Dios por su amor, su ayuda y permitirme llegar hasta este punto de mi vida, ya que sin él no hubiera podido lograr nada de lo que he logrado.

Agradezco a mi familia por todo el apoyo que me ha dado durante el transcurso de mi vida, y especialmente a mis padres por su apoyo incondicional y por la formación que me han brindado, ya que por ellos es que soy una buena persona.

Agradezco a cada uno de mis profesores de la Universidad del Valle de Guatemala por la formación académica que me han dado, y al ingeniero Miguel Zea por su asesoría y apoyo durante la realización del proyecto.

Por último, doy gracias a la Universidad del Valle de Guatemala por el apoyo económico que me ha dado durante la realización de mi proyecto de graduación, ya que patrocinó la mayoría de los componentes utilizados.



<b>Prefacio</b>	v
<b>Lista de figuras</b>	XIV
<b>Lista de cuadros</b>	XV
<b>Resumen</b>	XVII
<b>Abstract</b>	XIX
<b>1. Introducción</b>	1
<b>2. Antecedentes</b>	3
<b>3. Justificación</b>	7
<b>4. Objetivos</b>	9
4.1. Objetivo general	9
4.2. Objetivos específicos	9
<b>5. Alcance</b>	11
<b>6. Marco teórico</b>	13
6.1. ¿Qué es un dron?	13
6.2. Clasificación de los drones según su forma de sustentación	13
6.3. Metodología de vuelo de un dron multirotor	15
6.4. Tipos de drones multirotor	17
6.5. Estructura en configuración Y4 para dron	20
6.6. Componentes que forman un dron multirotor	20
6.7. Requisitos de diseño de un dron multirotor	22
6.8. Materiales utilizados en manufactura rápida	23
6.9. Cálculo del tiempo de vuelo de un dron multirotor	24
6.10. Cálculo de la fuerza de empuje requerida para un dron multirotor	26
6.11. Arducopter	26

6.12. Ground Control Station	27
6.12.1. Mission Planner	27
<b>7. Diseño y fabricación de estructura Y4</b>	<b>29</b>
7.1. Validación	29
7.2. Modelo 1	31
7.2.1. Validación mediante análisis de deflexión	32
7.2.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión	32
7.3. Modelo 2	33
7.3.1. Validación mediante análisis de deflexión	33
7.3.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión	34
7.4. Modelo 3	35
7.4.1. Validación mediante análisis de deflexión	35
7.4.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión	36
7.5. Validación Modelo 3 mediante prueba de vuelo	36
7.5.1. Componentes utilizados para el Modelo 3	36
7.5.2. Prueba de vuelo realizada	39
7.5.3. Aprobación del modelo según prueba de vuelo	41
7.6. Modelo 4	41
7.6.1. Validación mediante análisis en Inventor	42
7.6.2. Aprobación del modelo según análisis en Inventor	46
7.6.3. Validación mediante análisis de deflexión del prototipo físico	46
7.6.4. Aprobación del modelo según análisis de deflexión del prototipo físico	47
7.7. Validación Modelo 4 mediante prueba de vuelo	48
7.7.1. Componentes utilizados para el Modelo 4	50
7.7.2. Prueba de vuelo realizada	52
7.7.3. Aprobación del modelo según prueba de vuelo	56
7.8. Modelo 5	58
7.8.1. Validación mediante análisis en Inventor	60
7.8.2. Aprobación del modelo según análisis en Inventor	63
7.8.3. Validación mediante análisis de deflexión del prototipo físico	64
7.8.4. Aprobación del modelo según análisis de deflexión del prototipo físico	65
7.9. Validación Modelo 5 mediante prueba de vuelo	66
7.9.1. Prueba de vuelo realizada	68
7.9.2. Aprobación del modelo según prueba de vuelo	68
<b>8. Diseño y fabricación de plataforma para pruebas de vuelo</b>	<b>73</b>
8.1. Modelo 1	73
8.1.1. Diseño	73
8.1.2. Fabricación	74
8.1.3. Observaciones	74
8.2. Modelo 2	75
8.2.1. Diseño	75
8.2.2. Fabricación	78
8.2.3. Observaciones	79
8.3. Modelo 3	79
8.3.1. Diseño	80
8.3.2. Fabricación	80

8.3.3. Observaciones . . . . .	82
<b>9. Conclusiones</b>	<b>83</b>
<b>10.Recomendaciones</b>	<b>85</b>
<b>11.Bibliografía</b>	<b>87</b>
<b>12.Anexos</b>	<b>91</b>
12.1. Iteraciones de pruebas de vuelo de Modelo 4 de estructura de dron . . . . .	91
12.1.1. Iteraciones de pruebas de elevación en Modelo 2 de plataforma de pruebas de vuelo . . . . .	91
12.1.2. Iteraciones de pruebas de inclinación en Pitch en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo . . . . .	93
12.1.3. Iteraciones de pruebas de inclinación en Roll en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo . . . . .	97
12.1.4. Iteraciones de pruebas de Giro (Yaw) en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo . . . . .	99
12.2. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1 . . . . .	102
12.3. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2 . . . . .	103
12.4. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 3 . . . . .	107
12.5. Planos de construcción . . . . .	110
12.5.1. Planos de estructura de dron Modelo 4 . . . . .	110
12.5.2. Planos de estructura de dron Modelo 5 . . . . .	115
12.5.3. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1 . . . . .	118
12.5.4. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2 . . . . .	119
12.5.5. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 3 . . . . .	122



---

## Lista de figuras

---

1. Wingtra. [1]	3
2. THOR. [2]	4
3. TRON F9. [3]	4
4. Parrot Disco FPV. [4]	5
5. Dron con plumas artificiales. [5]	5
6. Comparación de drones según su forma de sustentación. [4] [8]	14
7. Ejemplificación de Roll, Pitch y Yaw. [11]	17
8. Esquema de tricóptero	18
9. Esquema de cuadricóptero en configuración X	19
10. Esquema de hexacóptero y octocóptero en configuración +	20
11. Configuración Y4	21
12. Componentes que forman parte de un dron. [13]	22
13. Arducopter Versión 2.8. [20]	27
14. Configuraciones de vehículos de Mission Planner	28
15. Modelo 1 prototipo validación	30
16. Modelo 2 prototipo validación	30
17. Modelo 3 prototipo validación	31
18. Modelo 4 prototipo validación	31
19. Diseño Modelo 1 de estructura del dron	32
20. Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 1	33
21. Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 1	33
22. Diseño Modelo 2 de estructura del dron	34
23. Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 2	34
24. Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 2	34
25. Esquema del Modelo 3	35
26. Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 3	36
27. Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 3	36
28. Motor utilizado para Modelo 3. [23]	37
29. Controlador de velocidad para Modelo 3. [23]	37
30. Hélices para Modelo 3. [23]	38
31. Modelo 3 de estructura del dron	40

32. Conexión de motor con ESC . . . . .	40
33. Ensamble unión en Y . . . . .	42
34. Proyecciones de bases de motores . . . . .	42
35. Ensamble Modelo 4 dron . . . . .	43
36. Simulación de deflexión con pesos de los motores . . . . .	44
37. Simulación de esfuerzos de Von Mises con pesos de los motores . . . . .	45
38. Simulación de factor de seguridad con pesos de los motores . . . . .	45
39. Simulación de deflexión con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron . . . . .	46
40. Simulación de esfuerzos de Von Mises con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron . . . . .	47
41. Simulación de factor de seguridad con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron . . . . .	48
42. Simulación de deflexión con fuerza de empuje sobreestimada . . . . .	49
43. Simulación de esfuerzos de Von Mises con fuerza de empuje sobreestimada . . . . .	49
44. Simulación de factor de seguridad con fuerza de empuje necesaria sobreestimada . . . . .	50
45. Análisis de deflexión de fuerzas generadas por peso de motores . . . . .	51
46. Análisis de deflexión de fuerzas de pesos para simular fuerza de empuje en brazo delantero . . . . .	51
47. Análisis de deflexión de fuerzas de pesos para simular fuerza de empuje en brazo trasero . . . . .	52
48. Modelo 4 estructura de dron . . . . .	53
49. Prueba de elevación . . . . .	57
50. Modelo 4 de dron en prueba de elevación . . . . .	58
51. Prueba inclinación en Pitch . . . . .	58
52. Prueba inclinación en Roll . . . . .	59
53. Prueba inclinación en YAW . . . . .	59
54. Modelo 4 de dron en equilibrio en Modelo 3 de plataforma de pruebas . . . . .	60
55. Diseño de las bases estructura de dron Modelo 5 . . . . .	60
56. Diseño de estructura de dron Modelo 5 . . . . .	61
57. Diseño de unión en forma de Y de estructura de dron Modelo 5 . . . . .	61
58. Análisis de esfuerzos del Modelo 5 de la estructura del dron . . . . .	62
59. Simulación brazo delantero Modelo 5 deflexión de fuerzas de empuje para elevar el dron . . . . .	63
60. Simulación brazo trasero Modelo 5 deflexión de fuerzas de empuje para elevar el dron . . . . .	63
61. Simulación de esfuerzos de Von Mises brazo delantero con fuerzas para elevar el dron . . . . .	64
62. Simulación de esfuerzos de Von Mises en el brazo trasero con fuerzas para elevar el dron . . . . .	64
63. Simulación de factor de seguridad en el brazo delantero con fuerzas para elevar el dron . . . . .	65
64. Simulación de factor de seguridad en el brazo trasero con fuerzas para elevar el dron . . . . .	65
65. Simulación de deflexión en brazo delantero con fuerzas de empuje sobreestimadas . . . . .	66
66. Simulación de deflexión en brazo trasero con fuerzas de empuje sobreestimadas . . . . .	66
67. Simulación de esfuerzos de Von Mises en brazo delantero con fuerzas sobreestimadas . . . . .	67

68. Simulación de esfuerzos de Von Mises en brazo trasero con fuerzas sobreestimadas	67
69. Simulación de factor de seguridad en el brazo delantero con fuerzas sobreestimadas	68
70. Simulación de factor de seguridad en el brazo trasero con fuerzas sobreestimadas	68
71. Análisis en Modelo 5 con pesos para simular fuerza de empuje en brazo delantero	69
72. Análisis en Modelo 5 con pesos para simular fuerza de empuje en brazo trasero	69
73. Vista frontal del Modelo 5 del dron	70
74. Vista lateral del Modelo 5 del dron	71
75. Prueba de vuelo 1 Modelo 5 estructura del dron	71
76. Prueba de vuelo 2 Modelo 5 estructura del dron	72
77. Diseño Modelo 1 plataforma de pruebas de vuelo	74
78. Diseño Modelo 2 plataforma de pruebas de vuelo	76
79. Configuraciones de escuadras	77
80. Diseño de pieza para unión del dron con guías verticales	77
81. Diseño de rótula de base de pruebas de vuelo Modelo 3	80
82. Diseño Modelo 3 plataforma de pruebas de vuelo	81
83. Partes de rótula fabricada	82
84. Iteración 2 de prueba de elevación	91
85. Iteración 3 de prueba de elevación	92
86. Iteración 4 de prueba de elevación	92
87. Iteración 5 de prueba de elevación	93
88. Iteración 2 de prueba de Pitch	93
89. Iteración 3 de prueba de Pitch	94
90. Iteración 4 de prueba de Pitch	94
91. Iteración 5 de prueba de Pitch	95
92. Iteración 6 de prueba de Pitch	95
93. Iteración 7 de prueba de Pitch	96
94. Iteración 8 de prueba de Pitch	96
95. Iteración 2 de prueba de Roll	97
96. Iteración 3 de prueba de Roll	97
97. Iteración 4 de prueba de Roll	98
98. Iteración 5 de prueba de Roll	98
99. Iteración 6 de prueba de Roll	99
100. Iteración 2 de prueba de Yaw	99
101. Iteración 3 de prueba de Yaw	100
102. Iteración 4 de prueba de Yaw	100
103. Iteración 5 de prueba de Yaw	101
104. Iteración 6 de prueba de Yaw	101
105. Iteración 7 de prueba de Yaw	102
106. Vista frontal plataforma de pruebas Modelo 1	102
107. Vistas superior e inferior plataforma de pruebas Modelo 1	102
108. Ejemplificación de colocación de argolla plataforma de pruebas Modelo 1	103
109. Diseño de superficie de plataforma de pruebas Modelo 2	103
110. Diseño de patas plataforma Modelo 2	104
111. Pata de plataforma Modelo 2	104

112. Escuadra de soporte para plataforma de pruebas Modelo 2 . . . . .	104
113. Unión de superficies con patas, varillas roscadas y escuadras . . . . .	105
114. Ejemplificación de nudos de sujeción . . . . .	105
115. Topes de guías . . . . .	106
116. Ejemplificación tope dron con guía . . . . .	106
117. Modelo 2 plataforma de pruebas de vuelo con dron . . . . .	107
118. Rótula fabricada para plataforma de prueba de vuelo Modelo 3 . . . . .	107
119. Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo . . . . .	108
120. Modelo 3 plataforma de pruebas de vuelo con dron . . . . .	109
121. Plano unión Y Modelo 4 . . . . .	110
122. Plano base superior cuerpo . . . . .	111
123. Plano base inferior cuerpo . . . . .	112
124. Plano base motor frontal . . . . .	112
125. Plano base motores colineales . . . . .	113
126. Plano soporte brazo frontal . . . . .	113
127. Plano soporte brazo trasero . . . . .	114
128. Plano brazo . . . . .	114
129. Plano guía para pruebas de vuelo . . . . .	115
130. Plano unión Y Modelo 5 . . . . .	115
131. Base motores Modelo 5 . . . . .	116
132. Plano unión base motores con brazo Modelo 5 . . . . .	116
133. Plano brazo Modelo 5 . . . . .	117
134. Plano soporte Modelo 5 . . . . .	117
135. Plano de superficie de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1 . . . . .	118
136. Plano de patas de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1 . . . . .	118
137. Plano de patas de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2 . . . . .	119
138. Plano de superficie inferior y superior de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2 . . . . .	119
139. Plano de parte lateral de escuadra . . . . .	120
140. Plano de unión inferior de escuadra . . . . .	120
141. Plano de unión media de escuadra . . . . .	121
142. Plano de unión superior de escuadra . . . . .	121
143. Plano de rótula . . . . .	122
144. Plano pieza superior rótula . . . . .	122

---

## Lista de cuadros

---

1. Configuración de motores para desplazamiento de dron Y4. [12]	20
2. Propiedades del MDF proporcionados por la empresa MASISA. [16]	24
3. Propiedades del PLA proporcionados por Multimaker. [17]	24
4. Propiedades del ABS proporcionadas por Multimaker. [18]	25
5. Datos motor A2212/13T. [24]	37
6. Datos controlador de velocidad. [25]	38
7. Datos de hélice. [23]	38
8. Datos batería. [26]	39
9. Datos Arduino UNO. [27]	39
10. Propiedades del ABS utilizado en Inventor	43
11. Propiedades del PVC utilizado en Inventor	44
12. Conexión de receptor con Arducopter	50
13. Conexión de controladores de velocidad con Arducopter	52
14. Datos motor 2212-KV920. [28]	54
15. Datos ESC Simonk 30A. [29]	54
16. Datos hélice GEMFAN. [30]	55
17. Datos Arducopter. [31]	55
18. Control remoto. [32]	56
19. Receptor. [33]	56
20. Módulo de voltaje. [34]	57
21. Conexión de controladores de velocidad con Arducopter para el Modelo 5	70



Se diseñó una estructura para dron en configuración Y4 capaz de fabricarse mediante técnicas de manufactura rápida y resistente a fuerzas de flexión generadas por los pesos de sus motores y las fuerzas de empuje generadas por estos, con lo cual al realizar iteraciones con estructuras de MDF y no obtener una buena resistencia a flexión, se decidió diseñar una estructura que fuera maquinada mediante impresión 3d utilizando PLA, obteniéndose en esta estructura deflexiones cercanas a cero al realizar el análisis en Autodesk Inventor para el modelo computacional y en Tracker para la estructura física, y con esto se pudo asegurar que la estructura no fallará por corte a flexión en sus brazos y sus uniones. Para realizar estas pruebas se analizó la deflexión generada en los brazos por las fuerzas de los pesos de los motores las cuales fueron 0.55 N por motor y por fuerzas de pesos colocados para simular las fuerzas de empuje de los motores siendo estas de hasta 22.5 N. Para poder realizar las pruebas de vuelo se diseñaron y fabricaron plataformas para analizar el comportamiento del dron, tanto para verificar si es capaz de elevarse y su funcionamiento en los ángulos de navegación roll-pitch-yaw. Para poder controlar el dron por medio de mandos inalámbricos se utilizó un control remoto y un receptor conectado a un Arducopter para poder controlar los motores utilizados. Lográndose que el modelo fabricado de la estructura del dron pudiera elevarse y movilizarse en el aire, diseñando y fabricando un dron funcional en configuración Y4.



A drone structure was designed in Y4 configuration capable of being manufactured using fast manufacturing techniques and resistant to bending forces generated by the weights of their motors and the thrust forces generated by them, which by performing iterations with MDF structures and not to obtain a good flexural strength, it was decided to design a structure that was machined by 3d printing using PLA, obtaining in this structure near-zero deflections when performing the analysis in Autodesk Inventor for the computational model and in Tracker for the physical structure, and with this it was possible to ensure that the structure will not fail due to bending in its arms and joints. To perform these tests, the deflection generated in the arms was analyzed by the forces of the motor weights, which were 0.55 N per motor and by forces of weights placed to simulate the thrust forces of the motors, these being up to 22.5 N. In order to carry out the flight tests, platforms were designed and manufactured to analyze the drone's behavior, used to verify if it can rise and its operation in the roll-pitch-yaw navigation angles. In order to control the drone by wireless controls, a remote control and a receiver connected to an Arducopter were used to control the motors used. Achieving that the model manufactured of the structure of the drone could be raised and mobilized in the air, designing and manufacturing a functional drone in Y4 configuration.



# CAPÍTULO 1

---

## Introducción

---

La robótica aérea ha sido una rama de ingeniería que ha ido creciendo con el pasar del tiempo, ya que ha ayudado en la optimización de tareas de la vida cotidiana de muchas personas, ya sea en agricultura, en investigaciones de terrenos, en el monitoreo de volcanes, en vigilancia, en búsqueda y rescate de personas, entre otras.

Pero el principal problema de muchos de los robots voladores es su batería, ya que no se posee la capacidad para mantenerlos en funcionamiento por mucho tiempo, es por lo que han surgido muchos proyectos de investigación sobre robots aéreos híbridos, que sean capaces de optimizar su energía y mantenerse más tiempo en funcionamiento.

Es por lo que se decidió realizar un proyecto sobre un robot híbrido capaz de elevarse y planear, para poder optimizar su batería y ser usado para realizar diversos trabajos durante un periodo prolongado de tiempo.

Dicho trabajo se dividió en dos partes, en la realización de un dron y en la elaboración de un sistema de planeación. Este trabajo trata sobre el diseño de una estructura para dron, que permita que este sea capaz de elevarse y moverse en el aire mediante la implementación de diversos componentes y así en un futuro se pueda acoplar el dron al sistema de planeación.

Para el diseño de la estructura se propuso una configuración Y4, en donde en el capítulo de *Diseño y Fabricación de Estructura Y4* se mostrarán las iteraciones que se realizaron para poder llegar al modelo final, observándose los cambios que se fueron realizando para cada modelo y como estos se fueron validando mediante pruebas de deflexión y de vuelo. Además, se diseñaron y construyeron plataformas para pruebas de vuelo de los modelos de las estructuras de dron creadas, donde en el capítulo *Diseño y Fabricación de Plataforma para Pruebas de Vuelo* se mostrará el proceso de diseño y fabricación de estas.



Con el pasar del tiempo en el campo de la robótica aérea han surgido muchas variaciones, debido que se han creado diversos modelos de robots para que sean capaces de adaptarse a distintas necesidades, ya sea que se usen con fines de entretenimiento o de investigación. Muchas de estas variaciones son para que el robot se pueda adaptar a distintos entornos y realizar tareas predeterminadas.

Cabe destacar que hoy en día los robots bioinspirados e híbridos han ido adquiriendo mayor importancia en el campo de investigación, ya sea para centros de estudio o empresas privadas. A continuación, se muestran algunos de los robots híbridos y bioinspirados más interesantes:

**Wingtra:** Es un dron compuesto por dos motores y su diseño es similar al de un avión (Véase la Figura 1). Su funcionamiento es el siguiente: Para realizar el despegue y aterrizaje lo hace de manera vertical, comportándose como un helicóptero al utilizar sus motores para hacer girar sus hélices y así poder elevarse o descender, y para movilizarse en el aire realiza un giro para colocarse de manera horizontal y volar como un avión. Es usado por especialistas geoespaciales y por distintas industrias, para realizar mapeos de territorios. 1



Figura 1: Wingtra. 1

**THOR:** En lo que destaca este robot es que es un dron híbrido transformable, debido a que es capaz de pasar de cuadricóptero a avión, ya que mediante dos hélices grandes (cabe destacar que estas hélices pudieron ser bioinspiradas) y dos pequeñas es capaz de funcionar como cuadricóptero, esto en su mayoría lo realiza al hacer girar sus dos hélices grandes, las cuales se pueden apreciar en la Figura 2, permitiéndole poderse elevar verticalmente y mantenerse estático en la posición que desee. Por último, para poder funcionar como avión gira sus hélices grandes para poderlas posicionar como si fueran alas, y luego utiliza sus dos hélices pequeñas para poder avanzar hacia adelante. 2

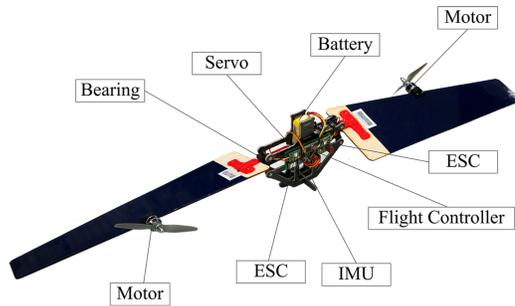


Figura 2: THOR. 2

**TRON F9:** Este es un dron con alas, pero lo que lo hace llamativo es que posee la capacidad de girar la posición de sus motores. Con lo cual los coloca de manera vertical a la hora de despegar y aterrizar para realizarlo como un helicóptero, permitiéndole una mayor estabilidad a la hora de realizar estas operaciones, y luego para movilizarse en el aire coloca sus motores en posición horizontal para desplazarse como un avión, brindándole esta configuración una mayor velocidad durante el vuelo. 3



Figura 3: TRON F9. 3

**Parrot Disco FPV:** Es un dron con alas con solamente un motor, esta es una de sus ventajas ya que le permite ahorrar energía en comparación con otros drones que utilizan más de un motor. Este es capaz de alcanzar velocidades mayores a 80 km/h y funcionar durante 45 minutos, además el diseño de sus alas está inspirado en alas de aves. Para poder volar únicamente debe ser lanzado al aire y enseguida empieza su funcionamiento de manera adecuada. 4

**Dron con plumas artificiales:** El diseño de este dron utiliza en sus alas un sistema que simula plumas, lo cual le da mayor versatilidad a la hora de volar. Este posee únicamente un motor, simulando el funcionamiento de una avioneta, utiliza sus alas para poder realizar giros u otros movimientos. Pero el funcionamiento principal de sus alas es permitirle aumentar o disminuir su altura, esto lo realiza a la hora de retraerlas o contraerlas, permitiéndole optimizar su funcionamiento. A la vez su cola le sirve para direccionarse cuando esta en



Figura 4: Parrot Disco FPV. [4]

vuelo y así poder realizar diversas maniobras. [5]



Figura 5: Dron con plumas artificiales. [5]



Una de las razones por las cuales es importante este proyecto, es que inicia la rama de investigación de robótica aérea en la Universidad del Valle de Guatemala, dado que por su complejidad no se había iniciado su estudio anteriormente y además la Universidad del Valle sería la primera universidad en el país en iniciar esta rama de estudio.

Se diseñará una estructura en configuración Y4, debido que no es una configuración usada comúnmente en drones, por lo que tiene un campo de estudio amplio, ya sea en comprender mejor su funcionamiento, en realizar mejoras a estructuras creadas o diseñar nuevas configuraciones.

Además, por la forma de la estructura, en un futuro está planeado unir este proyecto con un planeador, para poder crear un dron híbrido bio-inspirado, ya sea que se utilice un planeador de ala fija como el que utilizan los drones Tron F9 [3] y Parrot Disco FPV [4] o uno más sofisticado como el que utiliza el dron THOR [2], y poder estudiar su comportamiento junto con el dron para poder encontrar algún funcionamiento para la realización de diversas tareas o alguna en específico. También se podría implementar uno basado en plumas de alas de ave y así poseer mayor versatilidad durante el vuelo, además uno de los principales usos de este tipo de planeador es que le permite al dron aumentar o disminuir su altura al utilizar alas retráctiles [5].

Creando un dron híbrido con el objetivo de poder ahorrar energía al momento de planear, debido que uno de los principales problemas presentados en los drones es su batería, ya que debido a la demanda energética de sus componentes posee un periodo de funcionamiento corto.

Otro punto importante es que mediante el uso drones se pueden realizar diversas aplicaciones, por ejemplo, la búsqueda de personas en desastres ambientales, como medio para llevar instrumentos de primeros auxilios a diversos lugares, en la optimización de métodos de agricultura, en la búsqueda de agua para la creación de pozos, en el monitoreo de actividad volcánica, entre otras. Siendo aplicaciones que se pueden implementar en Guatemala y ayudar a muchas personas. Por lo que en un futuro se podría dar continuación a este proyecto

enfocándose en alguna de las aplicaciones mencionadas anteriormente.

### 4.1. Objetivo general

Diseñar una estructura para dron en configuración y4, que le permita elevarse y moverse en el aire, para que en un futuro pueda ser adaptada a un planeador y poder crear un robot híbrido.

### 4.2. Objetivos específicos

- Diseñar una estructura que pueda ser creada con técnicas de manufactura rápida, para poder crear prototipos de manera rápida.
- Diseñar una estructura resistente a deflexiones, para evitar que esta falle por corte a flexión en las uniones de sus brazos.
- Diseñar y construir una plataforma para pruebas de vuelo del dron, para verificar que este se puede elevar.
- Implementar un controlador de vuelo que permita movilizar al dron por medio de mandos inalámbricos.



Se diseñará y fabricará una estructura para dron en configuración y4, esta será diseñada para poderse maquinar por medio de técnicas de manufactura rápida encontradas en la Universidad del Valle de Guatemala, utilizándose como principales materiales de fabricación el MDF y el PLA.

La estructura creada tendrá que ser capaz de sostener cada uno de los componentes requeridos para poner en funcionamiento el dron. Además, deberá ser resistente a deflexiones, tales como las producidas por el peso de los motores y las fuerzas de empuje producidas por el funcionamiento de los motores para poder elevar el dron.

Para poder verificar que la estructura fabricada sea resistente a flexión se utilizará el Software Tracker, centrándose en los brazos de la estructura. Para esto se colocarán los pesos de los motores para verificar que los brazos sean lo suficientemente resistentes para poder resistirlos sin poseer una deflexión considerable, de lo contrario se realizarán iteraciones de la estructura hasta lograr este objetivo.

Se diseñará y construirá una plataforma para poder realizar las pruebas de vuelo del dron de manera controlada, esto con el fin de poseer mayor seguridad. Debido que si el dron se descontrola podría dañar a alguien durante su funcionamiento y además se evita que se averíen sus componentes por golpes o caídas.

La plataforma será fabricada para poder realizar pruebas de elevación, es decir movimiento en el eje z, ya que una de las primeras pruebas de la estructura de dron creada será si es capaz de elevarse.

Se implementará un controlador de vuelo para poder movilizar al dron por medio de mandos inalámbricos. Estos componentes no serán fabricados, sino que se comprarán para únicamente poder implementarlos en el proyecto.

Se registrará cada uno de los componentes utilizados con el propósito que el proyecto pueda ser replicado.

No se realizarán pruebas con algún planeador creado, debido que la unión del dron fabricado y el planeador se realizará en la siguiente fase del proyecto.

## 6.1. ¿Qué es un dron?

La palabra 'dron' proviene del inglés 'drone', y su significado original es 'Abeja Macho' o 'Zángano', además la palabra drone hace referencia al zumbido de estos insectos.

La palabra dron reemplaza de manera coloquial las siglas UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Los UAVs se pueden definir como vehículos sin tripulación, capaz de tener un nivel de vuelo controlado, sostenido y propulsado por motores de propulsión. [6]

## 6.2. Clasificación de los drones según su forma de sustentación

Las principales estructuras de clasificación de los drones según su forma de sustentación son las siguientes:

### ■ Drones de ala fija

Esta estructura es similar a la de un avión comercial, está conformada por un fuselaje y alas fijas. Este tipo predomina actualmente en las aeronaves militares. [6]

Sus principales características son su capacidad para recorrer grandes distancias y sus altas velocidades. El sistema de propulsión que utilizan es un motor de combustión o turbinas. [6]

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Son más eficientes que los drones multirrotores, lo cual les permite mayor autonomía. La sustentación de sus alas les permite poseer un menor gasto energético, ayudándoles en la duración de su vuelo, al poseer una duración más prolongada de sus baterías. [7]

- Pueden recorrer grandes distancias, ya que pueden adquirir grandes velocidades y son más eficientes energéticamente. [7]
- Poseen menor ruido durante su funcionamiento, permitiéndoles ser más difíciles de detectar de manera acústica. [7]
- Cuentan con mayor resistencia a la temperatura, viento y lluvia. [7]

■ **Drones multirrotor**

Un multirrotor o multicóptero se puede considerar como un helicóptero que posee más de dos rotores o motores. Están conformados por varios brazos que sostienen los motores y además forman la estructura del dron. [6]

Están compuestos por hélices, en donde el vuelo del dron consiste en el giro invertido y simultáneo de estas. Para los drones conformados por cuatro hélices, dos giran en sentido de las agujas del reloj y las otras dos en sentido antihorario, creando una fuerza de empuje para elevar el dron. [6]

Sus ventajas respecto los drones de ala fija son las siguientes:

- Permiten tener una posición estática, esto gracias al uso de componentes electrónicos como giroscopios. [6]
- Realizan de manera vertical su despegue y aterrizaje, lo cual permite reducir el espacio en tierra para su operación. Siendo una de las principales ventajas, ya que los drones de ala fija en muchos casos requieren catapulta mecánicas o humanas para su lanzamiento y paracaídas para poder aterrizar. [7]
- Poseen precisión y maniobrabilidad durante su vuelo, esto debido que poseen la capacidad de rotar sobre su eje, lo cual les permite acercarse de forma precisa a cualquier objetivo. Respecto los drones de ala fija no poseen mucha precisión debido que siguen trayectorias curvilíneas durante su operación, las cuales poseen radios de giro amplios y velocidades de ascenso y descenso estrictas. [7]
- Pueden transportar mayor carga en relación a su propio tamaño. [7]



Figura 6: Comparación de drones según su forma de sustentación. [4] [8]

### 6.3. Metodología de vuelo de un dron multirrotor

Para explicar cómo es que los drones vuelan primero se debe entender el Teorema de Bernoulli y la Tercera Ley de Newton, lo cual se explica a continuación:

- **Teorema de Bernoulli**

Este establece que la rapidez de flujo de un fluido puede variar a lo largo de las trayectorias del fluido. Además, la presión puede variar, para esto depende de la altura, de la situación estática que posea y de rapidez de flujo. Este teorema también implica que la presión debe ser diferente en regiones con diferente sección transversal, ya que, si fuera la misma en todos lados, la fuerza neta sobre cada elemento de fluido sería cero. [9]

Al analizar el ala de un avión se puede utilizar este principio, si se realiza un corte de perfil en el ala. Se puede analizar que debido a la curvatura de la superficie superior del ala el aire acelera, esto provoca que la presión disminuya. En cambio que el aire por debajo del ala posee una velocidad constante, lo cual provoca que su presión también lo sea. Esto produce una diferencia de presiones entre la superficie superior e inferior del ala, lo cual genera una fuerza de sustentación. [10]

En el caso de los drones multirrotos se puede aplicar este mismo análisis para sus hélices, considerándolas como un ala en movimiento giratorio, con lo cual se crea la fuerza de empuje que ayuda a contrarrestar la fuerza de la gravedad. [10]

- **Tercera Ley de Newton**

La tercera ley de Newton establece: Si un cuerpo A ejerce una fuerza sobre el cuerpo B (una 'Acción'), entonces, el cuerpo B ejerce una fuerza sobre el cuerpo A (una 'Reacción'). Estas dos fuerzas tienen la misma magnitud pero dirección opuesta, y actúan sobre cuerpos diferentes. [9]

Ahora realizando un análisis de un ala de avión inclinada, se puede apreciar que el aire que choca en la parte inferior se desvía hacia abajo y genera una acción, lo cual también se genera por el aire que choca en la parte superior, esto da como resultado una reacción en sentido opuesto la cual se llama sustentación.

Si se habla de un dron multirrotor se puede decir entonces que mediante el giro de las hélices de un dron se produce una fuerza que contrarresta la fuerza de gravedad, lo cual permite que el dron se eleve, esta fuerza es llamada usualmente Fuerza de Empuje.

Pero para que esto ocurra de manera adecuada las hélices no deben girar en mismo sentido, ya que provocaría que el dron girará de manera descontrolada. La solución de este problema para los drones que poseen un número par de motores es agrupar en mitades, realizando que una mitad gire en sentido horario y la otra en sentido antihorario. Según el número de motores que se posea la configuración y ubicación de los motores será diferente.

Cuando un dron multirrotor está en funcionamiento debe flotar, ganar y perder altura, y desplazarse. Para esto se deben cumplir los siguientes requisitos:

- **Flotar**

- Todos los motores deben girar a la misma velocidad.
- La velocidad de los motores debe ser lo suficiente para que se genere una fuerza de empuje que permita contrarrestar su peso, hasta llegar al punto deseado y no seguir aumentando la velocidad.
- El efecto de par que actúa por cada uno de los motores debe ser cancelado. [10]

#### ■ Ganar y perder altura

Para que el dron se eleve los cuatro motores deben elevar su velocidad de manera simultánea. Y para descender deben disminuir su velocidad de manera simultánea también. [10]

#### ■ Desplazamiento

El desplazamiento de un dron se basa en el control del Pitch, Roll y Yaw, lo cual se explica a continuación:

##### • Pitch

El control del pitch indica al dron si se debe mover hacia adelante o hacia atrás, para avanzar o retroceder. Si se desea avanzar se aumenta la velocidad de los motores traseros respecto la velocidad de los motores delanteros, o se disminuye la velocidad de los motores delanteros respecto la velocidad de los motores traseros, con esto se logra inclinar la parte frontal del dron, dando como resultado un movimiento hacia adelante. [10]

Si se desea un movimiento hacia atrás se realiza el caso contrario, con lo cual se inclina la parte trasera del dron.

##### • Roll

El control del roll indica al dron hacia que lado se debe mover, ya sea derecho o izquierdo. Si se desea moverse hacia la derecha, la velocidad de los motores ubicados al lado izquierdo debe aumentar en relación con la velocidad de los motores del lado derecho, con esto se logra inclinar el dron hacia el lado derecho, generando un desplazamiento hacia este lado. Cabe destacar que este movimiento se logra aumentando la velocidad de los motores del lado izquierdo o disminuyendo la velocidad de los motores del lado derecho. [10]

Para poder desplazarse hacia la izquierda se realiza el proceso contrario, logrando inclinar el dron hacia la izquierda y realizar un desplazamiento en esta dirección.

##### • Yaw

El control del yaw permite un movimiento de rotación del dron. Esto se logra aumentando o disminuyendo la velocidad de pares de motores diametralmente opuestos, estos son los motores que poseen la misma dirección. Obteniendo como resultado un giro en sentido del movimiento de las hélices del par que incremento su velocidad. [10]



Figura 7: Ejemplificación de Roll, Pitch y Yaw. [11]

## 6.4. Tipos de drones multirotor

### ■ Tricópteros

Esta es una de las formas más simplificadas y se compone por tres brazos que surgen de su parte central. Posee 3 motores, 3 controladores de velocidad, un servo y 3 hélices. [6]

Para controlar este tipo de dron en el aire se realiza mediante el aumento y disminución de las revoluciones de sus motores y el control del servomotor que posee. Para inclinarlo hacia adelante o hacia atrás se aumentan o se disminuyen las revoluciones del motor trasero, si se desea inclinar hacia los lados se aumentan o disminuyen las revoluciones de sus motores frontales dependiendo el caso, y si se desea que el dron gire en su propio eje se mueve la posición del servomotor que posee en la cola. [6]

Una de sus ventajas al igual que todos los multirotores respecto a los drones de ala fija, es que pueden despegar y aterrizar de manera vertical y además son capaces de mantenerse estáticos en el aire.

Argumentos a favor:

- Es manejable debido al servomotor de su cola.
- Pueden ser plegables debido al diseño de su estructura, proveyéndole un fácil almacenamiento y transporte.
- Es más ligero en comparación con las demás configuraciones de multirotores, esto debido a que posee un menor número de piezas.
- Posee muchas posibilidades de movimiento. [6]

Argumentos en contra:

- Si falla alguno de sus motores el dron descenderá sin control.
- Posee bajo empuje, con lo cual tiene un soporte de cargas limitadas.
- Se necesita mayor conocimiento para su configuración.
- Es menos estable respecto las otras configuraciones de multirotores.
- Los motores deben trabajar a grandes revoluciones para elevar el dron.
- No existe mucha variedad de modelos. [6]

### ■ Cuadricópteros

Esta es una de las configuraciones más comunes de los multirotores. Se componen por

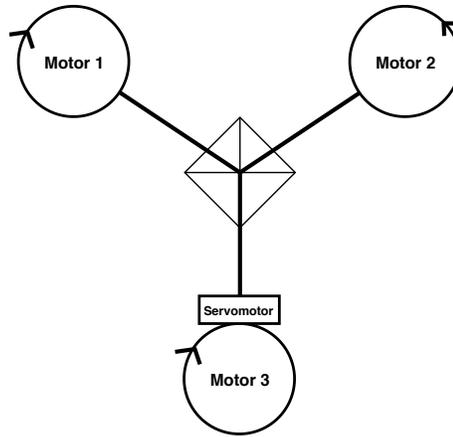


Figura 8: Esquema de tricóptero

cuatro motores en los extremos de sus brazos y usualmente las hélices que posee se encuentran en el mismo plano entre sí. [6]

Para el control en el aire, si se desea el ascenso o descenso se aumentan o disminuyen las revoluciones de sus motores. En esta configuración dos de los motores giran en sentido de las agujas del reloj y los otros dos en contra, con esto se logra que el dron no gire en su propio eje de manera descontrolada y poder obtener el equilibrio de este. [6]

Si se desea movilizarse hacia adelante o atrás se debe aumentar o disminuir las revoluciones de sus motores traseros respecto las revoluciones de los delanteros. Si se quiere inclinar el dron hacia el lado derecho o izquierdo, se deben aumentar las revoluciones de los motores contrarios a la inclinación deseada respecto los demás. Por último si se desea girar sobre su propio eje, se debe aumentar las revoluciones de algún par de motores, es decir de giro a favor o en contra de las manecillas del reloj.

Argumentos a favor:

- Posee una aceleración rápida.
- Existe una fácil manipulación de los componentes.
- Cuenta con una estructura sencilla.
- Mayor capacidad de carga respecto los tricópteros.
- Es más ágil que un hexacóptero.
- Existe mucha variedad de este tipo de configuración. [6]

Argumentos en contra:

- Posee aceleración y velocidad limitadas.
- En caso de que se arruine un motor el dron cae de manera descontrolada.
- No posee mucha capacidad de carga.
- La mayoría no son plegables. [6]

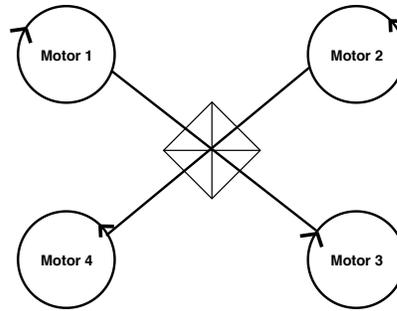


Figura 9: Esquema de cuadricóptero en configuración X

### ■ Hexacópteros

Los drones que cuentan con esta configuración poseen 6 motores, con lo cual tienen 6 brazos que se originan de su centro. Su forma de vuelo se basa en la de los cuadricópteros, donde 3 motores giran en sentido de las agujas del reloj y los otros tres en contra. Además, sus motores se encuentran posicionados en el mismo nivel. [6]

Argumentos a favor:

- Cuentan con una respuesta de vuelo más estable respecto los cuadricópteros.
- Poseen mayor capacidad de carga que los cuadricópteros.
- Se pueden instalar más accesorios debido a su tamaño.
- Si se avería algunos de sus motores no se cae el dron de manera descontrolada. [6]

Argumentos en contra:

- Su precio es más elevado con respecto las configuraciones que poseen menor número de motores.
- La mayoría no son compactos.
- Se necesita más energía para accionar sus motores.
- No son plegables, lo cual dificulta su transporte. [6]

### ■ Octocópteros

Los drones con esta configuración también son llamados multicópteros, debido a la cantidad de motores con los que cuentan. Poseen ocho motores en un mismo nivel y el mismo número de brazos que surgen de su centro. [6]

Por el número de motores que posee cuenta con una potencia elevada, lo cual le permite elevar mayores cargas respecto las configuraciones con menor número de motores. Al igual que los hexacópteros su forma de vuelo esta basa en la de los cuadricópteros, donde cuatro motores giran en sentido de las manecillas del reloj y los otro cuatro en contra. [6]

Respecto los argumentos en contra y a favor de esta configuración se puede decir que son los mismos que los hexacópteros.

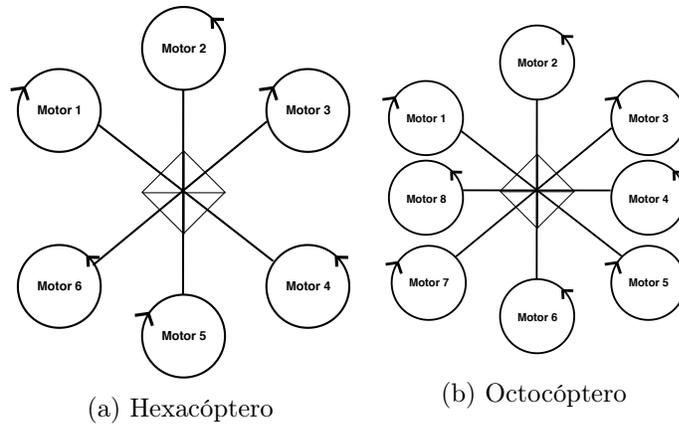


Figura 10: Esquema de hexacóptero y octocóptero en configuración +

## 6.5. Estructura en configuración Y4 para dron

La configuración Y4 entra en la clasificación de los cuadricópteros. Posee cuatro motores y tres brazos que surgen de su centro, además de otros componentes. Dos motores son posicionados en los brazos frontales, uno en cada brazo, y los otros dos son colocados colineales en el brazo trasero, según se muestra en el esquema de la Figura 11.

Para poder desplazar un dron en configuración Y4 a la posición deseada, se incrementan o se decrementan las velocidades de sus motores, según se muestra en el Cuadro 1, para esto se nombraron los motores según la Figura 11.

Acción	Velocidad Motor 1	Velocidad Motor 2	Velocidad Motor 3	Velocidad Motor 4
Incremento de altura	Incrementa	Incrementa	Incrementa	Incrementa
Decremento de altura	Decrementa	Decrementa	Decrementa	Decrementa
Pitch hacia adelante	Decrementa	Decrementa	Incrementa	Incrementa
Pitch hacia atrás	Incrementa	Incrementa	Decrementa	Decrementa
Roll positivo	Incrementa	Decrementa	No cambia	No cambia
Roll negativo	Decrementa	Incrementa	No cambia	No cambia
Yaw positivo	No cambia	No cambia	Decrementa	Incrementa
Yaw negativo	No cambia	No cambia	Incrementa	Decrementa

Cuadro 1: Configuración de motores para desplazamiento de dron Y4. 12

## 6.6. Componentes que forman un dron multirotor

### ▪ Estructura

Este componente es el esqueleto del dron y determina su configuración. Además, en esta parte están acoplados todos los demás componentes que hacen que el dron funcione.

6

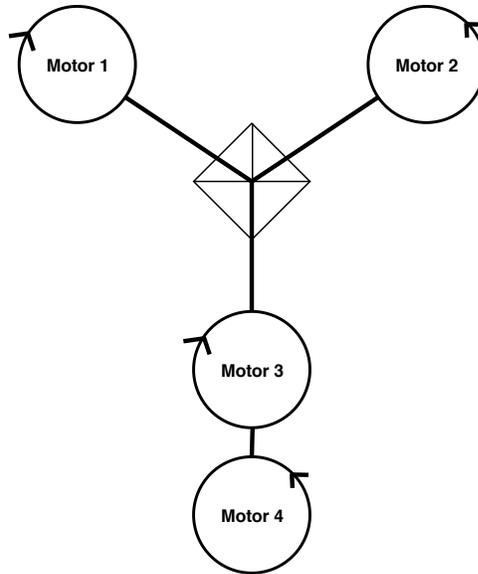


Figura 11: Configuración Y4

- **Motores**

Los drones multirrotores utilizan un tipo de motor eléctrico conocido motor Brushless. La característica de estos es que poseen una alimentación en corriente continua y que no poseen escobillas para cambiar de polaridad en su embobinado. [6]

Los motores Brushless se componen de una parte móvil llamada rotor, donde se encuentran una serie imanes permanentes, y una parte fija llamado estátor compuesta por una serie de bobinados de hilo conductor. [6]

La corriente eléctrica que proviene del sistema de alimentación pasa por los bobinados, los cuales adquieren una polaridad variable. Estos al interactuar con el campo magnético producido por los imanes del estátor producen el giro del motor. [6]

Un parámetro importante en los motores Brushless es el factor kV. Este aparece usualmente junto al número de vueltas del bobinado del motor, e indica el número de revoluciones por minuto que es capaz de girar el motor por cada voltio aplicado. [6]

- **Controlador de velocidad**

Se conoce usualmente como ESC, por sus siglas en Inglés Electronic Speed Controller. Este es un circuito electrónico que sirve para controlar la velocidad de giro de los motores y su dirección, además sirve como freno dinámico. [6]

Este componente se conecta con el controlador de vuelo por medio de tres cables, dos son utilizados para proveer alimentación y el tercero es el encargado de transmitir la señal de control para el funcionamiento del motor. [6]

- **Hélices**

Este es un componente importante para el dron, ya que de este depende la fuerza de empuje de cada motor, además la eficiencia de cada motor puede variar en función de

la hélice que posea. [6]

Las hélices poseen dos parámetros que indican su comportamiento de vuelo:

- Distancia entre puntas: Entre mayor sea la longitud de las hélices más fuerza de empuje se puede generar.
- El paso: Este indica la distancia teórica que la hélice puede avanzar en el eje rotacional en una revolución completa. El paso se define también como la capacidad que posee la hélice para mover el aire y generar empuje.

#### ■ Batería

El tipo más común de batería utilizada para un dron es la de iones de litio o LIPO, el cual es un dispositivo diseñado para el almacenamiento de energía eléctrica. Una ventaja de estas es que son ligeras en comparación con otras y se pueden fabricar en varios tamaños y formas. Además poseen una alta tasa de descarga energética, lo cual es solicitado por los motores de los drones. [6]

#### ■ Controlador de vuelo

Este componente es el cerebro del dron, su función es hacer girar los motores de forma adecuada para lograr el movimiento deseado por el piloto o el medio que controla el dron. El controlador de vuelo es el encargado de procesar la información recibida por los sensores y los datos de dirección para enviar las órdenes para el control de los motores. [6]

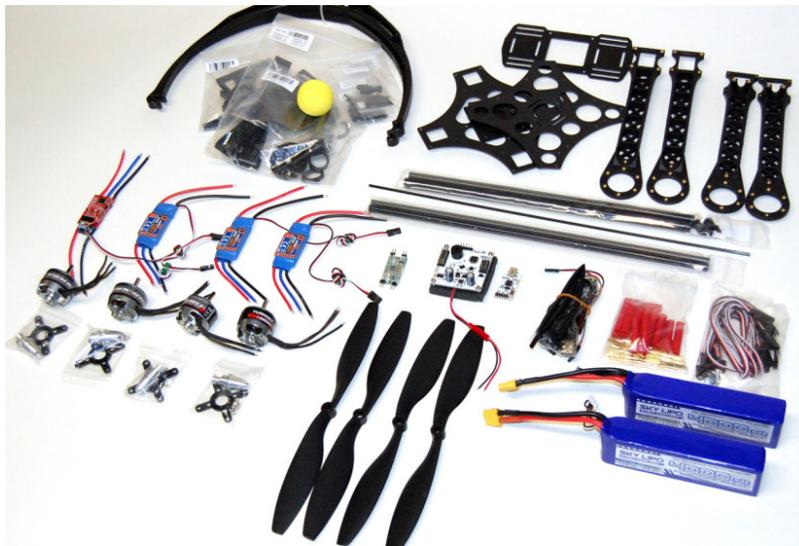


Figura 12: Componentes que forman parte de un dron. [13]

## 6.7. Requisitos de diseño de un dron multirrotor

Cuando se diseña un prototipo de dron se poseen restricciones o requerimientos que son necesarios para obtener un diseño funcional, óptimo y competitivo. A continuación se describen estos requisitos:

- **Autonomía:** Este en muchos casos es un requisito indispensable. Los drones multirrotores deben poseer una tarjeta de memoria, en la cual se puedan programar diversas órdenes para que el dron las realice posteriormente durante su funcionamiento. [14]
- **Tiempo de vuelo:** Este es uno de los requisitos más demandados actualmente, ya que muchos de los drones en el mercado poseen un tiempo de funcionamiento pequeño por la alta demanda energética de sus componentes para hacerlos funcionar. Por lo que al diseñar un prototipo dron se debe procurar no utilizar al máximo la capacidad de sus motores, para poder tener un tiempo de funcionamiento más prolongado. [14]
- **Peso:** Este es uno de los requisitos más importantes a la hora de diseñar un dron, ya que se debe de diseñar su estructura lo más liviana posible. Para así poder elegir los motores adecuados, tomando en cuenta el peso de la estructura y el resto de los componentes, ya que todos los motores poseen un límite de peso al elevar alguna masa. Además, siempre se debe de disminuir al máximo el peso total del dron. [14]
- **Resistencia mecánica de los materiales:** Esto se toma en cuenta a la hora de seleccionar los materiales de nuestro prototipo, ya que muchos de estos son baratos y de bajo peso, pero no poseen una resistencia mecánica adecuada, por lo que es un factor para descartarlos por completo. [14]

## 6.8. Materiales utilizados en manufactura rápida

El prototipado rápido es la forma más rápida de obtener una réplica exacta tridimensional de un diseño generado mediante aplicación CAD en 3D. [15] Los modelos creados pueden ser únicamente útiles y estéticos para su estudio en el mercado al que van dirigidos, o también pueden cumplir con algunos de los requerimientos mecánicos de la pieza final, permitiendo la realización de pruebas antes de que se genere el proceso de creación de la pieza final. [15]

Para la generación de prototipos pequeños usualmente se utiliza la impresión 3D o el corte láser, para obtener de manera rápida un prototipo y poder realizar diversas pruebas para verificar su funcionalidad.

A continuación se muestran los materiales más utilizados para impresión 3D y corte Láser:

- **MDF:** Por sus siglas en inglés 'Medium Density Fiberboard'. Es un tablero utilizado en manufactura por corte láser, formado por fibras de madera obtenidas mediante un proceso termo-mecánico y unidas con un adhesivo que polimeriza mediante altas tensiones y temperaturas. [16]

El MDF puede ser de diversos espesores, según lo que se requiera por el consumidor, lo mismo es con sus longitudes que forman su área. En el Cuadro 2 se muestra un aproximado de las propiedades mecánicas para un MDF delgado, es decir de espesor

de 3 mm, 4.7 mm y 5.5 mm, el cual es el más utilizado para la creación de prototipos a pequeña escala.

MDF delgado			Espesor (mm)		
Propiedades	Unidad	Tolerancia	3	4.7	5.5
Densidad	[Kg/m <sup>3</sup> ]	-	820+-50	770+-40	730+-25
Flexión	[N/mm <sup>2</sup> ]	+ - 10	45	43	40
Tracción	[N/mm <sup>2</sup> ]	+ - 0.20	1.00	1.00	1.00

Cuadro 2: Propiedades del MDF proporcionados por la empresa MASISA. [16]

- **PLA:** Su denominación química es Ácido Poliláctico, este material es fabricado con materiales orgánicos y renovables. Ofrece buena resistencia a la tracción y puede dar buena calidad superficial. [17]

Es usado en impresoras 3D y permite crear objetos con alta resolución como herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos, entre otros. [17]

En el Cuadro 3 se muestran las propiedades mecánicas de este material, al ser utilizado en impresión 3D.

Propiedades	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	2,346.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	49.5 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	45.6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	5.2 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	103.0 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	3,150.0 MPa	ISO 178
Dureza	83 (Shore D)	Durómetro

Cuadro 3: Propiedades del PLA proporcionados por Multimaker. [17]

- **ABS:** Su denominación química es Acrilonitrilo Butadieno Estireno. Se utiliza en impresión 3D y posee buenas propiedades mecánicas, buena adhesión entre capas, buena estética y deformación mínima. [18]

Se usa en prototipado visual y funcional y en fabricación en series cortas [18]. Sus propiedades mecánicas se muestran en el Cuadro 4.

## 6.9. Cálculo del tiempo de vuelo de un dron multirrotor

Para el cálculo del tiempo de vuelo se deben conocer las características de la batería y los motores utilizados. Usando sus valores máximos para obtener un aproximado del tiempo mínimo de vuelo. En caso estos no funcionen al máximo, se obtendrá un tiempo de vuelo más prolongado, siendo un factor importante al diseñar un dron.

Propiedades	Valor típico	Método de ensayo
Módulo de elasticidad a la tracción	1,681.5 MPa	ISO 527 (1 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la deformación	39.0 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Esfuerzo de tracción a la rotura	33.9 MPa	ISO 527 (50 mm/min)
Alargamiento a la deformación	3.5 %	ISO 527 (50 mm/min)
Resistencia a la flexión	70.5 MPa	ISO 178
Módulo de flexión	2,070.0 MPa	ISO 178
Dureza	76 (Shore D)	Durómetro

Cuadro 4: Propiedades del ABS proporcionadas por Multimaker. 18

A continuación se muestran las ecuaciones necesarias para poder realizar el cálculo del tiempo de vuelo:

- Consumo Máximo de Motor

$$CMM = VR \cdot AM \quad (1)$$

Donde:

$CMM =$  Consumo de Motor al Máximo

$VR =$  Voltaje Requerido por el Motor

$AM =$  Amperaje de Motor al Máximo

- Consumo Total de los Motores

$$CTM = CMM \cdot n \quad (2)$$

Donde:

$CTM =$  Consumo de Motor al Máximo

$n =$  Número de Motores

- Potencia de la Batería:

$$PB = AB \cdot VB \quad (3)$$

Donde:

$PB =$  Potencia de la Batería

$AB =$  Amperaje de la Batería

$VB =$  Voltaje de la Batería

- Tiempo de Vuelo del Dron

$$TV = \frac{PB}{CTM} \quad (4)$$

Donde:

$TV =$  Tiempo de Vuelo

## 6.10. Cálculo de la fuerza de empuje requerida para un dron multirotor

Este es un factor importante a la hora de diseñar un dron, debido que los motores seleccionados deben ser capaces de levantar el peso total del dron. Además se debe tomar en cuenta que la fuerza de empuje requerida para cada motor no sea mayor a la que puede generar, o este en sus límites, ya que mientras mayor fuerza de empuje deban generar los motores, mayor consumo energético requerirán para su funcionamiento.

La Ecuación 5 muestra la fórmula para el cálculo de la fuerza de empuje de cada motor, para esta se utiliza un factor de 2, para poder sobredimensionar la cantidad requerida.

Cálculo de Fuerza de Empuje Requerida por Motor:

$$F_{empuje} = \frac{P_{drone}}{n} \cdot 2 \quad (5)$$

Donde:

$F_{empuje}$  = Fuerza de Empuje Requerida por Motor

$P_{drone}$  = Peso Total del Drone

$n$  = Número de Motores

## 6.11. Arducopter

Es un controlador de vuelo que se puede utilizar de manera fácil para manipular un vehículo aéreo no tripulado u otro tipo de vehículos. Su diferencia entre las otras plataformas que únicamente soportan control remoto es que este se puede utilizar con GPS, siendo una solución completa para los Vehículos Aéreos no Tripulados 19. En la Figura 13 se muestra este controlador.

El Arducopter presenta un vuelo totalmente autónomo basado en puntos de ruta, posee planificación de misiones y telemetría en tiempo real a través del uso de una Estación de Control Terrestre o en inglés Ground Control Station 19.

Las principales características del Arducopter son las siguientes:

- Alta calidad en autonivelación y control automático de altitud 19.
- No se requiere de programación, pues se pueden utilizar softwares en la computadora para poderlo configurar 19.
- Se pueden colocar puntos de ruta ilimitados, esto debido que se pueden trazar diversos puntos de ruta a través de una Ground Control Station y el Arducopter podrá volar siguiéndolas 19.
- Puede mantener su posición mediante el uso de un GPS y sensores de altitud 19.

- Puede retornar a su punto inicial de manera automática [19].
- Se puede configurar para poder controlar la posición de una cámara, en caso esta sea instalada [19].
- Se puede programar para controlar diversas configuraciones de vehículos [19].

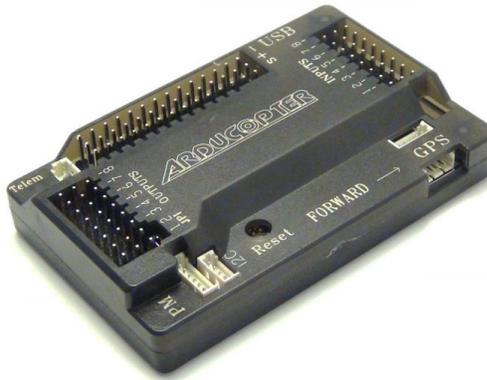


Figura 13: Arducopter Versión 2.8. [20]

## 6.12. Ground Control Station

Es una aplicación de software que se ejecuta en una computadora. Permite realizar una comunicación entre diversos vehículos aéreos no tripulados o UAV y la computadora por medio de telemetría inalámbrica (medición de magnitudes físicas). Despliega en tiempo real información sobre el rendimiento y posición de los UAVs y puede servir como una cabina virtual, mostrando muchos de los instrumentos que se tendrían si se estuviese volando en un avión real [21].

Una Ground Control Station o GCS puede ser utilizada también para controlar un UAV en vuelo, cargando comandos de vuelo y realizando configuraciones de parámetros. También es usada para monitorear en tiempo real las transmisiones de videos de las cámaras de los UAV [21].

### 6.12.1. Mission Planner

Es una aplicación GCS para el proyecto de piloto automático de código abierto de ArduPilot. Es utilizada para aviones, drones multirrotor y rovers. Esta aplicación es compatible únicamente con Windows [22].

Mission Planner puede ser utilizada como una herramienta de configuración o como un suplemento de control dinámico para un vehículo autónomo [22].

A continuación, se mencionan algunas cosas que se puede realizar con Mission Planner:

- Cargar un firmware dentro de una plataforma de piloto automático. Pudiéndose cargar las configuraciones que se muestran en la Figura 14, y además se pueden realizar variaciones de estas dentro de las configuraciones 22.
- Realizar configuraciones del vehículo para obtener un rendimiento óptimo 22.
- Planear, guardar y cargar misiones autónomas dentro de la plataforma de piloto automático 22.
- Descargar y analizar registros de misiones creadas 22.

Si se posee hardware de telemetría se puede realizar lo siguiente:

- Monitoreo del estado del vehículo durante operación 22.
- Ver y analizar registros telemetría 22.
- Operar el vehículo en Vista de primera persona 22.

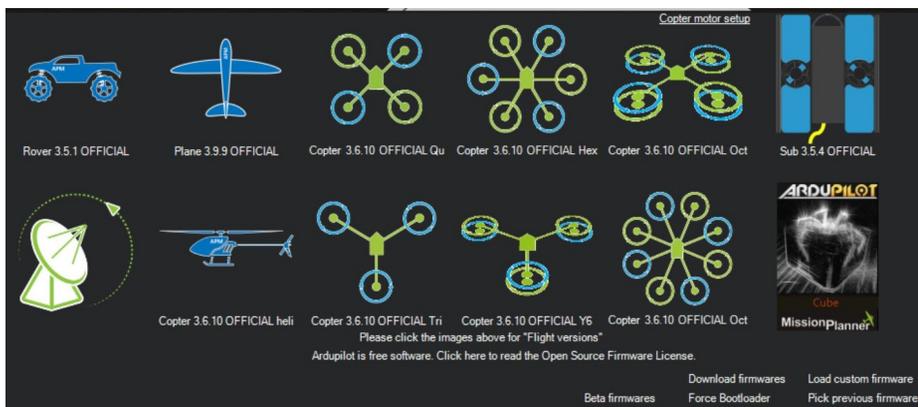


Figura 14: Configuraciones de vehículos de Mission Planner

## 7.1. Validación

Esta fue una parte fundamental del trabajo, pues en este punto aún no se tenía definido como sería el dron y además no se sabía como tendría que ser el planeador que se instalaría en el dron, como tampoco se sabía la ubicación de este. Para esta parte se utilizó un dron JJRC blue crab, como se muestra en la Figura 15, y se probó el funcionamiento de este con distintas configuraciones de planeador.

La primera configuración se realizó de manera simple colocando un triángulo de Duroport debajo del dron, (véase Figura 15). Con esta configuración el dron no se movió en ninguna dirección, se asumió que el peso del Duroport era lo suficientemente considerable para evitar el que dron se moviera. Con este supuesto se creó un planeador hecho de un cartón delgado para ver el funcionamiento del dron (véase Figura 16), pero el resultado fue el mismo que la prueba anterior pues el dron tampoco se movió.

Con lo cual se concluyó que el planeador no podría estar en la parte inferior de las hélices, esto tenía bastante sentido, pues al girar las hélices generan una fuerza de empuje la cual permite que el dron se eleve, pero para esto las hélices deben empujar el aire que poseen abajo hacia arriba, con lo cual de ser posible no debe haber ninguna interferencia en la parte inferior de las hélices.

Una vez planteado lo anterior se creó un prototipo para el planeador el cual no causará ninguna interferencia con las hélices (véase Figura 17), al probar el funcionamiento del dron este generó movimiento hacia los lados, pero no se pudo obtener ninguna elevación, asumiéndose que no se generó debido a la capacidad del dron, pues no era la suficiente para levantar el planeador creado, además este generaba mucha resistencia por su superficie.

Como último punto se creó un planeador de Seda, pues es sumamente ligero y es utilizado para la creación de paracaídas (véase Figura 18), y además se utilizaron pequeñas varillas de madera. Al funcionar el dron se generó una pequeña elevación y un desplazamiento hacia los lados, pero no se obtuvo el resultado esperado. Concluyéndose que el dron utilizado no poseía la suficiente capacidad, pues es utilizado únicamente con fines recreativos.

Con esto se concluyó que el peso del dron sin importar cuales fueran los motores utilizados tendría que ser lo más ligero posible, para generar una mayor elevación. Además, para poseer un buen funcionamiento las hélices no se deberían obstruir en ningún momento, esto para que pueden generar la mayor fuerza de empuje posible. Concluyéndose también que la mejor estructura para el dron era la presentada en la configuración Y4 (véase Figura 11), debido que brinda buena estabilidad y una fuerza de empuje aceptable, además por su forma se presta más para adaptarse a un planeador. Tomando en cuenta que el diseño de este no obstruya las hélices, cuando se requiera que el dron esté en funcionamiento.

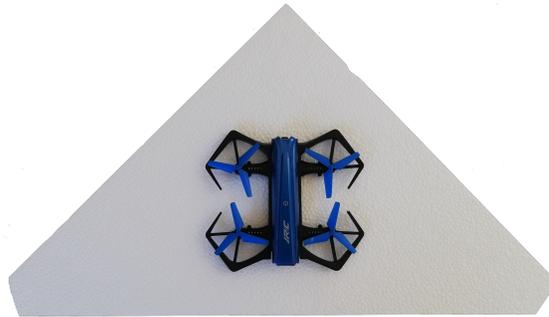


Figura 15: Modelo 1 prototipo validación



Figura 16: Modelo 2 prototipo validación

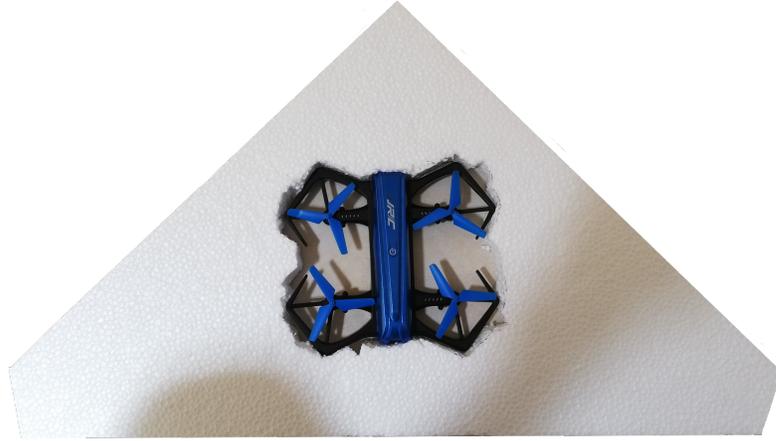


Figura 17: Modelo 3 prototipo validación



Figura 18: Modelo 4 prototipo validación

## 7.2. Modelo 1

Para el diseño de la estructura del dron se tomó la decisión de realizar una en configuración Y4, dado que posee buena capacidad de carga por los cuatro motores que la componen y además por su diseño se facilita la conexión de un planeador en su parte inferior, pudiéndose realizar este bioinspirado en alguna ave y así poder crear un dron híbrido, lo cual se realizará en un futuro como siguiente fase del proyecto.

Para realizar el diseño de la estructura se utilizó el Software Autodesk Inventor, en donde fueron modeladas cada una de sus partes de tal manera que pudieran ser maquinadas mediante técnicas de manufactura rápida, para poder crear diversos prototipos de una manera rápida mediante estas técnicas.

El Modelo 1 fue un diseño básico, el cual se compuso por un brazo trasero, dos brazos frontales y un cuerpo compuesto por tres niveles para poder sujetar sus brazos y colocar los componentes necesarios para su funcionamiento, observándose su diseño en la Figura 19.

Este modelo fue diseñado para poderse cortar mediante láser en MDF de 3.2 mm de grosor, por lo que para poderlo fabricar se realizó este procedimiento.

Para poder sujetar los brazos al cuerpo se utilizaron tornillos de 1/8 de pulgada de diámetro y 1/2 pulgada de largo y tuercas del mismo diámetro, esto para poder dar mayor rigidez en las uniones. Y para la sujeción de los distintos niveles del cuerpo se utilizaron tornillos de 5/32 de pulgada de diámetro y 3 pulgadas de largo y tuercas con el mismo diámetro.

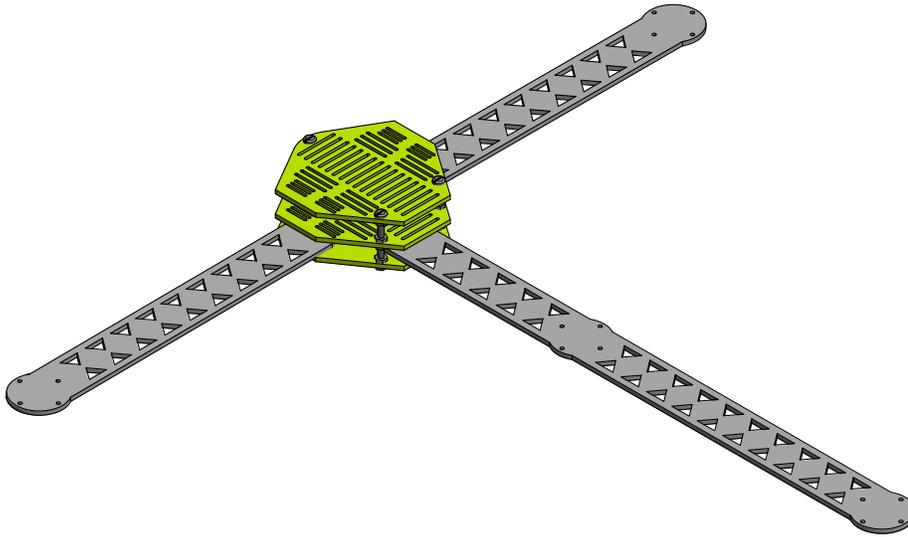


Figura 19: Diseño Modelo 1 de estructura del dron

### 7.2.1. Validación mediante análisis de deflexión

El análisis de deflexión se hizo mediante el Software Tracker, este se realizó para el brazo frontal y el trasero del modelo creado. Para esto se colocaron los motores seleccionados los cuales poseían un peso de 57 gramos junto con sus bases, tornillos y tuercas de sujeción, en los extremos de los brazos. Para realizar el análisis en Tracker se tomó una fotografía de cada situación planteada y luego se midió la deflexión presentada, siendo 1.952 cm aproximadamente para el brazo frontal (véase Figura 20) y 8.646 cm para el brazo trasero (véase Figura 21).

### 7.2.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión

El modelo creado tuvo la ventaja que fue sencillo en su modelado y construcción, pero se descartó por presentar una deflexión considerable en sus brazos por las fuerzas ejercidas por

los motores colocados. Lo cual no era favorable, ya que se deseaba obtener una estructura rígida a la hora de poner en funcionamiento el dron. Además, debido a la deflexión presentada, si se hubiera utilizado esta estructura, en un futuro esta pudo haber fallado por corte por flexión en las uniones de los brazos con el cuerpo.

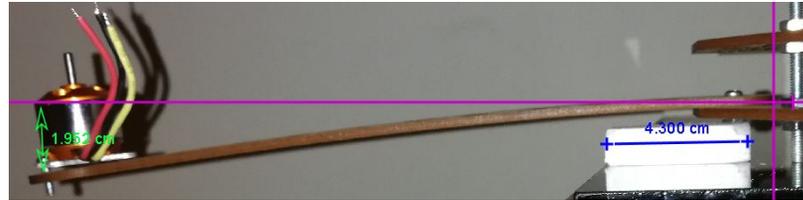


Figura 20: Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 1

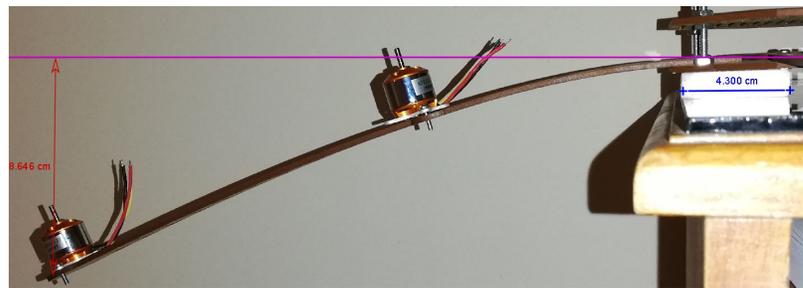


Figura 21: Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 1

## 7.3. Modelo 2

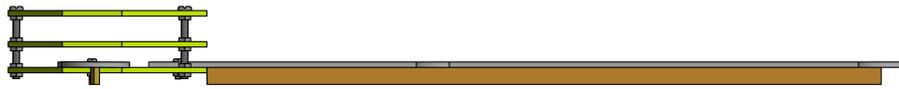
Este diseño se basó en el Modelo 1, pero se buscó eliminar la deflexión que este poseía en sus brazos. Para esto se diseñaron soportes para cada uno de los brazos, los cuales fueron colocados en la parte inferior de los brazos de manera perpendicular, los cambios realizados en este modelo se pueden apreciar en la Figura [22](#).

Este modelo también se diseñó para poder ser maquinado mediante corte láser, con lo cual para su fabricación se utilizó MDF de 3.2 mm de grosor. Para poder sujetar los brazos y los soportes se utilizaron tornillos de 1/8 de pulgada de diámetro y 1/2 pulgada de largo y tuercas del mismo diámetro, y para la sujeción de las bases del cuerpo se utilizaron tornillos de 5/32 de pulgada de diámetro y 3 pulgadas de largo y tuercas con el mismo diámetro.

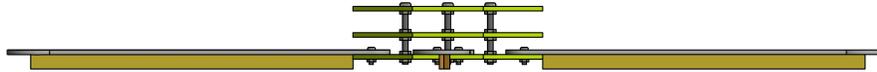
### 7.3.1. Validación mediante análisis de deflexión

Para el análisis de deflexión se utilizó el Software Tracker. Realizándose también para un brazo delantero y el trasero.

Para esto se colocaron los motores seleccionados los cuales poseían un peso de 57 gramos junto con sus bases, tornillos y tuercas de sujeción, en cada uno de los brazos. Para realizar el análisis en Tracker se tomó una fotografía de cada situación y luego se midió la deflexión



## Brazo trasero



## Brazos delanteros

Figura 22: Diseño Modelo 2 de estructura del dron

presentada, siendo 0.461 cm para el brazo frontal (véase Figura 23) y 0 cm aproximadamente para el brazo trasero (véase Figura 24).

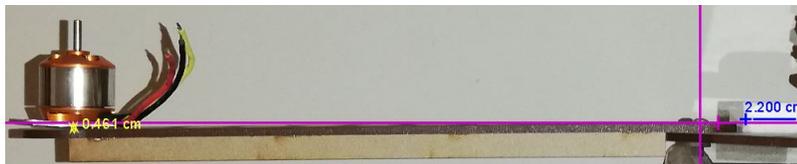


Figura 23: Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 2



Figura 24: Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 2

### 7.3.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión

Este modelo solucionó el problema de deflexión en los brazos de la estructura presentado en el Modelo 1. Pero no se poseía mucha rigidez en las uniones de los brazos con el cuerpo, con lo cual se decidió descartar este modelo y realizar una siguiente iteración para poder obtener una estructura más rígida.

## 7.4. Modelo 3

Este se basó en el Modelo 2, pero se diseñaron uniones para los soportes de los brazos con el cuerpo del dron. Estos fueron insertados en los soportes y colocados paralelamente al cuerpo del dron, con el fin de poder realizar una unión mediante tornillos. Véase la Figura 25, la cual muestra el diseño creado.

Este modelo al igual que los anteriores se diseñó para poder ser fabricado mediante corte láser, utilizándose para su maquinado MDF de 3.2 mm de grosor. Para poder sujetar los brazos y las uniones creadas se utilizaron tornillos de 1/8 de pulgada de diámetro y 1/2 pulgada de largo y tuercas del mismo diámetro, y para la sujeción de las bases del cuerpo se utilizaron tornillos de 5/32 de pulgada de diámetro y 3 pulgadas de largo y tuercas con el mismo diámetro.

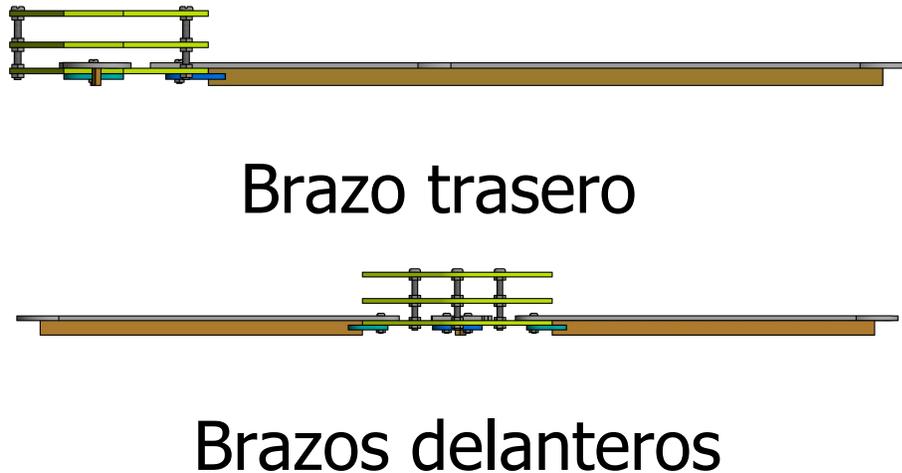


Figura 25: Esquema del Modelo 3

### 7.4.1. Validación mediante análisis de deflexión

Al igual que los modelos anteriores para el análisis de resistencia a deflexión se usó el Software Tracker. Realizándose también para un brazo delantero y el trasero, para poder comprobar el funcionamiento de las uniones diseñadas.

Para esto se colocaron los motores seleccionados los cuales poseían un peso de 57 gramos junto con sus bases, tornillos y tuercas de sujeción, en cada uno de brazos. Para realizar el análisis en Tracker se tomó una fotografía de cada situación y luego se midió la deflexión presentada, siendo 0.345 cm para el brazo frontal (véase Figura 26) y 0.573 cm para el brazo trasero (véase Figura 27).

### 7.4.2. Aprobación del modelo según prueba de deflexión

Con este modelo se logró una mayor rigidez en las uniones de los brazos con la base de la estructura, y además la deflexión que presentaron sus brazos en las pruebas elaboradas no fue lo suficientemente considerable. Por lo tanto, se aprobó este modelo para realizar pruebas de vuelo y poder validarlo por completo mediante estas. De no presentarse un buen resultado a la hora de dichas pruebas, se realizarán más iteraciones de la estructura hasta lograr un resultado aceptable en el vuelo del dron.



Figura 26: Análisis de deflexión brazo frontal Modelo 3

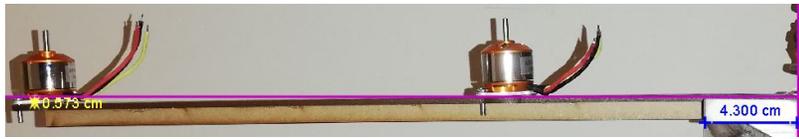


Figura 27: Análisis de deflexión brazo trasero Modelo 3

## 7.5. Validación Modelo 3 mediante prueba de vuelo

Uno de los pasos para poder validar por completo el Modelo 3 fue la prueba de vuelo. Fabricándose su estructura y armándose con los tornillos y tuercas especificados en la sección Modelo 3, obteniéndose un peso de 266.2 gramos. Luego se acoplaron los componentes que se especifican en la sección de componentes utilizados para el Modelo 3 (véase la Figura 31), los cuales poseyeron un peso completo de 482.8 gramos, siendo el peso total del dron 749 gramos.

### 7.5.1. Componentes utilizados para el Modelo 3

**Motor Brushless:** Se utilizaron cuatro motores brushless, dos para el brazo trasero y uno para cada brazo delantero. El motor utilizado se muestra en la Figura 28 y las especificaciones de este se muestra en la Tabla 5.



Figura 28: Motor utilizado para Modelo 3. [23]

Modelo	A2212/13T
Número de celdas	2 - 3 Li-Poly 6 - 10 NiCd/NiMH
RPM/V	1000 kV
Eficiencia máxima	80 %
Corriente máxima eficiente	4 - 10 A (>75 %)
Resistencia	0.09 ohms
Corriente máxima	13 A por 60 s
Máxima potencia	150 W
Peso	52.7 g / 1.86 onz
Diámetro motor	28 mm
Longitud de campana	28 mm
Diámetro del eje	3.2 mm
Capacidad de peso	300 - 800 g

Cuadro 5: Datos motor A2212/13T. [24]

**Controlador de velocidad:** Se utilizaron cuatro controladores de velocidad o ESC. Sus especificaciones se muestran en la Tabla [6] y en la Figura [29] se muestra el utilizado.

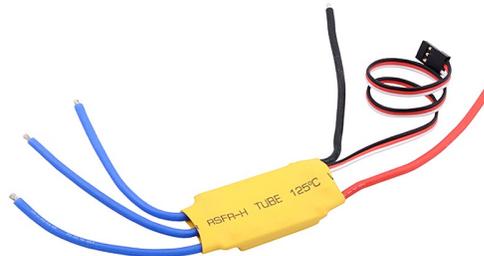


Figura 29: Controlador de velocidad para Modelo 3. [23]

**Hélices:** Se utilizaron cuatro hélices, dos de sentido horario y dos de sentido antihorario a las manecillas del reloj. Cada una montada en el motor respectivo a su giro, este es un factor importante para el correcto funcionamiento del dron, ya que si no se colocan las hélices de manera adecuada el dron no se puede elevar. La hélices utilizadas se pueden ver en la Figura [30] y sus especificaciones se aprecian en la Tabla [7].

Marca	Hobbypower
Salida	30 A; 40 A por 10 s
Voltaje de entrada	2-3 celdas de batería de litio o 5-9 celdas de batería NiCd/NIMh
Salida voltaje del BEC	5 V
Salida corriente del BEC	3 A
Tamaño	45x24x8 mm
Peso	25 g

Cuadro 6: Datos controlador de velocidad. [25]



Figura 30: Hélices para Modelo 3. [23]

Modelo	1045
Diámetro de eje	6 mm
Diámetros de adaptadores para el eje	3 mm, 3.2 mm, 4mm, 5 mm, 6 mm, 6.35 mm y 7.95 mm
Espesor del centro	9.7 mm
Peso	15 g

Cuadro 7: Datos de hélice. [23]

**Batería:** La batería utilizada para energizar el sistema fue de la marca Turnigy. Esta poseía un Voltaje de salida de 11.1 V, el cual era el mínimo solicitado por los controladores de velocidad y los motores. Las especificaciones de la batería utilizada se muestran en la Tabla 8.

**Microcontrolador:** Para este se utilizó un Arduino Uno el cual poseía un Microcontrolador ATmega328P. Este fue utilizado para mandar señales PWM a los controladores de velocidad y así poder accionar cada uno de los motores. Como se mencionó anteriormente se realizó comunicación serial entre el Arduino Uno y una computadora, para poder controlar el ancho de la señal PWM generada y así poder variar la velocidad de los motores desde su mínima hasta su máxima capacidad. Las especificaciones del Arduino utilizado se muestran en la Tabla 9.

Marca	Turnigy
SKU (Número de Referencia)	T1000.3S.20
Capacidad de corriente	1000 mAh
Descarga constante	20 C
Número de celdas	3
Voltaje de salida	11.1 V
Peso	87 g
Longitud	77 mm
Altura	33 mm
Ancho	20 mm
Carga de enchufe	JST-XH

Cuadro 8: Datos batería. 26

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada recomendado	7 - 12 V
Voltaje de entrada límite	6 - 20 V
Pines I/O digitales	14 (6 proveen salida PWM)
Pines I/O digitales PWM	6
Pines de entrada analógica	6
Corriente DC por pin I/O	20 mA
Corriente DC del pin 3.3 V	50 mA
Largo	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Cuadro 9: Datos Arduino UNO. 27

### 7.5.2. Prueba de vuelo realizada

Para hacer funcionar los motores se utilizó un Arduino UNO, con lo cual se mandaron señales PWM a los Controladores de Velocidad mediante comunicación serial con una computadora, con pulsos entre 1000 us y 2000 us, los cuales son los rangos de funcionamiento de los motores utilizados.

Para poder generar el giro del eje del motor en sentido horario y contrario a las manecillas del reloj se realizaron las conexiones de los motores con los controladores de velocidad como se muestra en la Figura 32a y la Figura 32b. Además para montar las hélices, se colocó la correspondiente al giro del eje del motor, con lo cual al verse estas desde una vista área la parte plana es hacia donde giran, o en el modelo utilizado la hélice en sentido horario posee una R en sus especificaciones y la que es en sentido antihorario posee una L.

Para poder realizar las pruebas de vuelo de manera segura, se utilizó el Modelo 1 de la plataforma de pruebas de vuelo (el cual se explica en el Capítulo *Diseño y Fabricación de Plataforma para Pruebas de Vuelo*), amarrándose el dron con hilo plástico a esta para poder

delimitar su área de vuelo según el largo del hilo.



Figura 31: Modelo 3 de estructura del dron

Al realizar las conexiones y configuraciones mencionadas anteriormente, se empezó mandando un pulso de 700 us 4 veces seguidas, debido que es necesario para inicializar los motores. Luego se mando una señal de 1000 us para activar los motores y hacer que estos girarán.

Se incrementó el valor enviado hasta 1500 us, donde se observó que el dron empezó a movilizarse pero no a elevarse. Se continuó incrementando la señal enviada hasta llegar a 1600 us, en este punto la parte trasera del dron se elevó 0.5 cm aproximadamente. Posteriormente se siguió aumentando la señal enviada hasta llegar a 1700 us, en este punto la parte trasera se elevó aproximadamente 1 cm y la estructura empezó a movilizarse hacia adelante. Por último se envió una señal de 1800 us y la parte trasera se elevó casi 2 cm y el dron continuo movilizándose hacia adelante, pero la parte delantera no presento una elevación considerada, segundos después debido a la fuerza generada por los motores hacia arriba el brazo trasero del dron falló por corte a flexión en la unión con el cuerpo del dron.

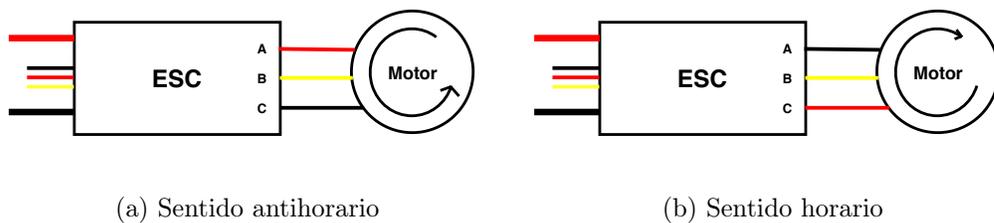


Figura 32: Conexión de motor con ESC

### 7.5.3. Aprobación del modelo según prueba de vuelo

Debido a los resultados obtenidos de las pruebas de vuelo explicadas anteriormente y sobre todo que la unión del brazo trasero con el cuerpo de la estructura falló por corte a flexión este modelo se descartó.

Por lo tanto se decidió realizar el diseño de otra estructura, pero con el objetivo que esta fuera más resistente a deflexión y que presentará un peso menor a igual al Modelo 3. Por lo que se tomó la decisión de cambiar el material de construcción de la estructura por uno más liviano y resistente. Además se decidió cambiar los motores y controladores de velocidad utilizados, para poder analizar si por los utilizados en el Modelo 3 no fue posible elevar el dron.

## 7.6. Modelo 4

Este modelo fue diseñado con el propósito que su estructura fuera más liviana que la del Modelo 3 y además que poseyera mayor resistencia a flexión en las uniones de sus brazos con el cuerpo. Para esto se rediseñó toda la estructura de tal manera que pudiera ser fabricada mediante impresión 3D, utilizando PLA como principal material. Para poseer resistencia a flexión en los brazos se decidió utilizar tubos de PVC de media pulgada, ya que por su longitud no podían ser manufacturados en las impresoras disponibles. Además, al realizarse mediante impresión 3D, estos podrían poseer mayor tendencia a fallar por corte.

Para la unión de los brazos con el cuerpo, se diseñó una unión en forma de Y. La cual se diseñó de tal manera que los brazos pudieran ser insertados a esta, para crear mayor rigidez en su unión y poseer mayor resistencia a flexión, tanto para las fuerzas de los pesos de los motores y las fuerzas de empuje generadas por estos. Además se diseñó de tal manera que se pudiera atornillar a su parte superior una base con los componentes del dron, para poseer el sistema de propulsión en su parte inferior, y también que se pudiera atornillar en su parte inferior una pieza para realizar la unión con el planeador en una futura fase, o una pieza que sirviera como guía para realizar las pruebas de vuelo con el Modelo 2 de la plataforma de pruebas (el cual se explica en el Capítulo *Diseño y Fabricación de Plataforma para Pruebas de Vuelo*). En la Figura 33 se puede apreciar un ensamble de la unión en Y y los brazos del dron.

Se tomó la decisión de realizar más compacto este modelo, para poder reducir el peso de la estructura en todo lo posible. Para esto se utilizó una configuración diferente para sus motores traseros, ya que para los modelos anteriores los motores traseros fueron puestos de manera lineal en el mismo plano, pero para este modelo se colocaron los motores traseros de manera colineal, es decir uno invertido respecto del otro. Respecto la configuración de los motores frontales se utilizó la misma. En la Figura 34a se puede apreciar la base para el motor frontal y en la Figura 34b la base para los motores traseros.

Debido a la configuración de los motores traseros fue necesario diseñar soportes para el dron, estos fueron creados para poder elevar la estructura y para mantenerla estable en el piso antes de ponerse a funcionar. Las bases de los motores frontales fueron diseñadas de tal manera que se pudieran insertar los soportes, usando uno para cada base frontal y

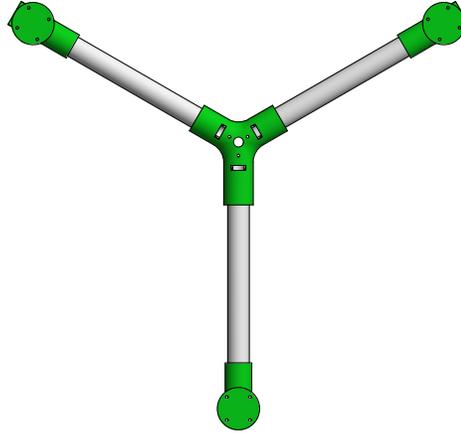
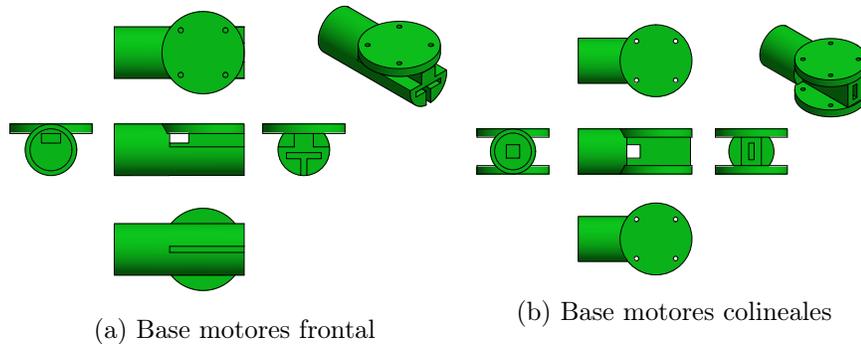


Figura 33: Ensamble unión en Y



(a) Base motores frontal

(b) Base motores colineales

Figura 34: Proyecciones de bases de motores

un soporte para el brazo trasero, este fue diseñado para poderse insertar al tubo de PVC utilizado.

El diseño del Modelo 4 de la estructura del dron se muestra en la Figura [35](#).

### 7.6.1. Validación mediante análisis en Inventor

Previamente a fabricar la estructura del dron, se realizó un análisis de esta en Autodesk Inventor para verificar su factibilidad. Debido que, si no se presentaban resultados que demostrarán que la estructura cumplía con los requerimientos necesarios, es decir que fuera resistente a deflexiones para evitar que sus brazos y sus uniones a la base de la estructura fallaran por corte a flexión, se debería realizar una siguiente iteración hasta obtener lo deseado, tomando en cuenta que los resultados obtenidos en Inventor son solo una aproximación.

Para el análisis en Inventor se utilizó la herramienta *Stress Analysis*. Para poder realizar el análisis fue necesario declarar los materiales de cada uno de los componentes de la estructura, en la versión de Inventor utilizada no se poseía PLA como material para análisis, con lo cual se utilizó ABS para cada una de las piezas maquinas mediante impresión 3d, sabiendo que el PLA posee propiedades mecánicas mayores a las del ABS, con lo cual los esfuerzos y deflexiones en la simulación serán mayores que las de la estructura física en el

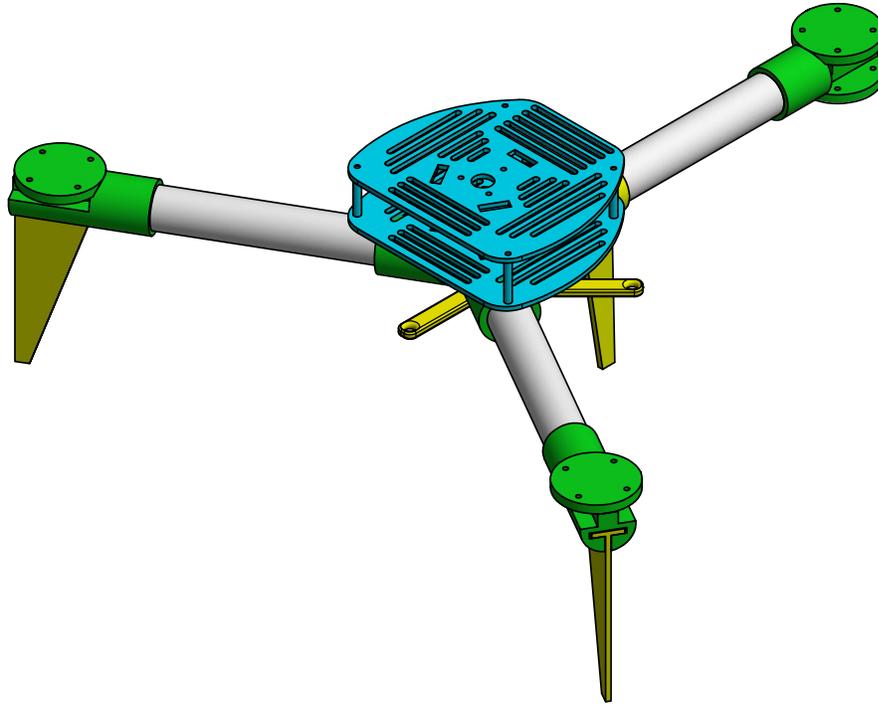


Figura 35: Ensamble Modelo 4 drone

Módulo de Young	2.24 GPa
Coefficiente de Poisson	0.38
Módulo de corte	805 MPa
Densidad	1.060 g/cm <sup>3</sup>
Límite elástico	20 MPa
Resistencia a la tracción	29 MPa

Cuadro 10: Propiedades del ABS utilizado en Inventor

caso que esta se maquine con PLA. Por lo tanto, si en la simulación no se obtienen resultados adecuados usando ABS no se recomienda la fabricación de la estructura física tanto en ABS como el PLA pues la estructura poseerá mayores posibilidades a fallar. Respecto el material utilizado para los brazos se utilizo PVC piping en la simulación, obteniéndose un resultado aproximado de sus propiedades mecánicas. Las propiedades de los materiales utilizados se muestran el Cuadro [10](#) y en el Cuadro [11](#).

Para el análisis se fijaron los brazos a las bases de los motores y a la unión Y de la estructura, y se colocaron fuerzas para simular tres situaciones diferentes y analizar el comportamiento de la estructura, siendo las situaciones planteadas las se explican a continuación:

**Simulación de fuerzas de peso de los motores:** En esta se simularon los pesos ejercidos por los motores en los extremos de los brazos, sabiendo que los motores pueden llegar a pesar 56 gramos con todos su componentes, generando una fuerza de aproximadamente 0.55 N para los brazos delanteros y 1.1 N para el brazo trasero debido que posee dos motores.

Módulo de Young	3.4 GPa
Coefficiente de Poisson	0.4
Módulo de corte	1.2 MPa
Densidad	1.4 g/cm <sup>3</sup>
Límite elástico	46.53 MPa
Resistencia a la tracción	52.36 MPa

Cuadro 11: Propiedades del PVC utilizado en Inventor

Con esto se obtuvo la deflexión, los esfuerzos de von mises, los cuales son un escalar que combina las tensiones y torsiones en los ejes x, y, z, y el factor de seguridad en la estructura generados por estas fuerzas, mostrándose en Inventor estos resultados mediante una escala de colores, siendo en cada uno de los casos el valor mínimo el color azul y el máximo el rojo. Observándose en la Figura 36 que la deflexión generada en la estructura es considerablemente despreciable, como también los esfuerzos de Von Mises (véase la Figura 37) al compararse con la tensión máxima o el límite elástico de los materiales utilizados, el cual es 20 MPa para el ABS y 46.5 MPa para el PVC. Respecto el factor de seguridad se obtuvo uno de 15 en casi toda la estructura como se puede ver en la Figura 38, determinándose con esto que se posee una estructura robusta.

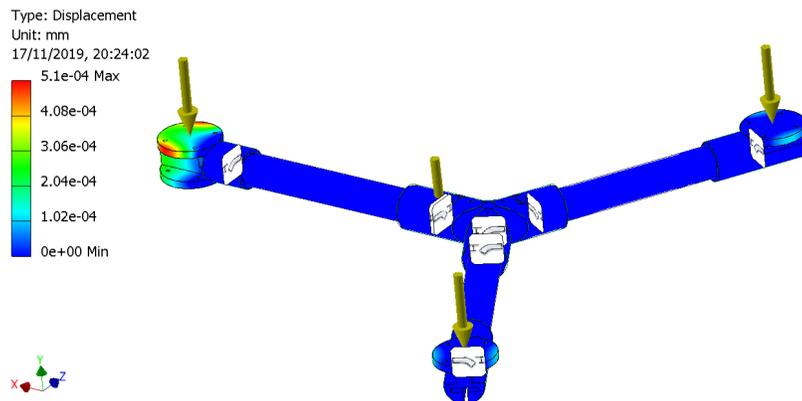


Figura 36: Simulación de deflexión con pesos de los motores

**Simulación de fuerzas de empuje necesarias para elevar el dron:** En esta simulación se analizó el comportamiento de la estructura a las fuerzas de empuje necesarias para poder elevar el dron y al peso del mismo, estimándose un peso de 1.2 kg para el dron y debido que se poseen 4 motores cada motor debe generar una fuerza de empuje para elevar 0.3 kg, con lo cual estimando que se debe generar el doble para poder elevar el dron lo cual es 0.6 kg se genera una fuerza de 6 N aproximadamente por cada motor. Con esto se colocaron fuerzas de 6 N en los extremos de los brazos frontales y 12 N en el extremo de brazo trasero debido que posee 2 motores. Además se colocaron torques en los extremos de los brazos para simular el caso en el que los motores giren los brazos durante su funcionamiento, colocándose un torque de 1.23 Nm en los brazos delanteros y 2.82 Nm en el brazo trasero. Mostrándose los resultados de la misma manera de la simulación anterior, obteniéndose las deflexiones presentadas en la Figura 39, siendo estas también despreciables. Los esfuerzos

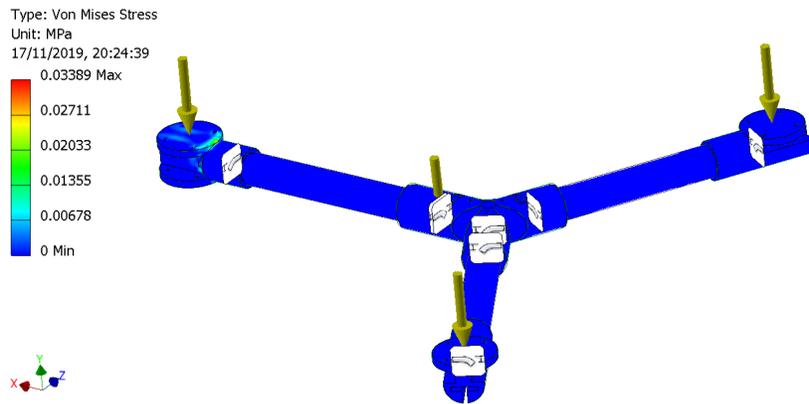


Figura 37: Simulación de esfuerzos de Von Mises con pesos de los motores

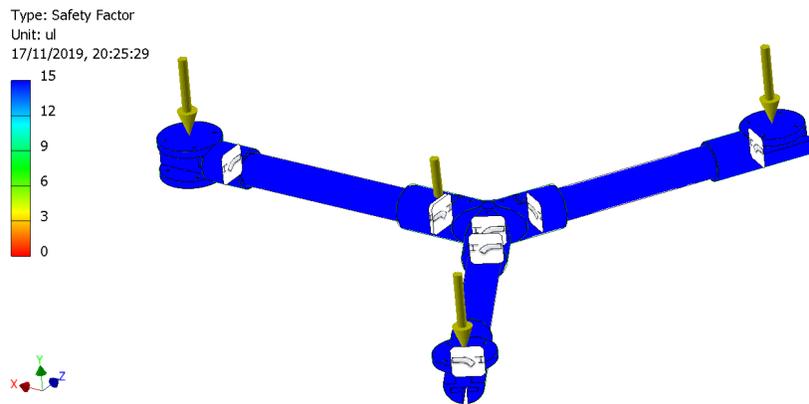


Figura 38: Simulación de factor de seguridad con pesos de los motores

de Von Mises obtenidos se muestran en la Figura 40, los cuales al compararse con la tensión máxima de los materiales son despreciables, y el factor de seguridad se muestra en la Figura 41, determinándose también con esta simulación que se posee una estructura robusta.

**Simulación de fuerzas de empuje sobreestimadas:** Este análisis es igual al realizado para las fuerzas de empuje necesarias para elevar el dron, pero se cambiaron las fuerzas utilizadas por unas de 44.5 N en los brazos delanteros y 89 N en el brazo trasero, lo cual es equivalente a un peso de 10 lb y 20 lb, y para los torques se utilizó 9.23 Nm para los brazos delanteros y 20.92 Nm para el brazo trasero. Esto se realizó para poder tener una sobrestimación de la resistencia de la estructura y poder tener mayor seguridad a la hora de construir la estructura física. Al igual que los resultados de las simulaciones anteriores la deflexión y los esfuerzos de Von Mises fueron relativamente despreciables, mostrándose en la Figura 42 la deformación y en la Figura 43 los esfuerzos Von Mises de la estructura. Respecto el factor de seguridad se obtuvo el mismo de los anteriores como se muestra en la Figura 44, pudiéndose estimar con esta simulación y las anteriores que se posee una estructura robusta.

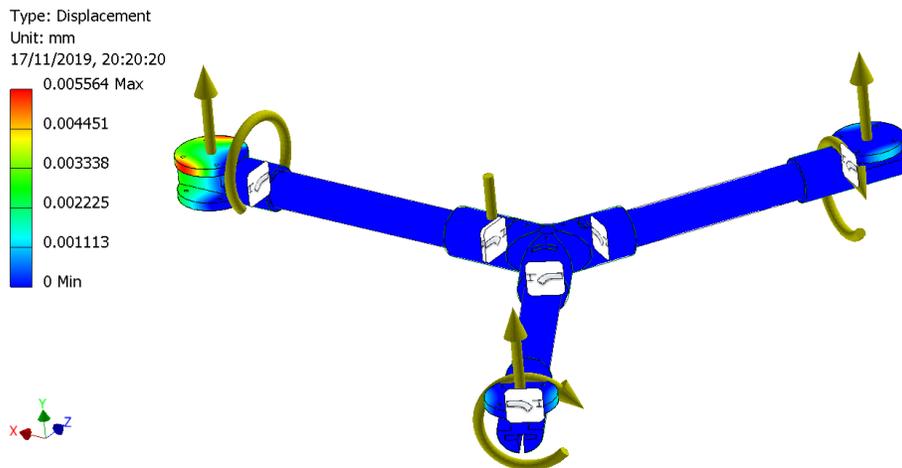


Figura 39: Simulación de deflexión con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron

### 7.6.2. Aprobación del modelo según análisis en Inventor

Según los resultados obtenidos mediante las simulaciones hechas en Inventor, se puede determinar que este modelo de estructura es apto para poderse maquinar. Debido que cumple el requerimiento de no presentar deflexión en sus brazos, para evitar que fallen por corte a flexión tanto estos como en su unión con la base de la estructura. Además, se puede apreciar en los resultados de las simulaciones realizadas que las deflexiones no son mayores a 0.05 mm, aun cuando se genera una sobreestimación de las fuerzas de empuje requeridas. Respecto los esfuerzos de Von Mises se puede decir que al igual que las deflexiones generadas son casi despreciables siendo menores a 2.7 MPa, también en el caso de poseer una sobreestimación, siendo mucho menores los obtenidos para las simulaciones de los casos reales, obteniéndose un factor de seguridad de 15 en casi toda la estructura, pudiéndose decir que la estructura creada es lo suficientemente resistente.

### 7.6.3. Validación mediante análisis de deflexión del prototipo físico

El análisis de resistencia a deflexión de este modelo se realizó en el brazo trasero y frontal, y se utilizó el Software Tracker para su análisis. Este análisis se dividió en dos partes, la primera consistió en analizar las deflexiones generadas por las fuerzas de los pesos de los motores, y la segunda consistió en analizar las deflexiones en los brazos por fuerzas de pesos colocados para simular las fuerzas de empuje generadas por los motores, para esto se colocó al revés la unión Y de los brazos. Además se analizó el comportamiento de la conexión de los brazos y la unión Y, para verificar que este punto no fallará por corte a flexión.

**Deflexiones generadas por fuerzas de pesos de los motores:** Para este análisis se colocaron los motores con un peso de 56 gramos junto con sus componentes para poderse asegurar a su respectivo soporte. Se tomó una fotografía para el brazo frontal y el trasero, para poder examinar su comportamiento. Al realizar las mediciones de deflexión en Tracker se obtuvo que los brazos no presentaban deflexión ante las fuerzas generadas por los pesos

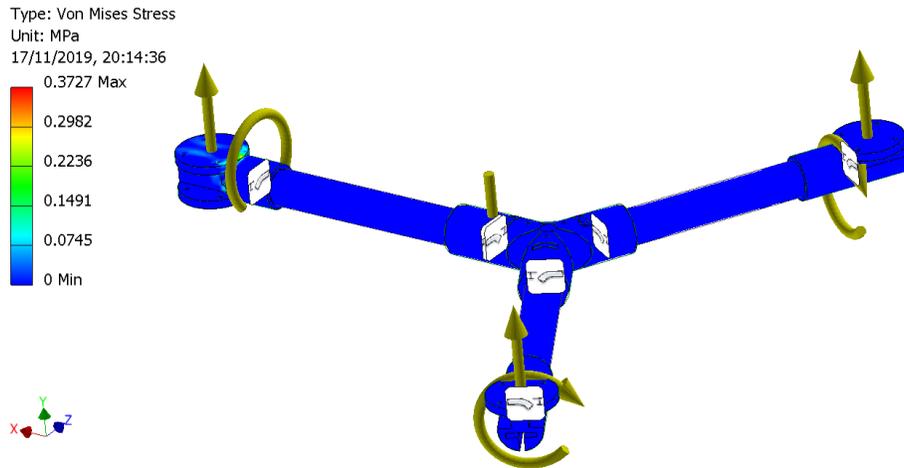


Figura 40: Simulación de esfuerzos de Von Mises con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron

de los motores, como se observa en la Figura 45a para el brazo delantero y en la Figura 45b para el brazo trasero.

**Deflexiones generadas por fuerzas de pesos para simular fuerzas de empuje:**  
 Asumiendo que el dron poseía un peso de 1200 gramos o 2.65 libras, al dividirse esta cantidad entre el número de motores se obtenía que cada motor debería tener una capacidad de levantar 300 gramos (0.66 libras) como mínimo, o 600 gramos (1.32 libras) para duplicar la fuerza de empuje requerida y poder elevar el dron.

Para esta prueba se colocaron pesos de 2.5 libras y 5 libras en el brazo delantero y trasero, para poder obtener resultados sobreestimados, dejándose en voladizo el lado donde se colocaba el peso y pivotado el otro. Con esto se examinó mediante Tracker que tan resistentes a deflexión eran los brazos al aplicar dichas fuerzas y además se analizó si el área de la conexión entre los brazos y la unión Y era lo suficientemente resistente para no fallar por corte a flexión.

Al realizar el análisis para el brazo delantero tanto para el peso de 2.5 libras y 5 libras, no se presentó ninguna deflexión y el área de su conexión con la unión Y no presentó ninguna falla, como se puede ver en la Figura 46a para el peso de 2.5 libras y en la Figura 46b para el peso de 5 libras.

Para el análisis del brazo trasero al igual que el brazo delantero no presentó ninguna deflexión ni ninguna falla en su conexión con la unión Y, como se puede ver en la Figura 47a para el peso de 2.5 libras y en la Figura 47b para el peso de 5 libras.

#### 7.6.4. Aprobación del modelo según análisis de deflexión del prototipo físico

Según los resultados presentados anteriormente para la estructura física, se puede determinar que el modelo de la estructura es lo suficientemente resistente a flexión para no fallar

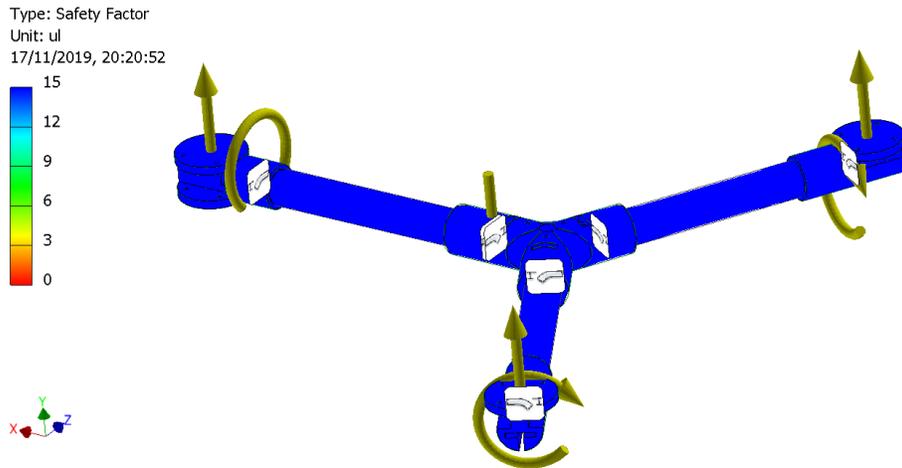


Figura 41: Simulación de factor de seguridad con fuerza de empuje necesaria para elevar el dron

por corte a flexión en las uniones de los brazos con la base y además para que los brazos no fallen por corte a flexión. Ya que en el análisis realizado no se generó ninguna deflexión, aun realizando una sobreestimación para las fuerzas de empuje. Por lo cual este modelo es apto para realizar pruebas de vuelo, teniendo la seguridad que no fallará por corte a flexión durante su funcionamiento.

## 7.7. Validación Modelo 4 mediante prueba de vuelo

Para poder realizar las pruebas de vuelo de este modelo se implementó un controlador de vuelo, el cual fue un Arducopter versión 2.8. Este sirvió para poder controlar las velocidades de los motores por medio de mandos inalámbricos, para esto se utilizó un transmisor T8FB el cual es un control remoto y un receptor R8EF, los cuales se explican en la sección *Componentes utilizados para modelo 4*.

Para poder realizar las pruebas de vuelo se utilizó una fuente de voltaje de 500 Watts para alimentar el dron, esto para no perder tiempo en cargar la batería utilizada para la prueba de vuelo del Modelo 3 del Dron, ya que esta servía para realizar pruebas durante un minuto aproximadamente y su tiempo de carga era de casi 1 hora. Con lo cual con la fuente de voltaje no se poseía restricción en el tiempo para hacer las pruebas.

El receptor se configuró para que las señales enviadas al Arducopter fueran señales PWM, con lo cual se mandó una señal para cada uno de los ángulos de giro Roll, Pitch y Yaw, y una para la aceleración de los motores. Para realizar la conexión con el Arducopter se conectaron las señales del receptor como se muestra en el Cuadro [12](#)

El Arducopter fue configurado por medio del Software Mission Planner. Se configuró para que funcionara como un hexacóptero en configuración Y6A, ya que no se poseía una configuración Y4 en el Software. Para poder obtener el funcionamiento del dron en configuración Y4 se conectaron los controladores de velocidad de los motores como se muestra en

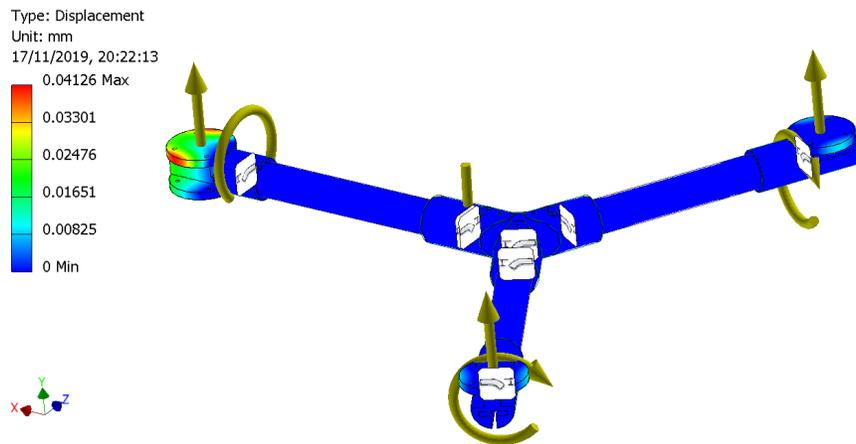


Figura 42: Simulación de deflexión con fuerza de empuje sobreestimada

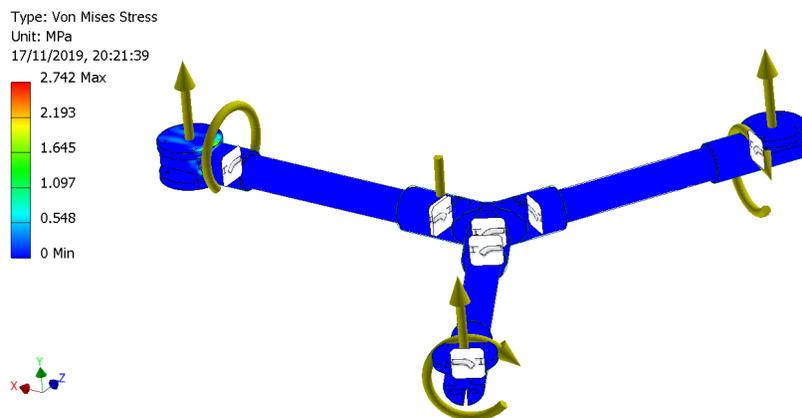


Figura 43: Simulación de esfuerzos de Von Mises con fuerza de empuje sobreestimada

el Cuadro [13](#).

Se fabricó la estructura de este modelo como se muestra en la Figura [120](#), obteniéndose un peso de 270 gramos para la estructura y un peso total de 760 gramos para el dron, utilizándose los componentes de la sección de *Componentes utilizados para modelo 4*, por lo que cada motor debe tener la capacidad de generar una fuerza de empuje para elevar 380 gramos. Esta estructura cumplió con el requerimiento de ser resistente a flexión como se muestra en las pruebas realizadas anteriormente, con lo cual se aprobó esta estructura para poder realizar la última prueba de validación la cual es la prueba de vuelo.

Respecto las conexiones de los controladores de velocidad con los motores fueron igual a las utilizadas en el Modelo 3 de la estructura del dron, las cuales se pueden ver en la Figura [32a](#) y en la Figura [32b](#). Las hélices también fueron conectadas en la misma configuración utilizada.

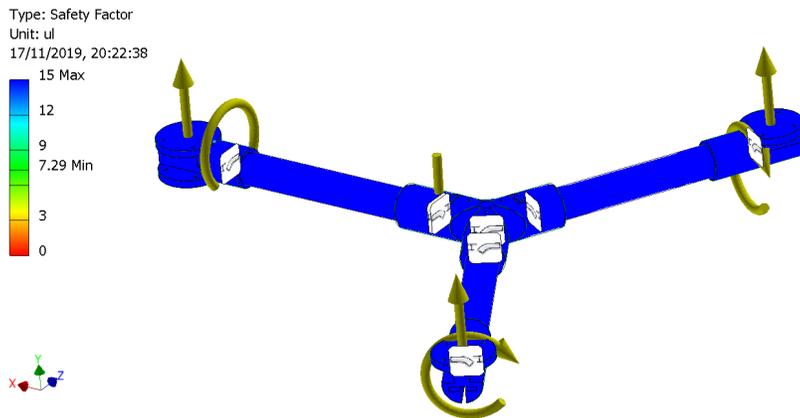


Figura 44: Simulación de factor de seguridad con fuerza de empuje necesaria sobreestimada

Señal de receptor	Entrada del Arducopter
Roll/Aileron (CH1)	1
Pitch/Elevator (CH2)	2
Throttle (CH3)	3
Yaw/Rudder (CH4)	4

Cuadro 12: Conexión de receptor con Arducopter

### 7.7.1. Componentes utilizados para el Modelo 4

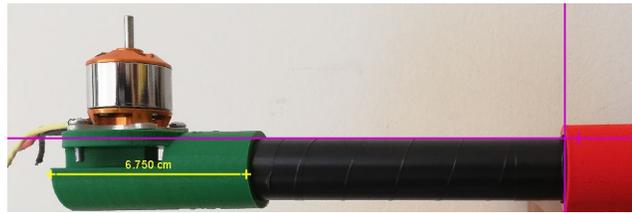
Para este modelo se decidió cambiar los componentes utilizados en el Modelo 3, además se implementó un controlador de vuelo, un control remoto y un receptor, siendo los componentes utilizados los siguientes:

**Motor Brushless:** En este modelo se decidió utilizar motores de menor revoluciones por voltio, para poder obtener un mayor torque y poder verificar si el dron es capaz de elevarse. Además, se utilizaron motores del mismo tamaño que los utilizados anteriormente, los cuales se denominan como 2212, y se utilizaron 2 motores en sentido de las manecillas del reloj y 2 en contra de las manecillas de reloj, distinguiéndose uno del otro en la forma de su rosca para asegurar la hélice, ya que esta gira en sentido del giro del motor para apretarse. Las características de los motores utilizados se muestran en el Cuadro [14](#).

**Controlador de velocidad:** Se utilizaron 4 controladores de velocidad, mostrándose sus características en el Cuadro [15](#).

**Hélices:** Se utilizaron 2 hélices en sentido horario y 2 en sentido antihorario, colocándose en los motores de su mismo giro. Estas poseen características similares a las utilizadas en el modelo 3 del dron, pero poseen forma diferente en su agujero para poderse colocar en los motores. Las características de las hélices utilizadas se muestran en el Cuadro [16](#).

**Controlador de vuelo (Arducopter):** Para el controlador de vuelo se utilizó un Arducopter versión 2.8. Mostrándose sus características en el Cuadro [17](#) además en el Marco



(a) Brazo delantero

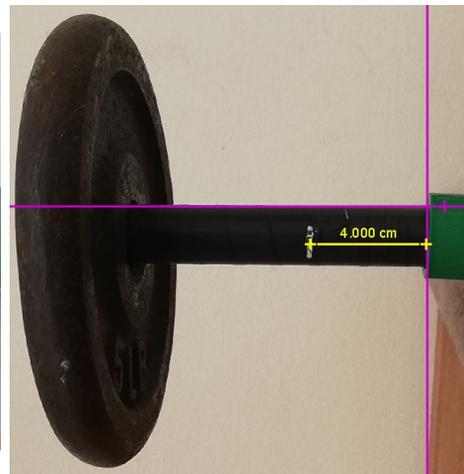


(b) Brazo trasero

Figura 45: Análisis de deflexión de fuerzas generadas por peso de motores



(a) Análisis con 2.5 libras



(b) Análisis con 5 libras

Figura 46: Análisis de deflexión de fuerzas de pesos para simular fuerza de empuje en brazo delantero

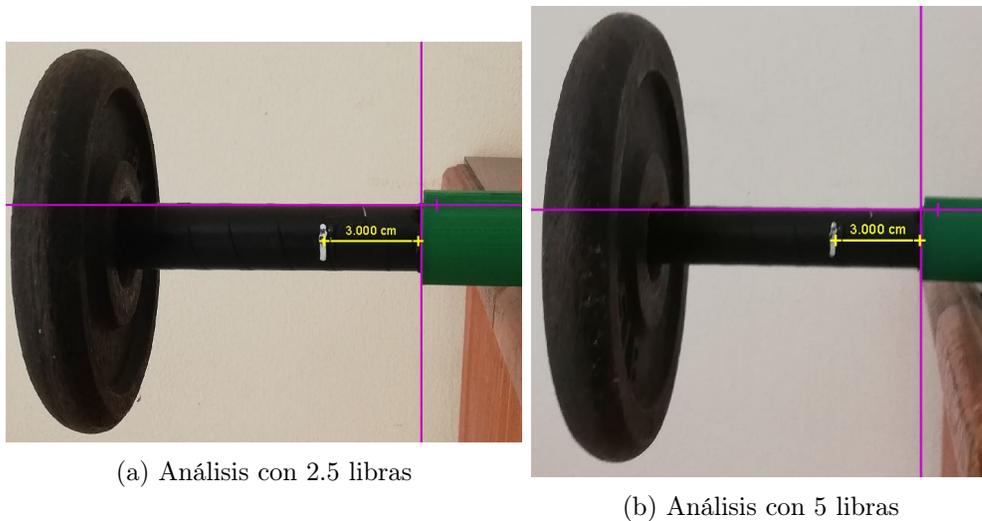


Figura 47: Análisis de deflexión de fuerzas de pesos para simular fuerza de empuje en brazo trasero

Controlador de velocidad (ESC)	Salida del Arducopter
Frontal izquierdo	2
Frontal derecho	1
Trasero superior	4
Trasero inferior	6

Cuadro 13: Conexión de controladores de velocidad con Arducopter

Teórico se explica un poco sobre el Arducopter.

**Transmisor:** Para el transmisor se utilizó un control remoto de la marca RadioLink modelo T8FB, mostrándose sus características en el Cuadro [18](#).

**Receptor:** El receptor utilizado fue de la marca RadioLink model R8EF, mostrándose sus características en el Cuadro [19](#).

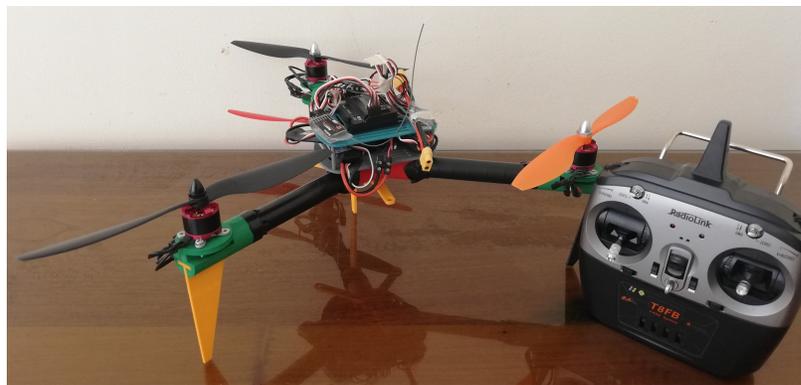
**Módulo regulador de voltaje:** Se utilizó un módulo regulador de voltaje para poder tener seguridad del voltaje suministrado al Arducopter, y poder tener un voltaje estable. Con esto se aseguró el Arducopter de posibles picos de voltaje generados por la fuente de voltaje. Las características del módulo utilizado se muestran en el Cuadro [20](#).

## 7.7.2. Prueba de vuelo realizada

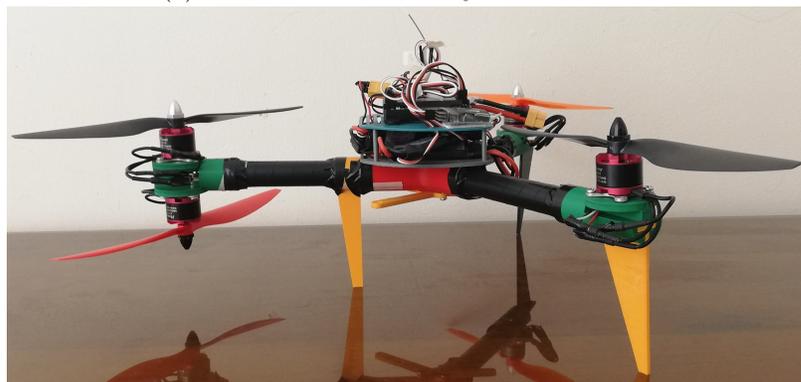
### Prueba de elevación

Para realizar la prueba de elevación de manera segura se utilizó el Modelo 2 de la plataforma de pruebas de vuelo, el cual se explica en el Capítulo *Diseño y Fabricación de Plataforma para Pruebas de Vuelo*.

Con esto se controló el dron construido por medio del control remoto para poder verificar



(a) Vista frontal del dron y control remoto



(b) Vista lateral

Figura 48: Modelo 4 estructura de dron

si este era capaz de elevarse. Se mandaron señales incrementando la aceleración del giro de los motores y realizando inclinaciones en sus ángulos de movimiento, pero el dron no fue capaz de elevarse, pero si presentó elevación únicamente en su lado frontal o trasero al realizar las inclinaciones en pitch.

Posteriormente se prosiguió a probar si el dron era capaz de mantenerse estático en el aire, utilizando la misma plataforma de pruebas. Para esto se elevó el dron con la mano y se soltó para poder verificar si era capaz de mantenerse en el aire, para esto se incrementó la aceleración de giro de los motores para verificar en que rango se mantenía estático, pero no fue capaz de mantenerse en el aire inclusive en la máxima capacidad de giro de los motores. Luego se probó elevarlo y realizar giros en sus ángulos de movimiento para verificar si inclinado era capaz de mantenerse en el aire, al realizar esto se logró mantenerlo estático en el aire, pero para esto debía estar inclinado en Pitch como se muestra en la Figura 50.

Para poder analizar que estaba pasando se utilizó una IMU GY-521 para registrar los ángulos de giro Roll-Pitch-Yaw del dron durante la prueba y poderlos graficar. Con esto se elevó el dron en la plataforma y se soltó, realizando la inclinación en Pitch de la Figura 50, para poder mantenerlo estático en el aire. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 49 y en Anexos se muestran más iteraciones de esta prueba en la Sección *Iteraciones de Pruebas de Elevación en Modelo 2 de Plataforma de Pruebas de Vuelo*. Con lo cual en las gráficas en las secciones donde se muestra el pitch cerca de  $-30^\circ$  es cuando el dron estaba

Marca	Hobbypower
Modelo	2212-KV920
Tamaño	2212
RPM/V	920 kV
Diámetro externo	28 mm
Altura	24 mm
Conector	3.5 mm bala
Peso	55 gramos

Cuadro 14: Datos motor 2212-KV920. [28](#)

Marca	Hobbypower
Modelo	Simonk 30A
Corriente salida	30 A
Corriente de salida máxima	35 A
Voltaje de entrada	2-4S lipo / 4-12 cell Ni-MH/Ni-Cd
Voltaje de salida en BEC	5 V
Corriente de salida en BEC	2 A
Peso	22 gramos
Tamaño	55x26x8mm

Cuadro 15: Datos ESC Simonk 30A. [29](#)

estático en el aire, por lo tanto, para poder mantener el dron elevado en una posición fija el pitch debe estar aproximadamente en  $-30^\circ$ , presentándose pequeños movimientos en Roll y Yaw.

### Prueba de orientación (Roll-Pitch-Yaw)

Para poder verificar el funcionamiento del dron construido en los ángulos Roll-Pitch-Yaw, se utilizó se utilizó el Modelo 3 de la plataforma de pruebas de vuelo, el cual se explica en el Capítulo *Diseño y Fabricación de Plataforma para Pruebas de Vuelo*.

La prueba consistió en verificar el funcionamiento del dron al inclinarlo en Pitch (eje X), en Roll (eje Y) y al realizar movimientos en Yaw (eje Z). Para esto se utilizó un contrapeso en 299 gramos en la parte frontal del dron, para poder simular la batería y poder colocar en su punto de equilibrio el dron en la plataforma como se muestra en la Figura [54](#), para que esta posición fuera la posición inicial en la prueba.

Para la prueba se mandaron señales al Arducopter por medio del control remoto y al igual que en la prueba de elevación se utilizó una IMU GY-521 para registrar los ángulos de giro Roll-Pitch-Yaw y poderlos graficar. Registrando los siguientes resultados:

**Prueba de Pitch:** En esta se mandaron señales para inclinar el dron hacia adelante y hacia atrás, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura [51](#) y en Anexos se muestran más iteraciones de esta prueba en la Sección *Iteraciones de Pruebas de Inclinación en Pitch en Modelo 3 de Plataforma de Pruebas de Vuelo*. Observándose en las figuras que se si se realizaban las oscilaciones en Pitch correspondientes al giro hacia adelante y hacia atrás (oscilaciones en el eje Y positivo y negativo), pero a la hora de realizarlo no se poseía una

Marca	GEMFAN
Modelo	1045
Material	ABS
Diámetro de eje	6 mm
Largo	24.5 cm
Motores recomendados	800-1100 kV
Peso	8 gramos

Cuadro 16: Datos hélice GEMFAN. [30]

Marca	Arducopter
Versión	2.8
Sensores	1 giroscopio de 3 ejes, 1 acelerómetro, 1 magnetómetro, 1 barómetro
Componentes externos compatibles	GPS, uBlox LEA-6H con brújula
Dimensiones	70.5x45x13.5mm
Peso	31 gramos
Voltaje de alimentación	5 V

Cuadro 17: Datos Arducopter. [31]

estabilidad en el dron, es decir se realizaban giros en Roll y en Yaw como se puede apreciar en las Figuras, lo cual se esperaba que no se realizaran giros en estos ángulos inclinación, sino únicamente en Pitch.

**Prueba de Roll:** Al igual que la prueba anterior se mandaron señales pero en este caso se deseó inclinar el dron hacia el lado derecho e izquierdo, mostrándose los resultados obtenidos en la Figura [52] y en Anexos se muestran más iteraciones de esta prueba en la Sección *Iteraciones de Pruebas de Inclinación en Roll en Modelo 3 de Plataforma de Pruebas de Vuelo*. Apreciándose en las Figuras que si se realizaban las oscilaciones correspondientes al giro hacia la derecha e izquierda (oscilaciones en el eje Y positivo y negativo). Pero se poseían oscilaciones en Pitch y Yaw, con lo cual en condiciones ideales estas no deben presentar variaciones.

**Prueba de Yaw:** Esta fue la última prueba realizada, se mandaron señales al igual que las anteriores, pero en este caso se deseaba hacer girar el dron en el eje Z a favor de las agujas del reloj y en contra. Obteniéndose los resultados mostrados en la Figura [53] y en Anexos se muestran más iteraciones de esta prueba en la Sección *Iteraciones de Pruebas de Giro (Yaw) en Modelo 3 de Plataforma de Pruebas de Vuelo*. Apreciándose en las Figuras que si se obtuvieron las oscilaciones correspondientes al giro a favor y en contra de las manecillas del reloj (oscilaciones en el eje Y positivo y negativo), pero a diferencia de las pruebas en Pitch y Roll en esta se obtuvo mayor inestabilidad durante el funcionamiento, presentando oscilaciones considerables en Pitch y Roll, con lo que en un funcionamiento adecuado del dron no se deberían de presentar estas. Esto pudo haber sido debido que al inclinarse el dron se salía de su punto de equilibrio, el cual era su condición inicial, y durante el funcionamiento no se podía volver a esta, debido que no se presentaba una buena estabilidad.

Marca	RadioLink
Modelo	T8FB
Número de canales	8
Corriente de operación	80 mA
Distancia de control	500 m (en Tierra), 1000 m (en Aire)
Frecuencia	2.4 GHz banda ISM

Cuadro 18: Control remoto. [32]

Marca	RadioLink
Modelo	R8EF
Número de canales	8
Frecuencia	2.4 GHz
Señales soportadas de salida	S-BUS, PPM, PWM
Voltaje de entrada	4.8 - 10 V
Corriente de operación	30 mA (Voltaje de entrada 5V)
Tamaño	48.5x21x11 mm
Peso	7 gramos
Distancia de control	2000 m en el aire

Cuadro 19: Receptor. [33]

### 7.7.3. Aprobación del modelo según prueba de vuelo

Según los resultados de las pruebas de orientación obtenidas se determinó que el dron posee inestabilidad durante su funcionamiento, además una vez que sale de su punto de equilibrio no es posible volver a este y poder estabilizar el dron. Esto se pudo haber debido a la forma de la estructura ya que su centro de gravedad no se encontraba en el centro de la estructura, sino que se encontraba desfasado hacia la parte frontal como se puede ver en la Figura [54], además se utilizó un contrapeso para simular el peso de una batería y poder equilibrar el dron. Por lo que antes de descartar este modelo se debe analizar con que variables del control PID utilizado durante la configuración del Arducopter se logra obtener un funcionamiento más estable, lo cual se realizará como siguiente fase del proyecto. El control utilizado para las pruebas de vuelo fue para poder controlar las velocidades de los motores, según las señales recibidas del control remoto y realizar de la manera más estable posible las inclinaciones en pitch, roll y yaw y el control de las aceleraciones de los motores para poder elevar o bajar la altura de vuelo del dron. De no ser posible lograr un control adecuado del dron se debe analizar que modificaciones realizar a la estructura del dron utilizada, pero utilizando el mismo diseño como base ya que este cumple con el requerimiento de ser resistente a flexión.

Respecto la prueba de elevación, el dron no fue capaz de elevarse por si solo, sino que únicamente fue capaz de mantenerse estático en el aire al ser levantado de manera manual. Esto pudo haber sido por la capacidad de los motores, por lo que se recomienda probar con

Nombre	APM Power Module
Tipo de conectores	XT60
Máximo voltaje de entrada	30 V
Máxima corriente de entrada	90 A
Voltaje de salida	5.3 V
Corriente de salida	3 A
Tamaño	25x21x9 mm
Peso	25 gramos

Cuadro 20: Módulo de voltaje. 34

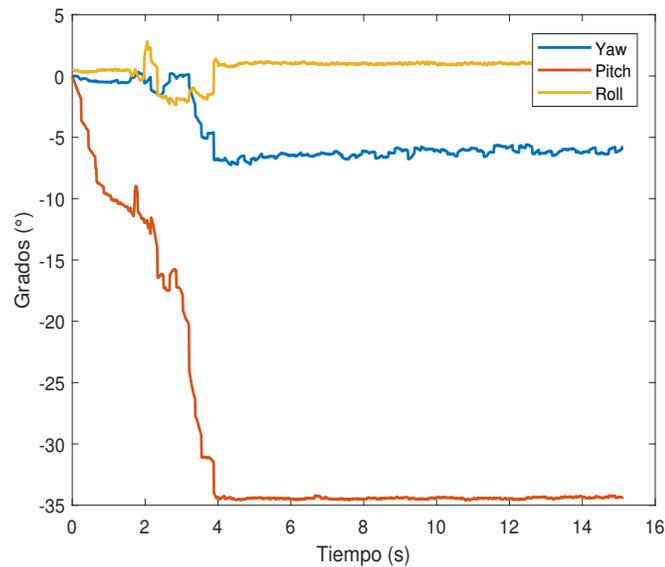


Figura 49: Prueba de elevación

motores de menor revolución por voltio para poseer un mayor torque o cambiar a motores de mayor revolución por voltio y reducir el tamaño de las hélices, ya que por la fricción generada por el aire al utilizar hélices grandes en motores con revoluciones por voltio altas debido a que no poseen mucho torque se pueden sobrecargar y quemar. Otro punto por el que no se pudo haber elevado el dron es por la forma de sus motores traseros, ya que no se generaba la misma fuerza de empuje que en los motores delanteros, sino que era menor. Por lo que se puede probar a cambiar únicamente los motores traseros por unos que generen mayor fuerza de empuje y verificar si el dron es capaz de elevarse, ya que la estructura del dron creada es lo suficientemente liviana para poderse haber elevado con los motores utilizados. O se puede cambiar la forma del brazo trasero como el utilizado en el Modelo 3 de la Estructura del dron, en donde los motores no son puestos de manera colineal, por lo que su funcionamiento no puede ser afectado por un motor superior o inferior colocado de manera colineal. Si se decide realizar este cambio en la estructura del dron se debe volver a realizar el análisis de deflexión en el brazo trasero, para poder verificar que cumpla con el requerimiento de no presentar una deflexión considerable.

Según lo planteado anteriormente la estructura utilizada en este modelo no puede ser

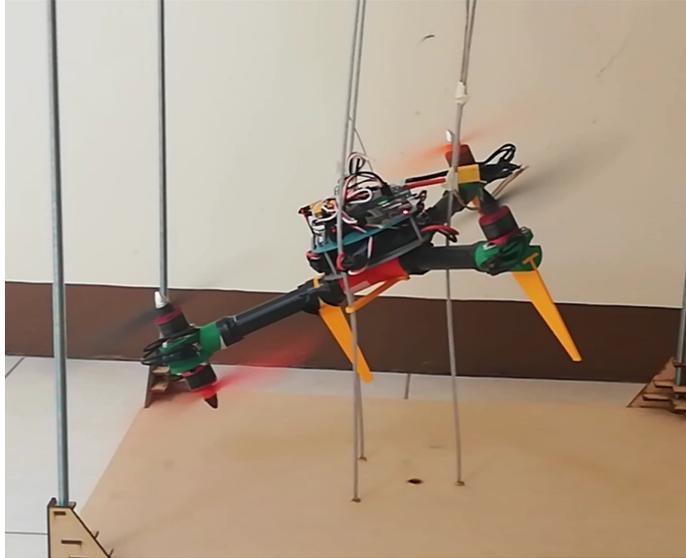


Figura 50: Modelo 4 de dron en prueba de elevación

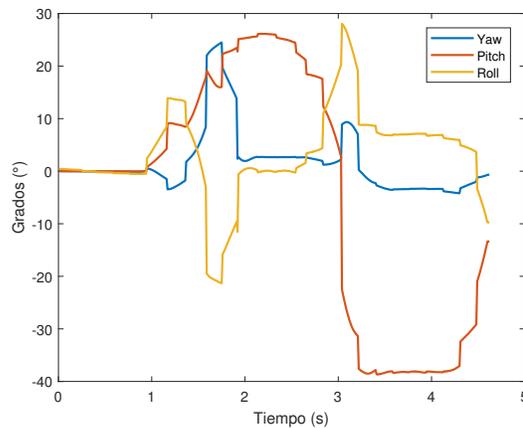


Figura 51: Prueba inclinación en Pitch

descartada aun, hasta que se realicen las pruebas o modificaciones mencionadas, de no funcionar estas se puede recurrir a descartar el modelo y analizar que cambios son necesarios realizar para poder lograr que el dron se pueda elevar y funcionar de manera estable durante su vuelo.

## 7.8. Modelo 5

Este modelo se diseñó con el fin que fuera más liviano que el Modelo 4. Además, se buscó que las uniones de los brazos con el cuerpo fueran más rígidas que las del modelo anterior, ya que estas tendían a girar un poco durante su funcionamiento. Como también se realizó este diseño con el propósito de que tuviera una mejor respuesta durante las pruebas de vuelo.

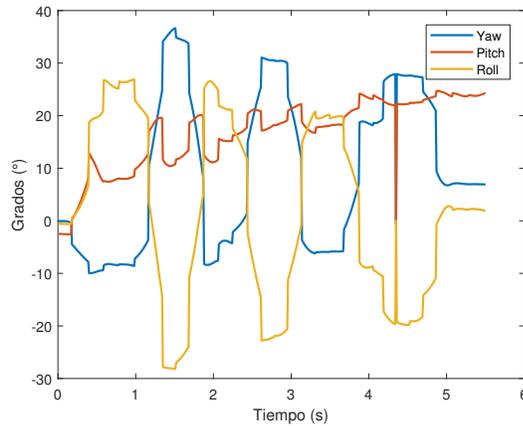


Figura 52: Prueba inclinación en Roll

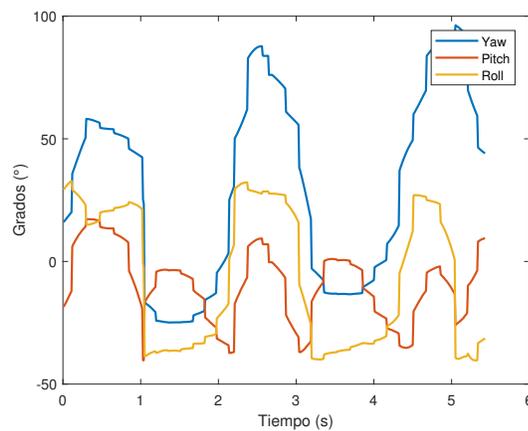


Figura 53: Prueba inclinación en YAW

Se decidió diseñar la estructura para que pudiera ser maquinada mediante impresión 3d, utilizando como material principal el filamento de ácido poliláctico o como se conoce comúnmente PLA, debido a que es un material liviano. Para los brazos se decidió utilizar tubo de aluminio de 3/8 de pulgada de diámetro exterior y 0.05 pulgadas de espesor.

El diseño de las bases de los motores y de los soportes de la estructura se basó en mordazas, para pudieran ser sujetadas a los brazos de forma segura. Para realizar la unión de las bases de los motores se decidió utilizar tornillos de 1/8 de pulgada de diámetro y de 1 pulgada de largo. El diseño de las bases de los motores se puede ver en la Figura 55. Y para la unión de los soportes se diseñó para que se realizara con tornillos de 1/8 de pulgada y 1/2 pulgada de largo. Estos se pueden apreciar en la Figura 56, los cuales poseen color amarillo.

Se diseñó una Y para unir los brazos de la estructura y poseer rigidez y estabilidad en la unión, esta se basó en la Y creada para el modelo 4, solo que fue menos gruesa debido a los brazos utilizados. Además, se realizaron agujeros en la Y para poder ajustar los brazos con tornillos Allen sin cabeza de 5 milímetros de diámetro. En la Figura 57 se muestra la Y



(a) Vista lateral

(b) Vista superior

Figura 54: Modelo 4 de dron en equilibrio en Modelo 3 de plataforma de pruebas

creada.

Para sostener los componentes que forman parte del dron se utilizó la misma base diseñada para el Modelo 4, la cual estaba compuesta por 2 partes, una inferior para ser unida a la Y mediante tornillos de 1/8 de pulgada y una parte superior para unirse a la inferior por ajuste con apriete. Esta se puede apreciar de color aqua en la Figura 56.

La estructura diseñada se puede ver en la 56. Los planos de este modelo se encuentran en la subsección *Planos de Estructura de Dron Modelo 4* de la sección *Planos de Construcción de Anexos*.

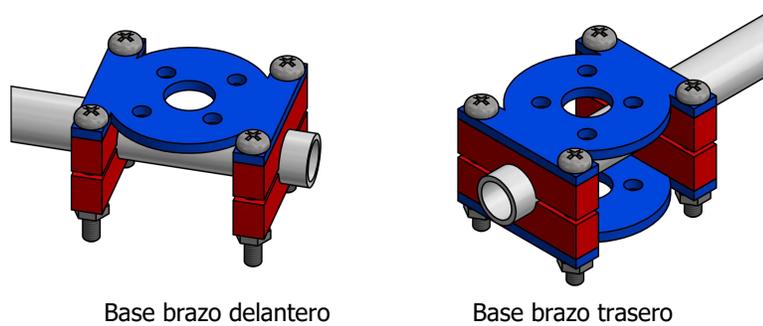


Figura 55: Diseño de las bases estructura de dron Modelo 5

### 7.8.1. Validación mediante análisis en Inventor

Como en el diseño de la estructura del Modelo 4, en este modelo se realizó también un análisis en Autodesk Inventor previamente a construirlo, esto para poder realizar una

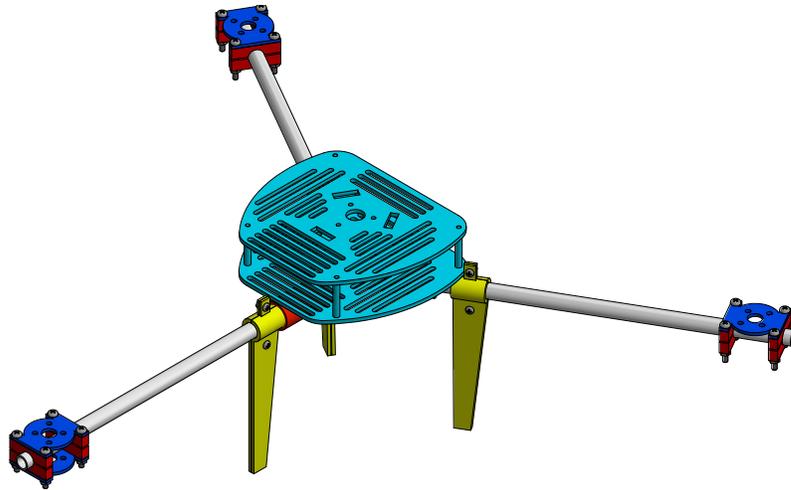


Figura 56: Diseño de estructura de dron Modelo 5



Figura 57: Diseño de unión en forma de Y de estructura de dron Modelo 5

estimación si la estructura sería resistente a flexión.

Como se mencionó en el análisis del Modelo 4 para el análisis en Inventor se utilizó la herramienta Stress Analysis, donde fue necesario declarar los materiales de cada uno de los componentes de la estructura, en la versión de Inventor utilizada no se poseía PLA como material para análisis, y al igual que el análisis realizado para el Modelo 4 se utilizó ABS para cada una de las piezas maquinas mediante impresión 3d, sabiendo que el PLA posee propiedades mecánicas mayores a las del ABS, con lo cual los esfuerzos y deexiones en la simulación serán mayores que las de la estructura física en el caso que esta se maquine con PLA. Por lo tanto, si en la simulación no se obtienen resultados adecuados usando ABS no se recomienda la fabricación de la estructura física tanto en ABS como el PLA pues la estructura poseerá mayores posibilidades a fallar. Y para los brazos se utilizó aluminio en la simulación.

Para este análisis no se realizó el análisis de las deflexiones provocadas por las fuerzas de los motores, sino que se realizó el análisis para las fuerzas de empuje necesarias para elevar el dron y otra usando fuerzas de empuje sobrestimadas. Con lo cual si la estructura resiste estas fuerzas resistirá las fuerzas de los pesos de los motores.

Para el análisis se jaron los brazos a las bases de los motores y a la unión Y de la estructura, y se colocaron fuerzas en los extremos de los brazos y torques, al igual que el análisis para el Modelo 4. En la Figura 58 se muestra un bosquejo del análisis realizado.

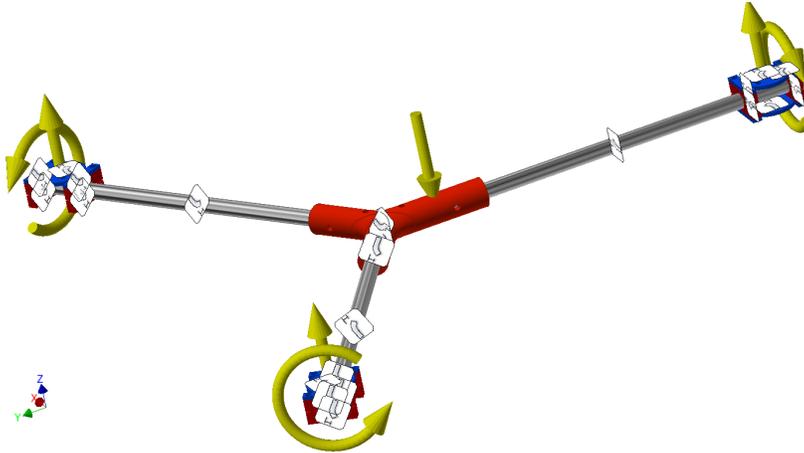


Figura 58: Análisis de esfuerzos del Modelo 5 de la estructura del dron

**Simulación de fuerzas de empuje necesarias para elevar el dron:** Esta simulación se realizó de la misma manera que la realizada para el Modelo 4, con lo cual se analizó el comportamiento de la estructura a las fuerzas de empuje necesarias para poder elevar el dron y a las fuerza generada por el peso del mismo. También se realizó una sobrestimación para el peso del dron, con lo cual se asumió un peso de 1.2 kg para el dron y debido que se poseen 4 motores cada motor debe generar una fuerza de empuje para elevar 0.3 kg, con lo cual estimando que se debe generar el doble para poder elevar el dron lo cual es 0.6 kg se genera una fuerza de 6 N aproximadamente por cada motor. Con esto se colocaron fuerzas de 6 N en los extremos de los brazos frontales y 12 N en el extremo de brazo trasero debido que posee 2 motores. Se colocaron torques en los extremos de los brazos para simular el caso en el que los motores giren los brazos durante su funcionamiento, colocándose un torque de 1.23 Nm en los brazos delanteros y 2.82 Nm en el brazo trasero. Mostrándose los resultados mediante una escala de colores, siendo en cada caso el valor mínimo el color azul y el máximo el rojo. Obteniéndose las deflexiones presentadas en la Figura 59 para el brazo delantero y en la Figura 60 para el trasero, siendo estas cercanas a cero. Los esfuerzos de Von Mises obtenidos se muestran en la Figura 61 para el brazo delantero y en la Figura 62 para el trasero, los cuales también son casi cero. Por último, el factor de seguridad se muestra en la Figura 63 para el brazo trasero y en la Figura 64 para el trasero, determinándose también con esta simulación que se pose una estructura robusta.

**Simulación de fuerzas de empuje sobrestimadas:** Este análisis es igual al realizado para las fuerzas de empuje necesarias para elevar el dron, pero se cambiaron las fuerzas utilizadas por unas de 44.5 N en los brazos delanteros y 89 N en el brazo trasero, lo cual es equivalente a un peso de 10 lb y 20 lb, y para los torques se utilizó 9.23 Nm para los

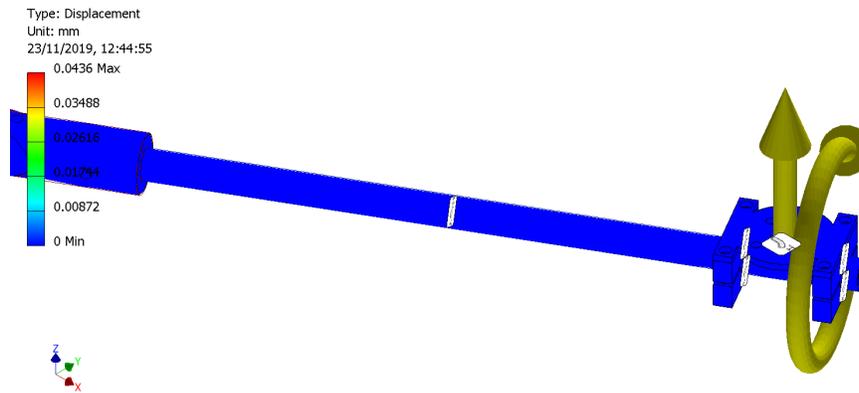


Figura 59: Simulación brazo delantero Modelo 5 deflexión de fuerzas de empuje para elevar el dron

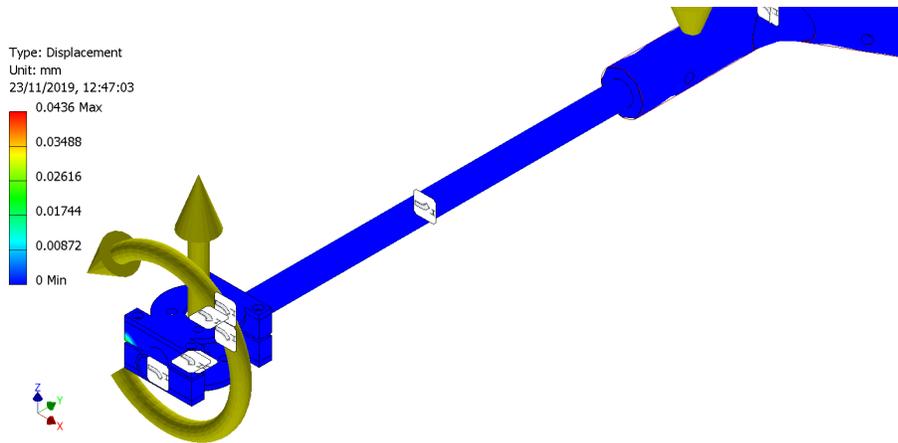


Figura 60: Simulación brazo trasero Modelo 5 deflexión de fuerzas de empuje para elevar el dron

brazos delanteros y 20.92 Nm para el brazo trasero. Esto se realizó para poder tener una sobrestimación de la resistencia de la estructura y poder tener mayor seguridad a la hora de construir la estructura física. Al igual que los resultados de las simulaciones anteriores la deflexión y los esfuerzos de Von Mises fueron relativamente despreciables, mostrándose en la Figura 42 y Figura 42 la deformación presentada en el brazo delantero y en trasero, en la Figura 43 y Figura 43 los esfuerzos Von Mises obtenidos en ambos brazos. Respecto el factor de seguridad se obtuvo el mismo del análisis anterior como se muestra en la Figura 44 y Figura 44, pudiéndose estimar con esta simulación y la anterior que se posee una estructura robusta.

### 7.8.2. Aprobación del modelo según análisis en Inventor

Se puede decir que la estructura cumple el requisito de ser resistente a fuerzas de flexión y torsión generadas por los motores, además se puede decir que se pueden generar variaciones en los resultados de la estructura física, debido a las propiedades mecánicas de los materiales utilizados, ya que pueden variar según el fabricante o la marca que se compre.

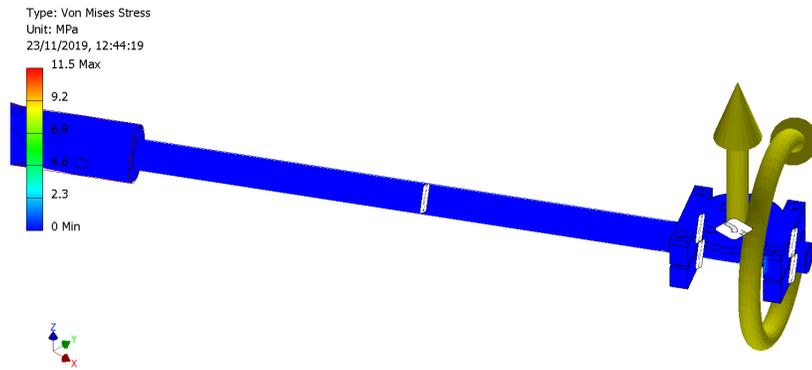


Figura 61: Simulación de esfuerzos de Von Mises brazo delantero con fuerzas para elevar el dron

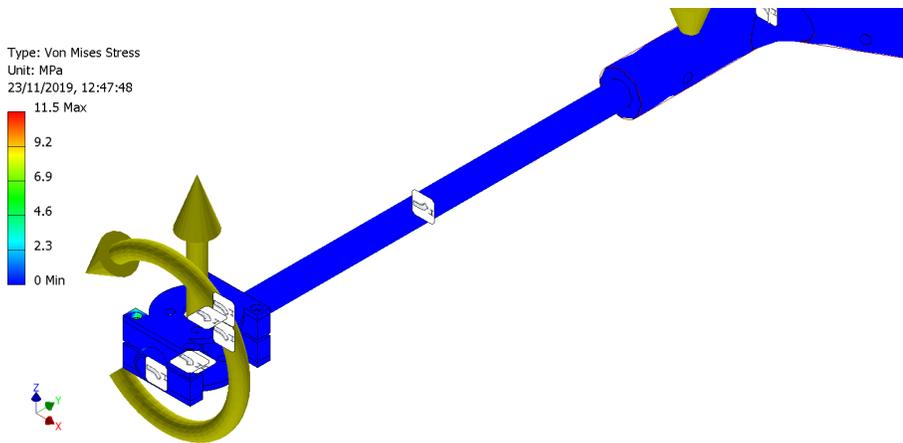


Figura 62: Simulación de esfuerzos de Von Mises en el brazo trasero con fuerzas para elevar el dron

### 7.8.3. Validación mediante análisis de deflexión del prototipo físico

El análisis de resistencia a deflexión se realizó en un brazo delantero y en el trasero de la estructura física. Para este se colocaron pesos en los extremos de los brazos y se analizó la deflexión presentada por cada uno de estos, para este modelo se obvió la prueba de deflexión con los pesos de los motores, ya que si es capaz de resistir pesos mayores como los colocados, será capaz de resistir el peso de los motores, ya que cada motor pesa 56 gramos.

#### **Deflexiones generadas por fuerzas de pesos para simular fuerzas de empuje:**

Asumiendo que el dron posea un peso de 1200 gramos o 2.65 libras, al dividirse esta cantidad entre el número de motores se obtenía que cada motor debería tener una capacidad de levantar 300 gramos (0.66 libras) como mínimo, o 600 gramos (1.32 libras) para duplicar la fuerza de empuje requerida y poder elevar el dron.

Para esta prueba se colocaron pesos de 2.5 libras y 5 libras en el brazo delantero y trasero, dejándose en voladizo el lado donde se colocaba el peso y pivotado el otro. Con esto se examinó mediante Tracker que tan resistentes a deflexión eran los brazos al aplicar dichas fuerzas y además se analizó si el área de la conexión entre los brazos y la unión Y era lo

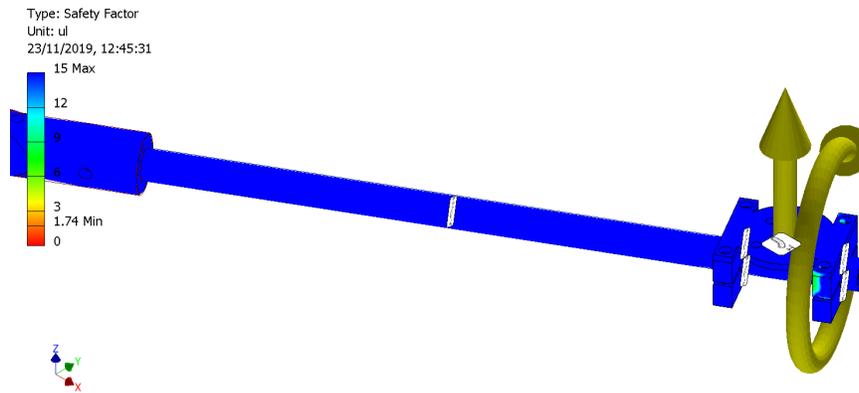


Figura 63: Simulación de factor de seguridad en el brazo delantero con fuerzas para elevar el dron

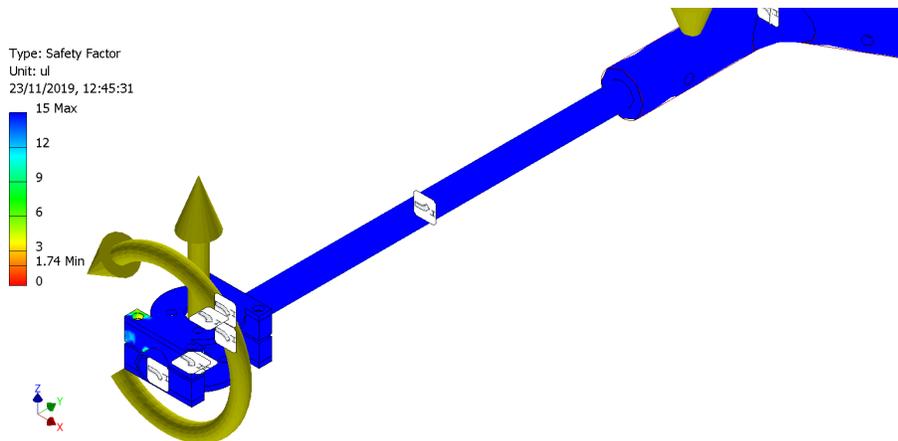


Figura 64: Simulación de factor de seguridad en el brazo trasero con fuerzas para elevar el dron

suficiente resistente para no fallar por corte a exión.

Al realizar el análisis para el brazo delantero tanto para el peso de 2.5 libras y 5 libras, no se presentó ninguna deexión y el área de su conexión con la unión Y no presentó ninguna falla, como se puede ver en la Figura 71a para el peso de 2.5 libras y en la Figura 71b para el peso de 5 libras.

Para el análisis del brazo trasero al igual que el brazo delantero no presentó ninguna deexión ni ninguna falla en su conexión con la unión Y, como se puede ver en la Figura 72a para el peso de 2.5 libras y en la Figura 72b para el peso de 5 libras.

#### 7.8.4. Aprobación del modelo según análisis de deflexión del prototipo físico

Según los resultados obtenidos de las pruebas de deflexión realizados en Tracker en los brazos de la estructura física, se puede decir que esta será resistente a las fuerzas de empuje

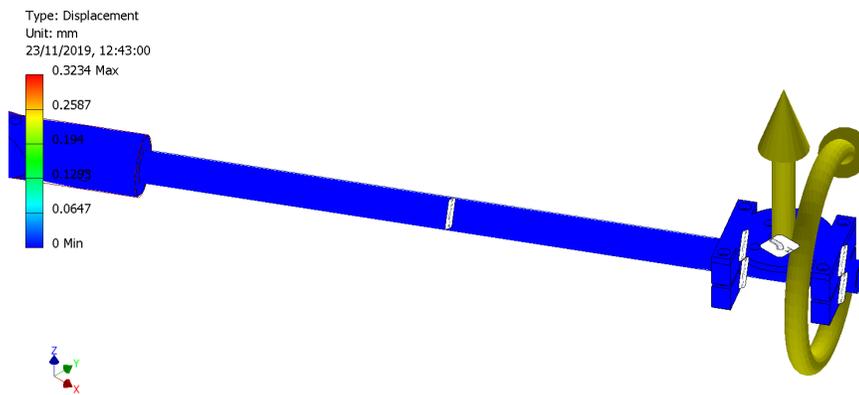


Figura 65: Simulación de deflexión en brazo delantero con fuerzas de empuje sobreestimadas

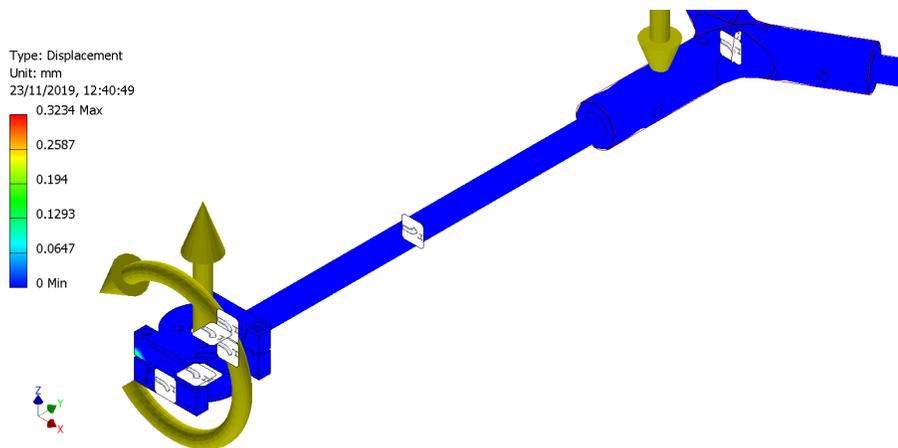


Figura 66: Simulación de deflexión en brazo trasero con fuerzas de empuje sobreestimadas

generadas por los motores y no fallará por corte a flexión, tanto en sus brazos como en las conexiones de sus brazos con la estructura.

## 7.9. Validación Modelo 5 mediante prueba de vuelo

Para poder realizar la validación de este modelo se utilizaron los mismos componentes que se utilizaron para el Modelo 4 de la estructura, los cuales se pueden ver en la subsección *Componentes utilizados para el Modelo 4* de la sección *Validación Modelo 4 Mediante Prueba de Vuelo*. Antes de realizar un cambio en los motores o en las hélices utilizadas, se optó por verificar si la fuente de voltaje era la que no le daba la potencia necesaria al dron para poderse elevar, por lo que se utilizó una batería LiPo de 11.1V con 2200 mAh, para alimentar a los controladores de velocidad y respectivamente a los motores, y también al Arducopter.

Respecto las conexiones de los controladores de velocidad con los motores fueron igual a las utilizadas en el Modelo 3 de la estructura del dron. Las conexiones del receptor con el

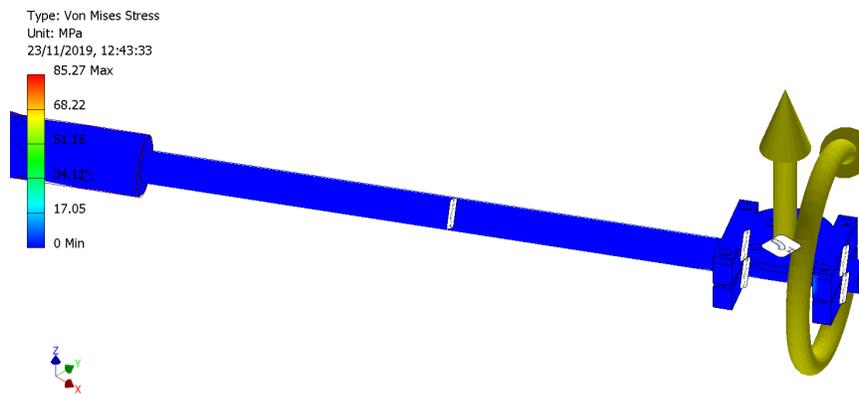


Figura 67: Simulación de esfuerzos de Von Mises en brazo delantero con fuerzas sobreestimadas

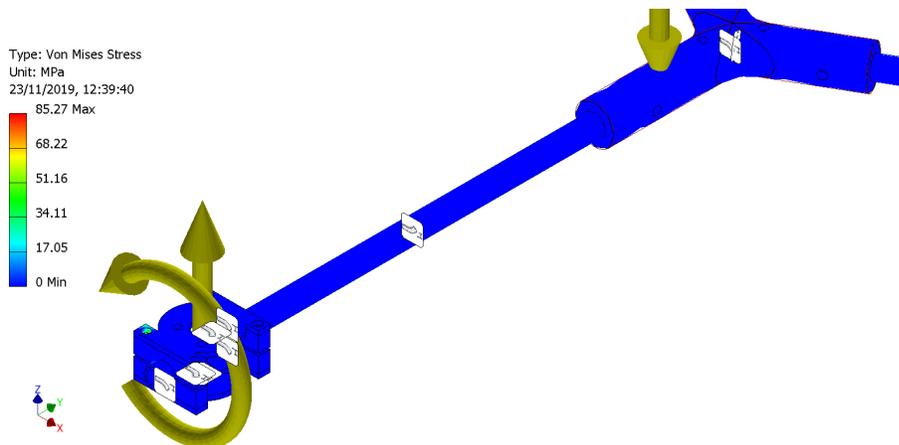


Figura 68: Simulación de esfuerzos de Von Mises en brazo trasero con fuerzas sobreestimadas

Arducopter fueron las mismas utilizadas en el Modelo 4. Y para las conexiones de las salidas del Arducopter con los controladores de velocidad se cambió únicamente las conexiones de los motores traseros, lo cual se puede apreciar en el Cuadro [21](#).

La configuración del Arducopter fue la misma realizada para el Modelo 4, con lo cual se configuró para que funcionara como un hexacóptero en configuración Y6A. La estructura fabricada se puede ver en la Figura [73](#) y en la Figura [74](#), la cual tuvo un peso total de 824 g. Esta tuvo un peso mayor que el Modelo 4, debido que se incorporó una batería, la cual tenía un peso de 184 gramos, siendo el peso de la estructura sin la batería 674 gramos, siendo menor que el del Modelo 4. Los motores utilizados según sus hojas técnicas tienen una capacidad para levantar 1200 gramos, pero con la hélices utilizadas tienen una capacidad de levantar 800 gramos, con lo cual se tiene una capacidad total de 3200 gramos. Teniendo en cuenta que por la configuración utilizada, en la parte trasera se puede generar una fuerza de empuje menor a la estipulada. Siendo la capacidad de los motores 3.8 veces el peso del dron, con lo cual si tendrían que ser capaces de elevarlo.

Otro cambio que se hizo al dron fueron sus conexiones de la alimentación de los controla-

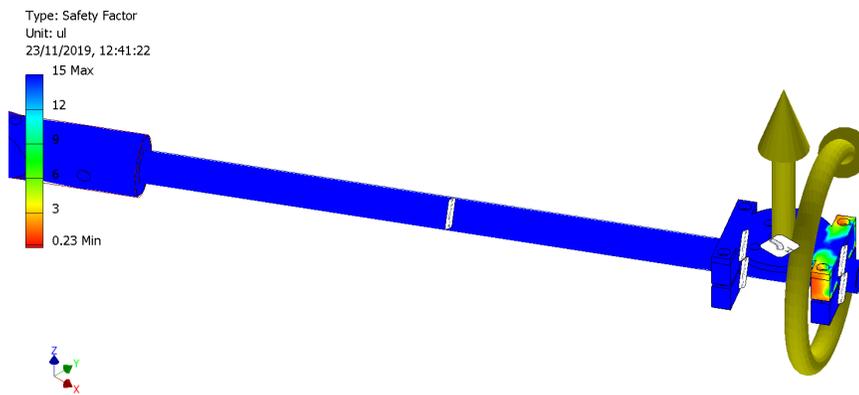


Figura 69: Simulación de factor de seguridad en el brazo delantero con fuerzas sobreestimadas

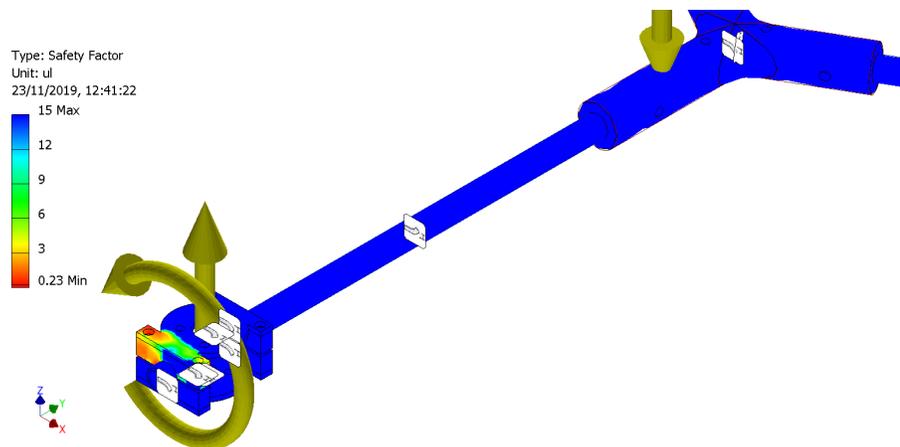


Figura 70: Simulación de factor de seguridad en el brazo trasero con fuerzas sobreestimadas

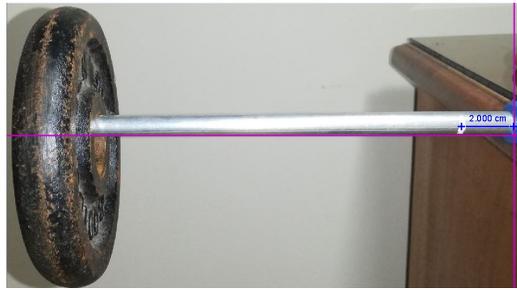
dores de velocidad con voltaje. Con lo cual se utilizó un cable calibre 12 para poder realizar las conexiones a la batería.

### 7.9.1. Prueba de vuelo realizada

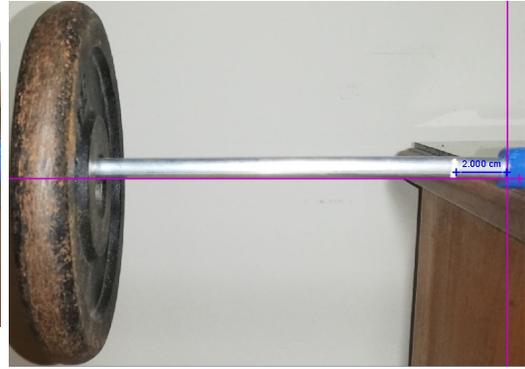
Para la prueba de vuelo se optó por realizarla sin ninguna base de pruebas, con lo cual el objetivo principal era poder verificar si la estructura diseñada si era capaz de elevarse. Como se puede ver en la Figura 75 y en la Figura 76, el dron creado si fue capaz de elevarse, por lo tanto se puede decir que la estructura diseñada es una estructura funcional.

### 7.9.2. Aprobación del modelo según prueba de vuelo

Como se explicó en la sección anterior, la estructura diseñada es una estructura de dron valida, ya que cumplió los objetivos de poder ser resistente a fuerzas de flexión generadas por las fuerzas de empuje de los motores y además se pudo validar al realizar la prueba

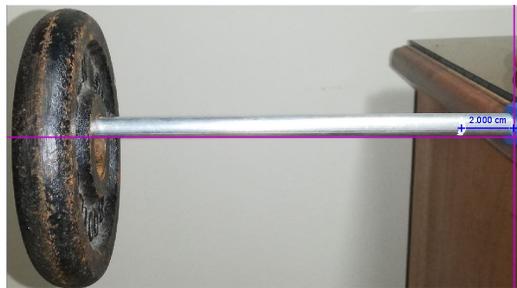


(a) Análisis con 2.5 libras

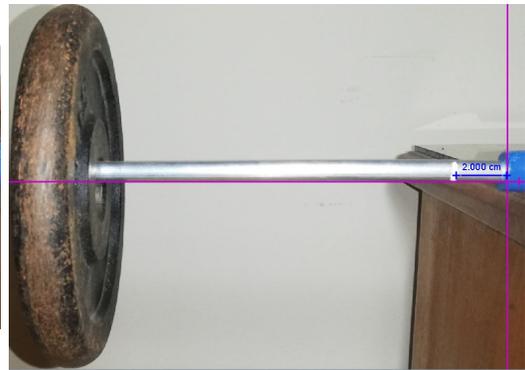


(b) Análisis con 5 libras

Figura 71: Análisis en Modelo 5 con pesos para simular fuerza de empuje en brazo delantero



(a) Análisis con 2.5 libras



(b) Análisis con 5 libras

Figura 72: Análisis en Modelo 5 con pesos para simular fuerza de empuje en brazo trasero

de vuelo y que esta se elevará. Durante las pruebas de vuelo realizadas, al volar el dron se encontró que se necesita realizar una configuración del PID en Mission Planner para poseer una mejor estabilidad durante el vuelo, aún así el dron posee una estabilidad moderada durante su funcionamiento.

Por lo tanto, según esta estructura se puede empezar por diseñar el dron híbrido planteado en la Introducción, el cual será la continuación de este proyecto.

Controlador de velocidad (ESC)	Salida del Arducopter
Frontal izquierdo	2
Frontal derecho	1
Trasero superior	6
Trasero inferior	4

Cuadro 21: Conexión de controladores de velocidad con Arducopter para el Modelo 5



Figura 73: Vista frontal del Modelo 5 del dron



Figura 74: Vista lateral del Modelo 5 del dron



Figura 75: Prueba de vuelo 1 Modelo 5 estructura del dron



Figura 76: Prueba de vuelo 2 Modelo 5 estructura del dron

---

## Diseño y fabricación de plataforma para pruebas de vuelo

---

El principal objetivo de la creación de una plataforma para pruebas de vuelo fue poder delimitar el área de vuelo del dron. Debido que en las primeras fases del diseño del dron no se posee un control adecuado del mismo, por lo que a la hora de ponerlo en funcionamiento puede generar movimientos no deseados, provocando que se dañen sus partes o que lastime a personas que estén cerca. La plataforma de pruebas puede ser diseñada para delimitar únicamente el movimiento en el eje Z, en los ejes X-Y o en los 3 ejes.

### 8.1. Modelo 1

Este tuvo como finalidad delimitar el área de movimiento del dron en los ejes X-Y-Z, permitiéndole movilizarse en un área reducida. Creándose con el propósito de analizar si el dron utilizado era capaz de elevarse en el aire y a la vez poder observar su comportamiento durante el vuelo.

#### 8.1.1. Diseño

Su diseño consistió en una estructura simple conformada por una superficie para colocar al dron, 4 patas para elevar la superficie, una argolla con rosca para madera y un peso colocado en la parte inferior de la plataforma para evitar que el dron elevara la plataforma si este poseía mucha potencia o fuerza de empuje. El diseño de esta plataforma se puede ver en la Figura [77](#), donde se muestra la parte superior e inferior.

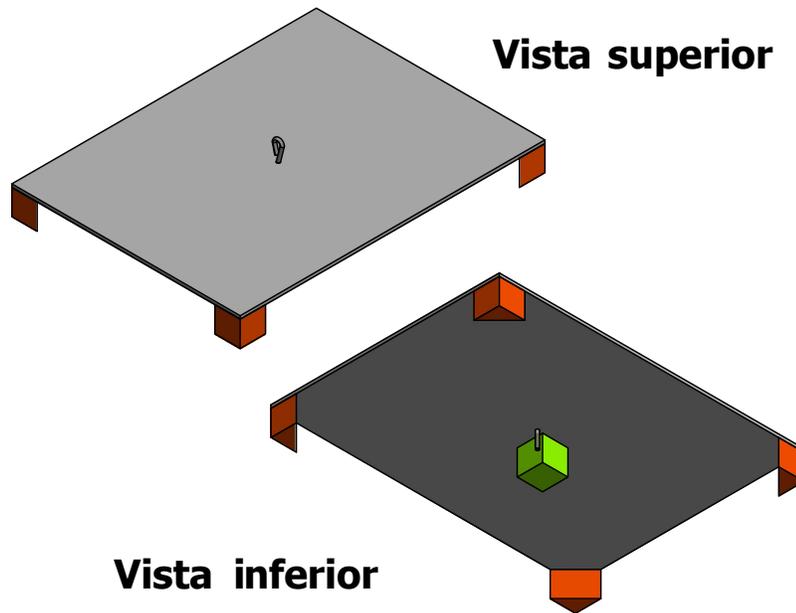


Figura 77: Diseño Modelo 1 plataforma de pruebas de vuelo

### 8.1.2. Fabricación

Para la fabricación de esta plataforma se utilizaron materiales económicos y reciclados, dado que por su simplicidad no es necesario la utilización de materiales complejos. Se utilizaron 2 planchas de MDF de 3.2 mm para la superficie donde se coloca el dron, las cuales fueron unidas por dos tornillos colocados en dos esquinas opuestas. Se utilizó una argolla con rosca de 4 mm de diámetro, la cual fue insertada en el centro de las planchas de MDF, su uso es para poder amarrarle hilo de pesca o de cualquier otro tipo, y así amarrar éste al dron y poder restringir su área de movimiento. Se usó duroport para crear las patas de esta estructura y bloques de aluminio con un peso de 5 libras, que fueron pegados a la parte inferior de la plataforma (en la Figura 77 se ejemplifican siendo estos de color verde). En la sección de anexos se puede apreciar la plataforma construida, mostrándose en la Figura 106 su vista frontal, en la Figura 107b su vista superior, en la Figura 107b su vista inferior y en la Figura 108 la argolla utilizada en la plataforma.

### 8.1.3. Observaciones

La principal ventaja de este modelo es su simplicidad y dado a esto no es necesario utilizar materiales complejos para su fabricación, pudiendo ser construida con un presupuesto bajo y con materiales de fácil acceso.

La desventaja de esta es que, si no se posee un control adecuado para el dron a la hora de probarlo en esta plataforma, si el dron se inclina hacia un lado sin haberse elevado aún, se pueden deteriorar sus componentes, pues se lastiman al impactar con la superficie donde es colocado. Además, al no poseer un control adecuado para el dron, cuando este es puesto en funcionamiento puede realizar giros o movimientos descontrolados, teniendo la posibilidad

de que este impacte. Por lo que el uso de esta plataforma es recomendable para drones que ya poseen un control adecuado, pues permite el análisis de éste en un área controlada.

## 8.2. Modelo 2

Este modelo se diseñó con la finalidad de poder restringir el movimiento del dron para que se moviera únicamente en el eje Z. Siendo utilizada esta plataforma para drones que no poseen un control de vuelo estable, ya que, si estos generan giros o movimientos descontrolados, esta plataforma los mantiene estables en el eje X-Y, es decir no les permite moverse en estos ejes. Pudiéndose utilizar para verificar si los prototipos de los drones fabricados son capaces de elevarse o no, ya que es una de las primeras pruebas realizadas a estos en su proceso de diseño.

### 8.2.1. Diseño

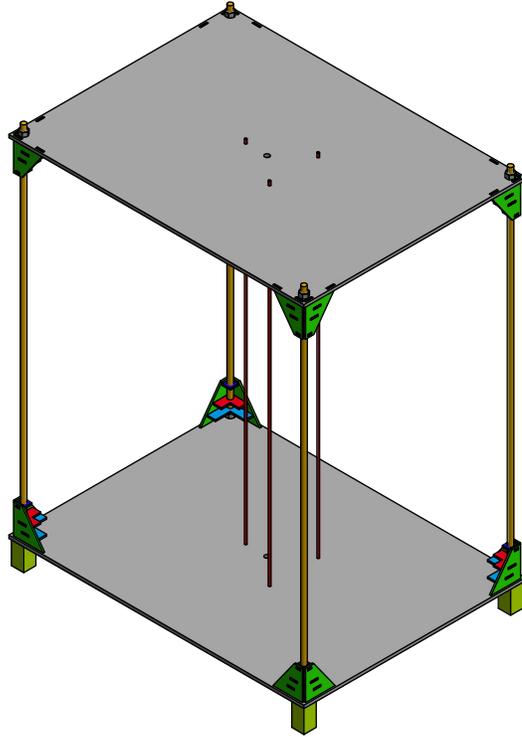
El diseño de esta plataforma se muestra en la Figura [78a](#), se conformó por una superficie superior y una inferior, las cuales sirven para delimitar la distancia vertical que el dron es capaz de movilizarse (ver Figura [109](#) en la sección de Anexos, donde se muestra el diseño de las superficies). Además, se decidió utilizar 4 varillas roscadas (las cuales se muestran de color café en la Figura [78a](#)), para sostener la superficie superior con tuercas.

Para dar rigidez a la estructura se colocaron patas en la superficie inferior para poder empotrar las varillas roscadas utilizadas (ver Figura [110](#) en la sección de Anexos, donde se muestra el diseño de las patas). También se diseñaron escuadras (mostradas en verde en la Figura [78a](#)), las cuales se insertaron en las superficies de la plataforma. Estas poseían tres soportes en los cuales se insertaron las varillas roscadas y con esto se restringió el movimiento de la estructura en el plano X-Y. Las configuraciones de las escuadras para la superficie superior e inferior se muestran en la Figuras [79b](#) y Figura [79a](#).

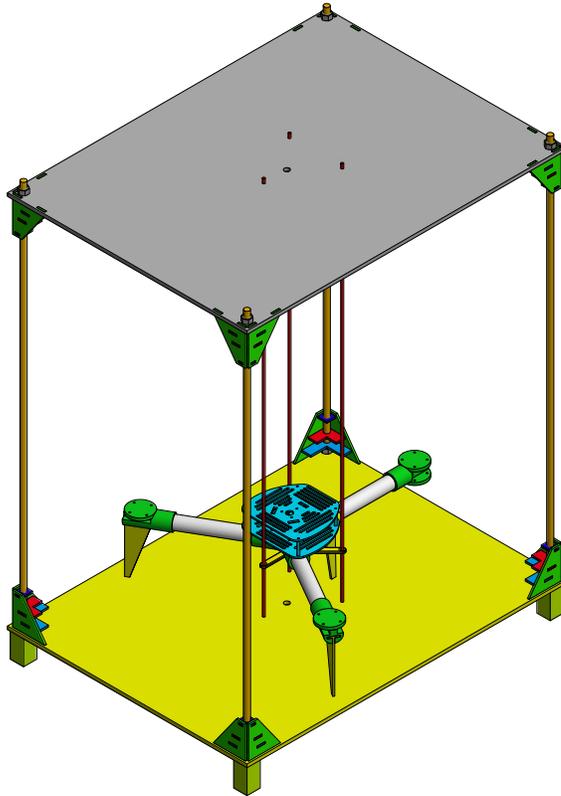
Para poder delimitar el movimiento en el plano X-Y del dron a analizar se utilizaron guías verticales (las cuales se muestran de color rojo en la Figura [78a](#)), estas debían ser sujetadas en las superficies de la plataforma, y con esto se logra obtener un movimiento únicamente en el eje Z.

Para poder colocar el dron en las guías verticales se diseñó una pieza en forma de Y (véase la Figura [80a](#)). Esta fue diseñada basándose en el Modelo 4 de la Estructura del Dron, con lo cual se le colocaron agujeros a esta pieza para que pudiera ser atornillada a la parte inferior de la estructura del dron, según se muestra en la Figura [80b](#). Además, poseía agujeros en sus límites para que pudieran pasar las guías verticales utilizadas y así poder restringir el movimiento del dron únicamente al eje Z.

En la Figura [78b](#) se ejemplifica la colocación del dron (usando el modelo 4) en la base de pruebas.

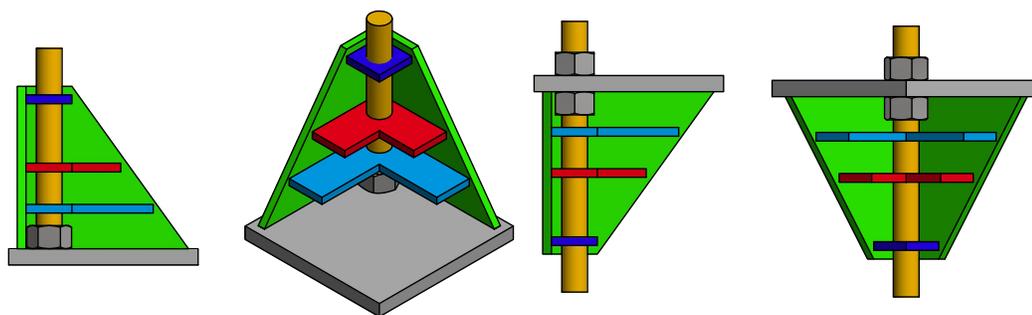


(a) Plataforma de pruebas



(b) Plataforma de pruebas con dron

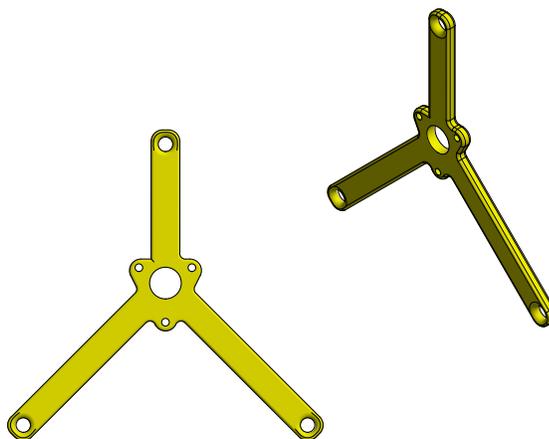
Figura 78: Diseño Modelo 2 plataforma de pruebas de vuelo



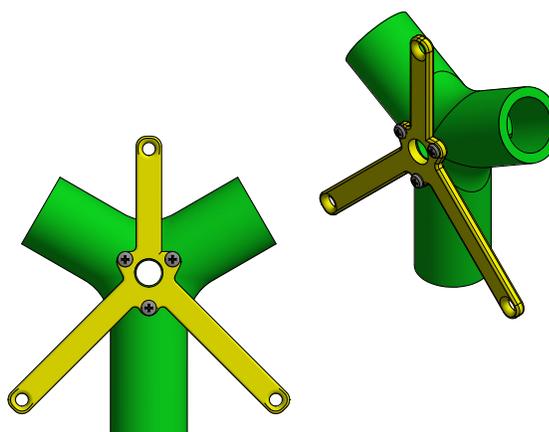
(a) Diseño escuadra inferior

(b) Diseño escuadra superior

Figura 79: Configuraciones de escuadras



(a) Pieza para unión con guías verticales



(b) Ensamble cuerpo del dron con pieza de guía

Figura 80: Diseño de pieza para unión del dron con guías verticales

### 8.2.2. Fabricación

Los materiales utilizados para esta plataforma fueron los siguientes:

- 4 planchas de MDF de 45x60 cm de 3.2 mm de grosor.
- 1 plancha de MDF de 6 mm de grosor.
- 4 varillas roscadas de 1 m de longitud y diámetro de 3/8 de pulgada.
- 12 tuercas de 3/8 de pulgada.
- Cable de acero galvanizado plastificado de 2 mm de diámetro
- 9 nudos para cable de 1/8 de pulgada.

La construcción de esta plataforma se dividió en las siguientes fases:

#### Superficie inferior y superior

Estas fueron maquinas mediante corte láser y se utilizaron 2 planchas de MDF para cada una, esto para poder dar mayor rigidez a la misma y evitar que estas se deformaran por las fuerzas aplicadas por las guías del dron al tensarlas, siendo 2 debido que el grosor de las planchas es relativamente pequeño, pero si se hubieran tenido planchas de 6 mm de espesor de 45x60 cm se hubiera utilizado una para cada superficie.

#### Patatas

Se fabricaron patas de 4.8 cm de altura para poder empotrar las varillas roscadas. Estas fueron maquinadas mediante corte láser y se utilizó el MDF de 6 mm de grosor, realizando 8 piezas para cada pata para formar una con la altura mencionada. En la Figura [111](#), en la sección de anexos se muestra una de las patas construidas.

**Escuadras** Estas fueron maquinadas mediante corte láser en MDF de 3.2 mm de grosor. Se fabricaron 8, 4 para la superficie inferior y 4 para la superficie superior. En la Figura [112a](#) y Figura [112b](#), en la sección de anexos se muestra una de las escuadras fabricadas en vista frontal y trasera.

#### Unión de superficies con patas, escuadras y varillas roscadas

Como siguiente punto, ya fabricadas las piezas mencionadas anteriormente, se prosiguió a unirlos. Para esto se insertaron las varillas roscadas a las superficies, y en la superficie inferior se empotraron las varillas a las patas. Para asegurar las superficies de la plataforma se utilizaron las tuercas mencionadas anteriormente, además se colocaron las escuadras en las configuraciones que se muestran en la Figura [79a](#) y Figura [79b](#). En la sección de anexos se muestra en la Figura [113](#) la unión física de estos componentes.

#### Guías verticales

Para las guías verticales se utilizó el cable de acero galvanizado, este fue tensado de tal manera que presentara la mínima deflexión posible. Para poderlo tensar se sujetó primero

este a la superficie inferior mediante nudos para cable y luego se tensó hasta la superficie superior y se sujetó en esta superficie mediante nudos para cable. En la Figura [114](#) en la sección de anexos se puede apreciar como se sujetaron los cables de acero con los nudos para cable.

Para poder restringir hasta donde se movería el dron el eje Z se utilizaron nudos para cable, estos fueron sujetos en la posición deseada en las guías verticales, y dado por la forma de la pieza diseñada como guía para el dron (la cual fue maquinada mediante impresión 3D según el diseño que se muestra en la Figura [80a](#)), al llegar a esta posición se impedía el movimiento en el eje Z. En la Figura [115](#) en la sección de anexos se muestra como se colocaron los nudos para cable y en la Figura [116](#) de la misma sección se muestra como es que topa la pieza de guía con los nudos para cable.

En la sección de anexos se muestra la plataforma construida en la Figura [117](#), además se muestra al dron del modelo 4 en la misma.

### 8.2.3. Observaciones

Como se mencionó anteriormente esta plataforma se utiliza únicamente para verificar el desplazamiento del dron en el eje Z. Por lo que si se desea verificar el funcionamiento del dron en el plano X-Y, se debe utilizar el Modelo 1 de la plataforma de pruebas o diseñar otra estructura para poder realizar este análisis de manera más controlada.

Para poder disminuir la fricción entre las guías de la plataforma y la pieza fabricada para unir al dron, se utilizó cable metálico con un recubrimiento plástico, pero en dado caso se posea un mejor material a la hora de reconstruir esta plataforma se puede utilizar.

La plataforma creada presentó deflexiones en su estructura a la hora de aplicarle fuerzas en sus lados, por lo que no se debe utilizar un dron que ejerza demasiada fuerza en las guías metálicas, debido que se puede deteriorar la plataforma o destruirse. En el caso del dron creado no ejercía fuerzas elevadas en las guías, por lo que al ponerlo a prueba en la plataforma presentaba un comportamiento adecuado.

La fabricación de las escuadras para la plataforma sirvió para disminuir las deflexiones que esta presentaba al aplicarle fuerzas en sus lados, por lo que son indispensables a la hora de fabricarse esta plataforma.

## 8.3. Modelo 3

El objetivo del diseño de este modelo fue crear una plataforma para analizar los movimientos del dron en sus ángulos de giro respecto los ejes x-y-z o roll-pitch-yaw. Con esto poder determinar la estabilidad del dron a la hora de realizar movimientos respecto estos ángulos, como también observar la velocidad de este al realizar estos giros o su sensibilidad a dichos movimientos.

### 8.3.1. Diseño

El diseño de esta plataforma consistió en dos partes elementales, una rótula y una base con una varilla. La rótula fue diseñada de tal manera que pudiera ser maquinada mediante impresión 3d, observándose su diseño en la Figura [81](#), dividiéndose en una parte que compone una esfera y en una estructura superior, la cual se compone por dos partes iguales para poder ser unidas y permitir que la esfera gire dentro de estas. La estructura superior de la rótula se diseño de tal manera que pudiera ser insertada al dron, siendo diseñada especialmente para el modelo 4 de la estructura del dron, debido que este posee un agujero en su unión en forma de y. Todo con el objetivo de poder analizar sus movimientos en roll-pitch-yaw.

La finalidad de la base con la varilla fue poder asegurar la rótula a estas y obtener estabilidad en la base de pruebas, con lo cual se diseño la rótula de tal manera que pudiera ser insertada a la varilla, la cual tiene que estar asegurada a la base. En la Figura [82a](#) se muestra el diseño de la plataforma de pruebas y en la Figura [82b](#) se muestra una ejemplificación de la colocación del dron en la plataforma de pruebas.

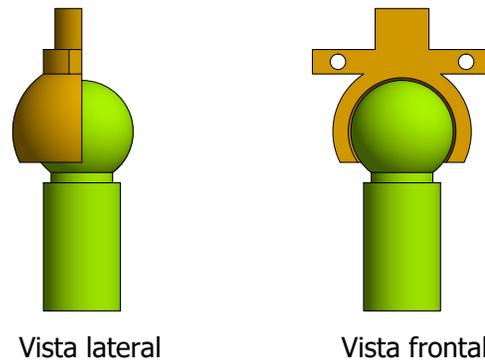


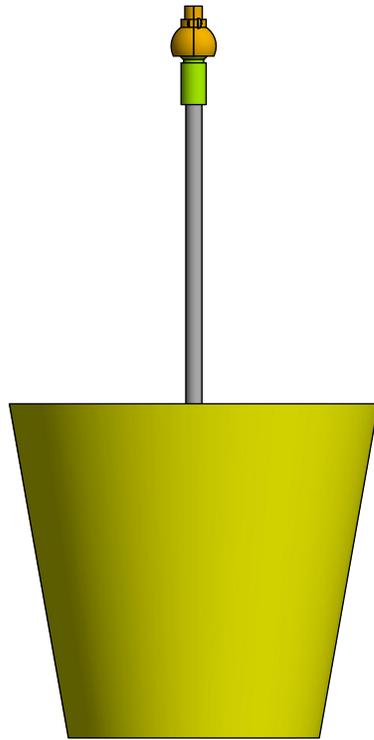
Figura 81: Diseño de rótula de base de pruebas de vuelo Modelo 3

### 8.3.2. Fabricación

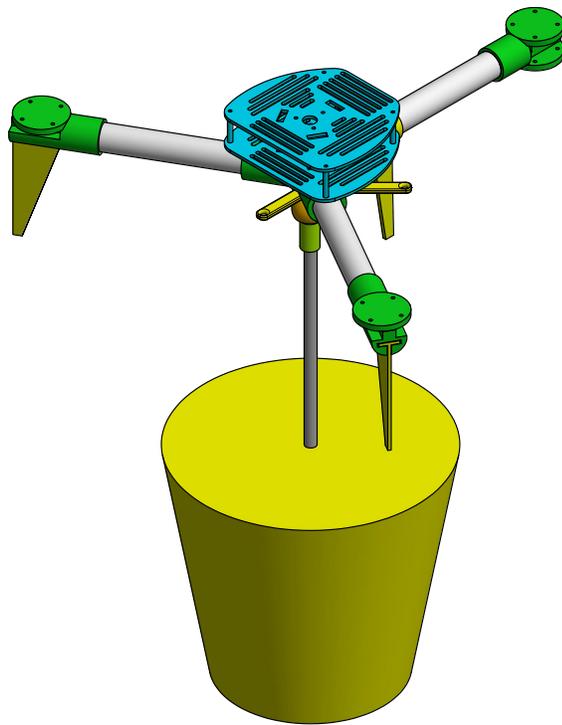
Al igual que el diseño de esta plataforma la fabricación se dividió en dos partes, en la fabricación de la rótula y en la fabricación de la base.

La rótula fue maquina mediante impresión 3d, con lo cual se dividió en tres partes, en la esfera de la rótula y en dos estructuras que se encargan de encerrar la esfera (véase la Figura [83](#)), las cuales son unidas mediante tornillos de 3 mm de diámetro. La rótula fabricada se puede apreciar en la Figura [118a](#) en la sección de anexos.

Para la fabricación de la base se utilizó un bote de plástico y una varilla roscada de diámetro de 3/8 de pulgada y una longitud de 40 cm, para poder insertar la rótula a esta como se muestra en la Figura [118b](#) en las sección de anexos. Para poder asegurar la varilla al bote se utilizó cemento, esto para poder generar un peso en la estructura y así evitar que el dron genere fuerzas que hagan que la base se caiga hacia un lado durante el funcionamiento



(a) Plataforma de pruebas



(b) Plataforma de pruebas con dron

Figura 82: Diseño Modelo 3 plataforma de pruebas de vuelo

de este. En la sección de anexos se muestra la base fabricada en la Figura 119 y en la Figura 120 se muestra al modelo 4 de la estructura del dron en la plataforma.



Figura 83: Partes de rótula fabricada

### 8.3.3. Observaciones

Una de las ventajas de esta plataforma es su fácil fabricación, debido que no se requieren materiales muy elaborados para poderla realizar. Además, esta plataforma es muy útil para analizar el comportamiento del dron en los ángulos de giro roll-pitch-yaw, ya que por su robustez soporta fuerzas moderadas generadas por el dron durante su funcionamiento, con lo cual se asegura que esta no se destruirá durante las pruebas que se realicen.

Respecto la rotula utilizada fue diseñada especialmente para la estructura del modelo 4 del dron, por lo que si se desea probar con otra estructura se debe analizar si esta es capaz de adaptarse o si no se puede realizar una pequeña adaptación de la rotula para el dron que se desea analizar.

- Se diseñó una estructura para dron en configuración y4 capaz de maquinarse mediante impresión 3d, para poder crear prototipos de manera rápida mediante esta técnica de manufactura. Y se determinó mediante el modelo 5 diseñado que, si es factible su manufactura mediante impresión 3d, debido que al realizar el análisis de deflexión en Autodesk Inventor y en la estructura física se presentaron deflexiones cercanas a cero.
- Se diseñó y construyó una estructura para dron en configuración Y4 resistente a deflexiones generadas por las fuerzas de los pesos de sus motores, las cuales fueron 0.55 N, y por fuerzas de empuje de hasta 22.5 N, asegurándose que la estructura no fallará por corte a flexión en las uniones de sus brazos.
- Se diseñaron y construyeron tres plataformas para pruebas de vuelo, siendo la funcionalidad de la primera poder verificar si el dron es capaz de elevarse y analizar su comportamiento en el aire, la de la segunda analizar el comportamiento del dron en el eje z o su elevación, y la de la tercera analizar el funcionamiento del dron en los ángulos de navegación roll-pitch-yaw.
- Se implementó un Arducopter versión 2.8 para poder controlar los motores y movilizar el dron, utilizándose un transmisor T8FB y un receptor R8EF para mandar señales al Arducopter y poder controlar el dron de manera inalámbrica.
- Al realizar la prueba de vuelo del Modelo 5 de la estructura del dron, el dron fabricado fue capaz de elevarse. Permitiendo validar la estructura diseñada, siendo esta resistente a las fuerzas de empuje generadas por los motores y capaz de elevarse y moverse en el aire.



- Al maquinarse el modelo 5 de la estructura del dron se recomienda utilizar PLA, debido que fue el material con el que se realizaron las pruebas y se aseguró que la estructura fuera resistente a deflexión.
- Para poseer mayor estabilidad en el modelo 2 de la plataforma de pruebas de vuelo se debe realizar una estructura con marco de metal, así también se evita que se flexione la superficie superior de la plataforma por las fuerzas ejercidas por los lazos metálicos al ser asegurados.
- Para lograr mayor estabilidad durante el funcionamiento del dron se deben buscar los valores adecuados del PID utilizado por el Arducopter, los cuales pueden ser configurados en Mission Planner.
- Se recomienda utilizar una batería de 3,300 mAh para tener un tiempo de funcionamiento de aproximadamente 5 minutos con los motores al máximo, pudiendo incrementar si estos no se utilizan a su máxima capacidad. Si se desea más tiempo de funcionamiento se puede utilizar una batería de mayor potencia, pero se debe de tomar en consideración su peso antes de implementarla.
- Se recomienda utilizar un espesor de pared de 2 milímetros para las piezas maquinadas mediante impresión 3D y un Infill de 50 por ciento, para dar mayor rigidez a las piezas maquinadas.



- [1] Wingtra, *Professional VTOL fixed-wing drones*, 2019. dirección: <https://wingtra.com/>.
- [2] E. Ackerman, *THOR Transformer Drone Hovers and Cruises With No Compromises*, jul. de 2017. dirección: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/drones/thor-transformer-drone-hovers-and-cruises-with-no-compromises>.
- [3] Q. Systems, *Tron F9 - The high payload long-range UAV - Quantum-Systems*, 2019. dirección: <https://www.quantum-systems.com/tron-f9/>.
- [4] P. D. SAS, *Parrot DISCO FPV*, oct. de 2018. dirección: <https://www.parrot.com/global/drones/parrot-disco-fpv#parrot-disco-fpv-details>.
- [5] E. Ackerman, *Artificial Feathers Let Drones Morph Their Wings Like Birds*, dic. de 2016. dirección: <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/drones/artificial-feathers-let-drones-morph-their-wings-like-birds>.
- [6] P. RUIPÉREZ MARTÍN, “*Diseño y fabricación de un dron mediante impresión 3D*”, Tesis doct., Valencia, España, 2016.
- [7] I. Garcia Garcia y col., *Estudio sobre vehiculos aéreos no tripulados y sus aplicaciones*. Valladolid, España, mar. de 2017.
- [8] DJI, *DJI Mavic Air – Foldable 4K Drone – DJI*, 2019. dirección: [https://www.dji.com/mavic-air?site=brandsite&from=eol\\_phantom](https://www.dji.com/mavic-air?site=brandsite&from=eol_phantom).
- [9] F. W. Sears, M. W. Zemansky, H. D. Young y R. A. Freedman, *Física Universitaria. Volumen I. Décimo*, 2013.
- [10] P. Washington, *Como funcionan y vuelan los drones*, oct. de 2018. dirección: <http://inforepuesto.com/como-funcionan-y-vuelan-los-drones/>.
- [11] P. D. Team, *Flying 101*, abril de 2019. dirección: [https://docs.px4.io/en/flying/basic\\_flying.html](https://docs.px4.io/en/flying/basic_flying.html).
- [12] M. S. Hossain, A. M. Kabir, P. Mazumder, A. Aziz, M. H. Quraishi y P. K. Saha, “*Development of an Autonomous y4 copter*”, *International Journal of Information Technology, Control and Automation (IJITCA)*, vol. 3, n.º 2, 2013.

- [13] D. Wang, *Quadcopter Parts: What are they and what do they do? – Quadcopter Academy*, dic. de 2015. dirección: <http://www.quadcopteracademy.com/quadcopter-parts-what-are-they-and-what-do-they-do/>.
- [14] J. Nistal Lastra y col., *Diseño de un dron programable de bajo coste*. Cantabria, España, jun. de 2017.
- [15] F. J. Sánchez Jiménez, A. Fernández de la Puente Sarriá y J. Llorente Geniz, “*Técnicas de prototipado rápido*”, en *XVI Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, 2004.
- [16] A. T. y Maderas, *MDF MASISA*, 2019. dirección: <http://actablersomaderas.com/productos.php>.
- [17] Ultimaker, *Ultimaker PLA material: Highly versatile, easy to print*, mayo de 2017. dirección: <https://ultimaker.com/materials/pla>.
- [18] Ultimaker., *Ultimaker ABS material: 3D print durable and tough prototypes*, mayo de 2017. dirección: <https://ultimaker.com/materials/abs>.
- [19] APMCopter, *Arducopter, the open source UAV multicopter*, 2019. dirección: <https://www.arducopter.co.uk/>.
- [20] UnmannedTechShop, *ArduPilot APM 2.8 Flight Controller Board*, agosto de 2019. dirección: <https://www.unmannedtechshop.co.uk/product/ardupilot-2-8-flight-controller-board/>.
- [21] Ardupilot, *Choosing a Ground Station*, 2019. dirección: <http://ardupilot.org/copter/docs/common-choosing-a-ground-station.html>.
- [22] ArduPilot, *Mission Planner Overview*, 2019. dirección: <http://ardupilot.org/planner/docs/mission-planner-overview.html>.
- [23] R. Moment, *GoolRC A2212 1000KV Brushless Motor w/30A Brushless ESC and Pair 1045 Propeller for DJI F450 F550 Quadcopter FPV Part(A2212 1000KV Brushless Motor,30A Brushless ESC,1045 Propeller)*, 2019. dirección: <https://www.rcmoment.com/p-rm558.html>.
- [24] G. Factory, *Motor Brushless (sin escobillas) A2212/13T 1000KV*, 2019. dirección: <https://www.geekfactory.mx/tienda/motores-y-controladores/motor-brushless-sin-escobillas-a221213t-1000kv/>.
- [25] J. Yongng, *ESC 30A datasheet*, mar. de 2017. dirección: <http://www.rcdronegood.com/esc-30a-datasheet/>.
- [26] HobbyKing, *Turnigy 1000mAh 3S Lipo 20C Paquete*, 2019. dirección: [https://hobbyking.com/es\\_es/turnigy-1000mah-3s-20c-lipo-pack.html?\\_\\_store=es\\_es](https://hobbyking.com/es_es/turnigy-1000mah-3s-20c-lipo-pack.html?__store=es_es).
- [27] Arduino, *Arduino Uno Rev3*, 2019. dirección: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>.
- [28] Amazon, *Hobbypower 2212 920KV Brushless Motor SimonK 30A ESC for F450 S500 Quadcopter (Pack of 4 pcs)*, 2019. dirección: <https://www.amazon.com/Hobbypower-920KV-Brushless-SimonK-Quadcopter/dp/B01DF2D3U8>.
- [29] Hobbypower, *Hobbypower SimonK 30A ESC Brushless Speed Controller BEC 2A for Quadcopter F450 X525 (Pack of 4 pcs)*, 2019. dirección: <https://www.amazon.com/Hobbypower-SimonK-Brushless-Controller-Quadcopter/dp/B00QRR7N32>.

- [30] GoodLuckBuy, *GEMFAN 1045 ABS Plastic 10x4.5CW CCW Propeller Props for DJI MultiCopter 1 Pair*, 2019. dirección: <https://www.goodluckbuy.com/gemfan-1045-abs-plastic-10x4-5-cw-ccw-propeller-props-for-dji-multicopter-1-pair.html>.
- [31] MYRCMART, *APM 2.8 ArduPilot Mega 2.8 Flight Control Board (Straight Pin / \*Free Vibration Damping Plate\*)*, 2019. dirección: <http://www.myrcmart.com/apm-28-ardupilot-mega-28-flight-control-board-multicopter-plane-helicopter-free-vibration-damping-plate-p-8506.html>.
- [32] RobotShop, *RadioLink T8FB 2.4GHz 8CH Transmitter w/ R8EH 8CH Receiver*, 2019. dirección: <https://www.robotshop.com/en/radiolink-t8fb-24ghz-8ch-transmitter-r8eh-8ch-receiver.html>.
- [33] RadioLink, *Radiolink R8EF 2.4G 8 channels receiver*, 2019. dirección: <http://www.radiolink.com.cn/doce/product-detail-128.html>.
- [34] Hobbypower, *Hobbypower Power Module V1.0 with XT60 Plug for APM2.8 APM2.6 APM Pixhawk Flight Controller*, 2019. dirección: <https://www.amazon.com/Hobbypower-Module-APM2-8-Pixhawk-Controller/dp/B00JWMLWIG>.



## 12.1. Iteraciones de pruebas de vuelo de Modelo 4 de estructura de dron

### 12.1.1. Iteraciones de pruebas de elevación en Modelo 2 de plataforma de pruebas de vuelo

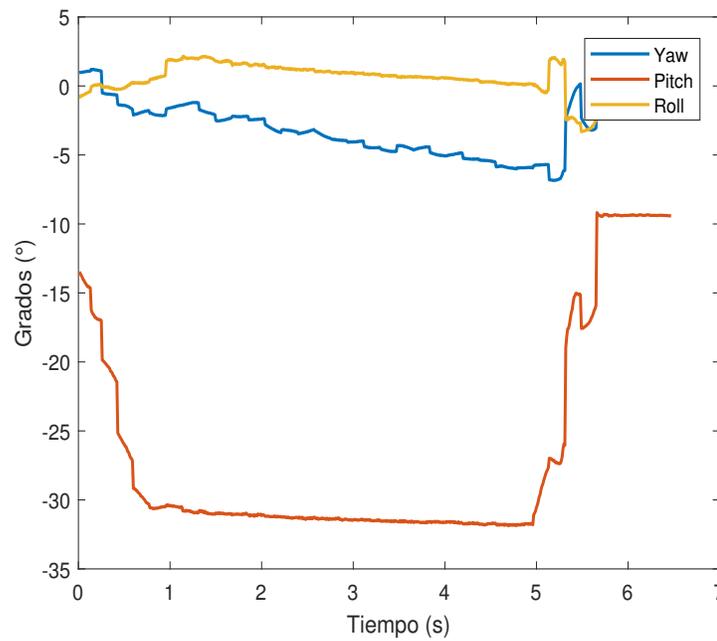


Figura 84: Iteración 2 de prueba de elevación

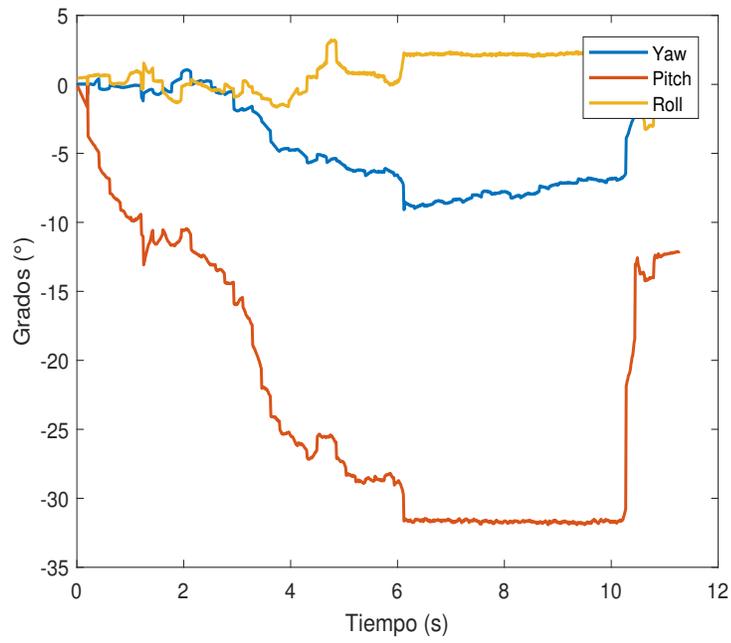


Figura 85: Iteración 3 de prueba de elevación

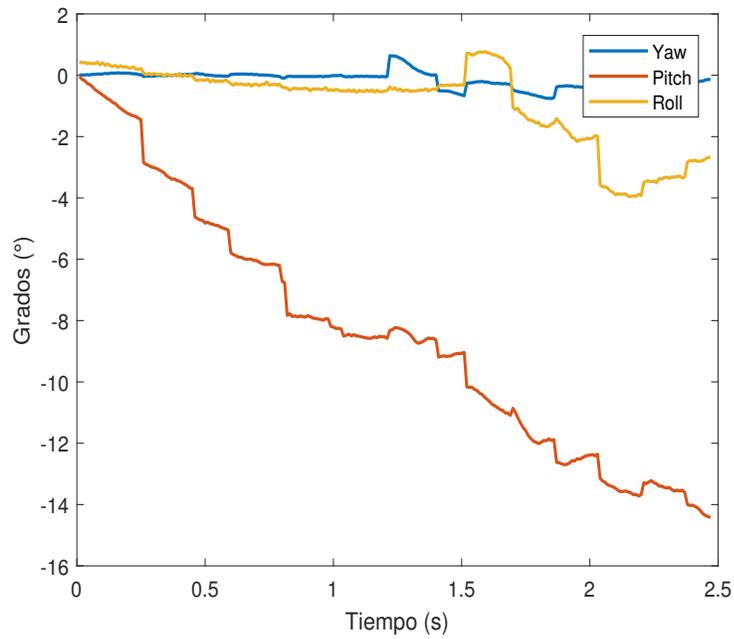


Figura 86: Iteración 4 de prueba de elevación

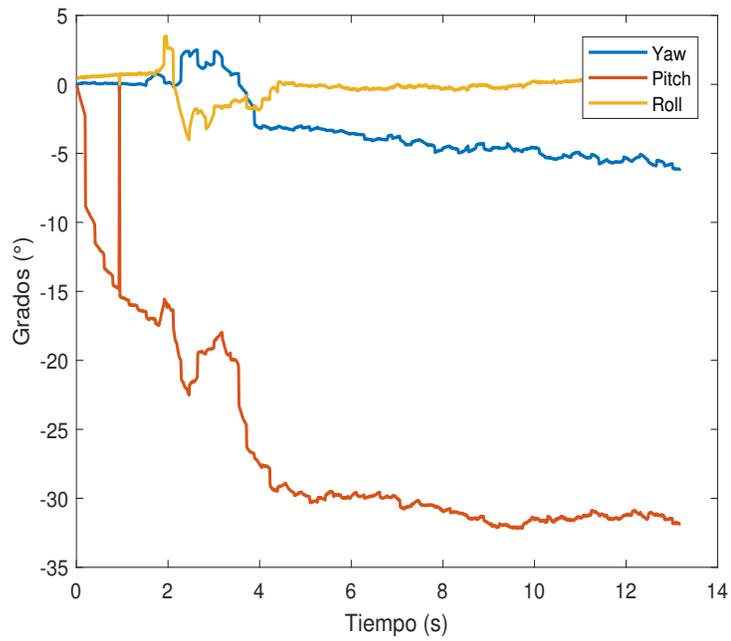


Figura 87: Iteración 5 de prueba de elevación

**12.1.2. Iteraciones de pruebas de inclinación en Pitch en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo**

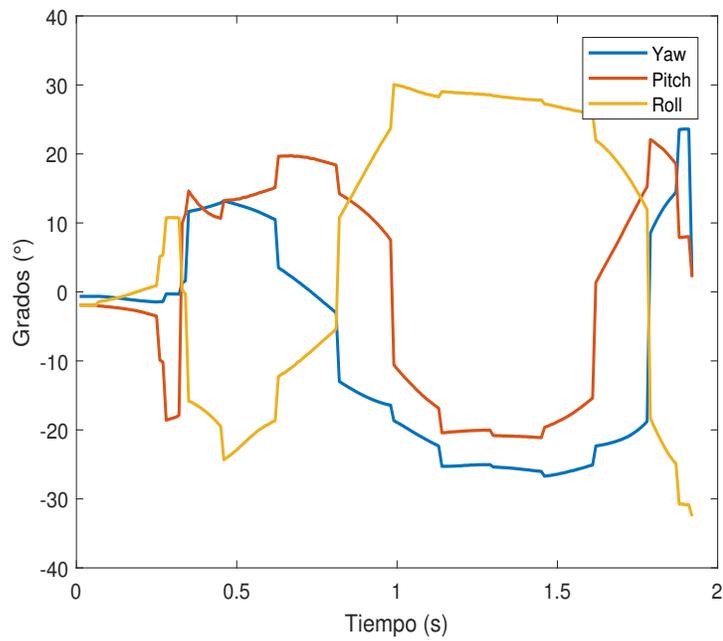


Figura 88: Iteración 2 de prueba de Pitch

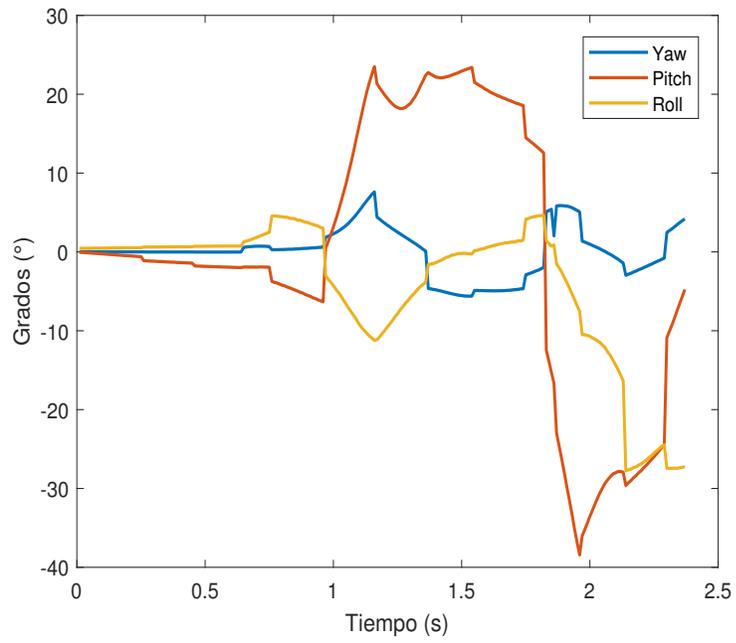


Figura 89: Iteración 3 de prueba de Pitch

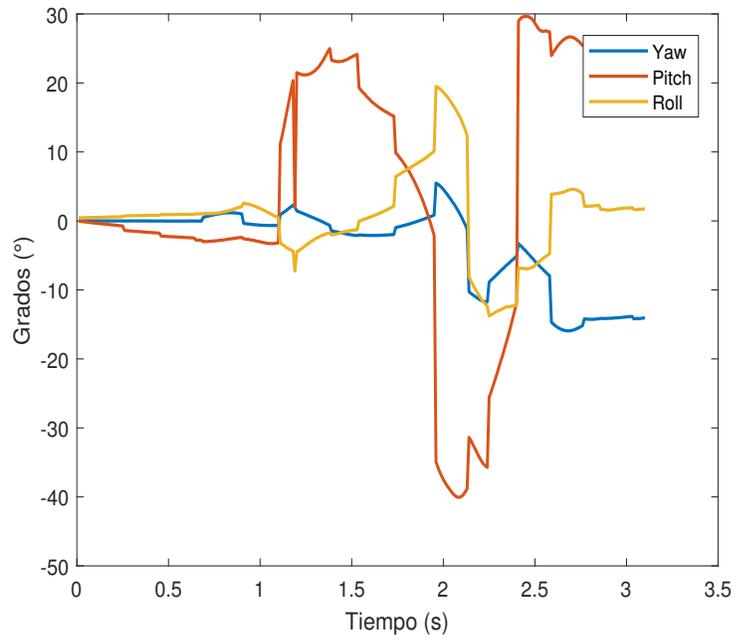


Figura 90: Iteración 4 de prueba de Pitch

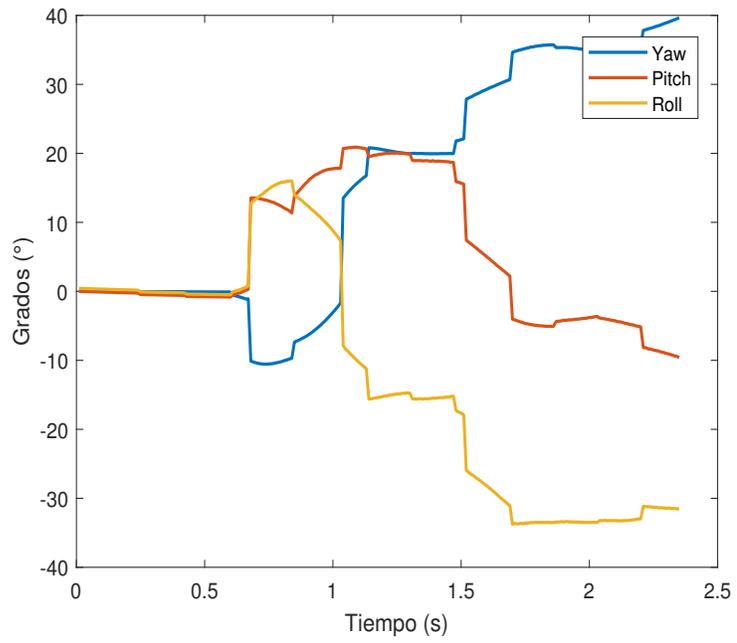


Figura 91: Iteración 5 de prueba de Pitch

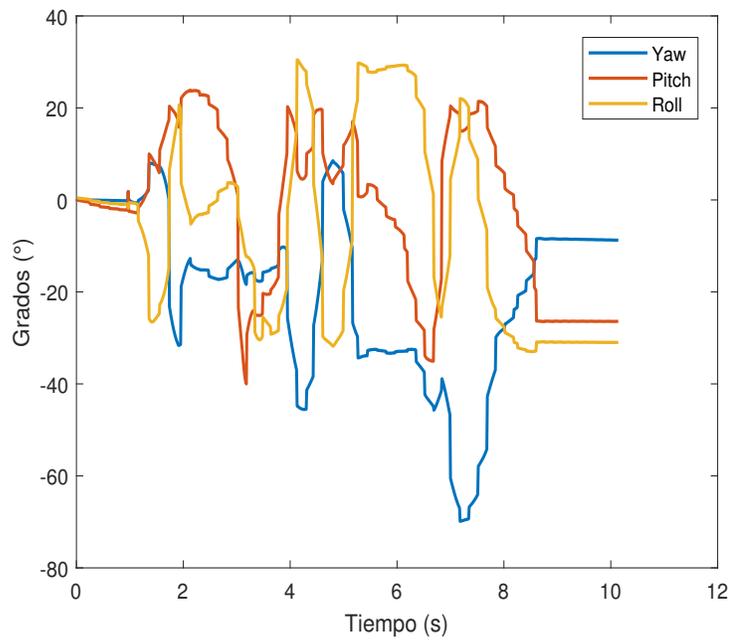


Figura 92: Iteración 6 de prueba de Pitch

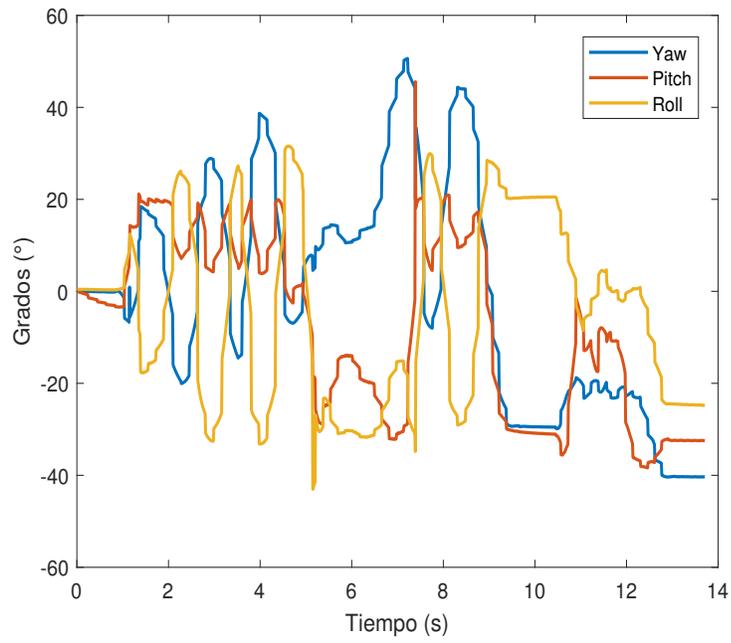


Figura 93: Iteración 7 de prueba de Pitch

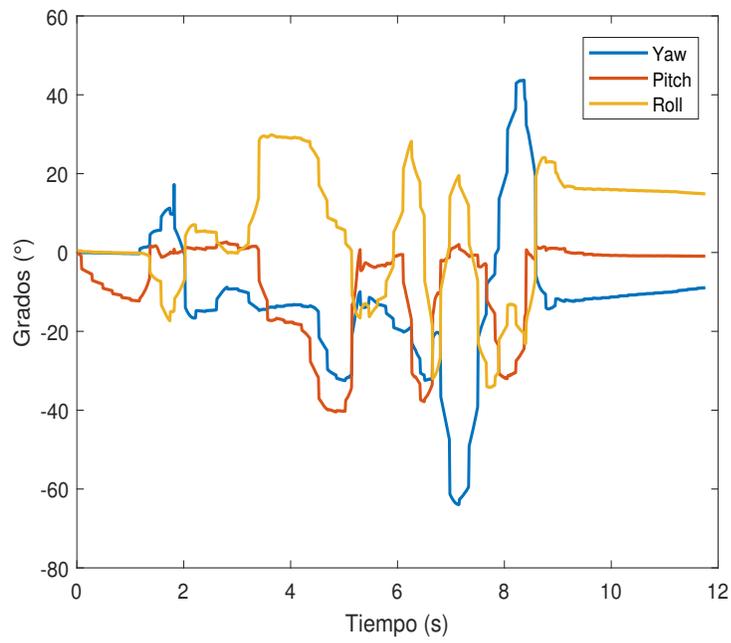


Figura 94: Iteración 8 de prueba de Pitch

### 12.1.3. Iteraciones de pruebas de inclinación en Roll en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo

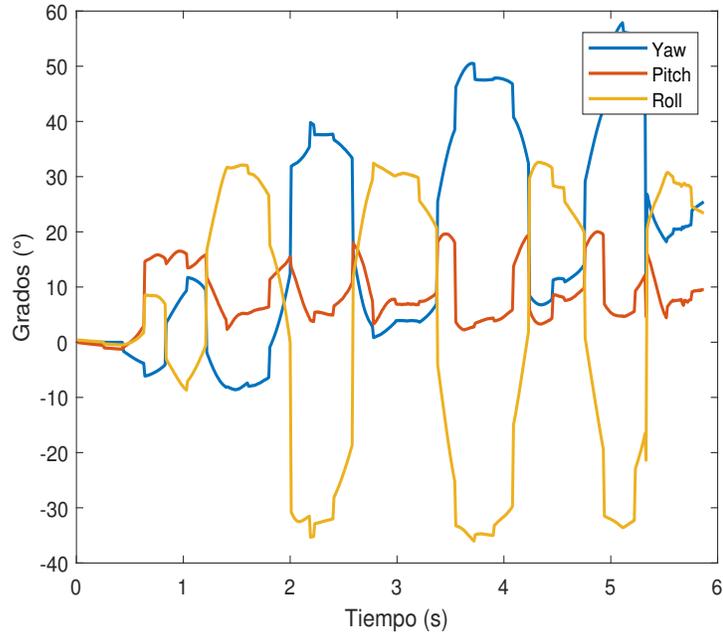


Figura 95: Iteración 2 de prueba de Roll

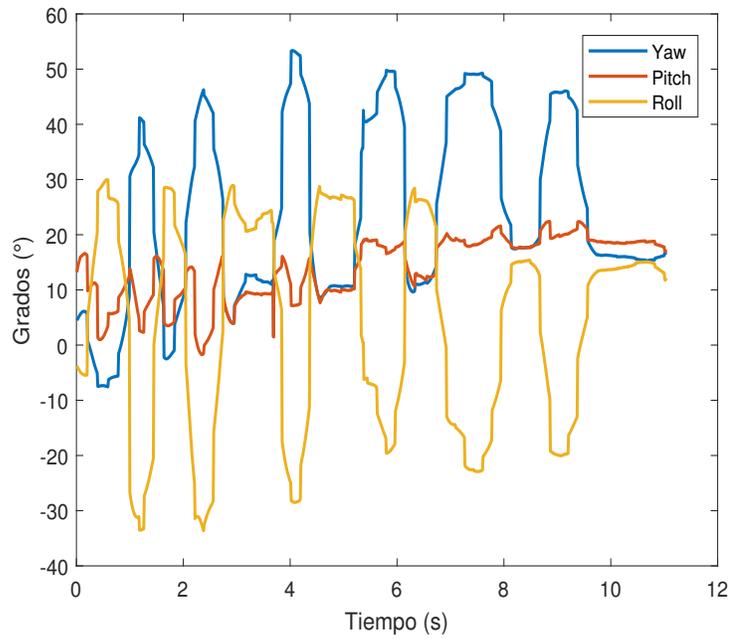


Figura 96: Iteración 3 de prueba de Roll

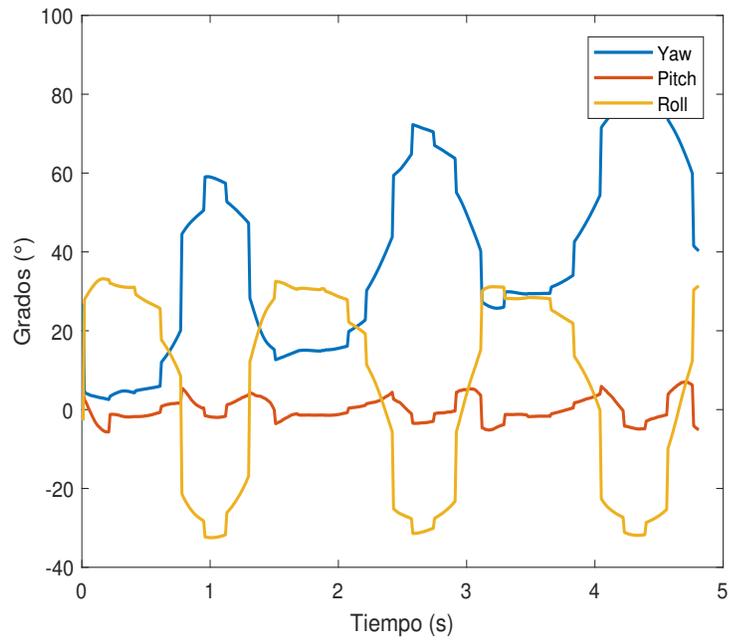


Figura 97: Iteración 4 de prueba de Roll

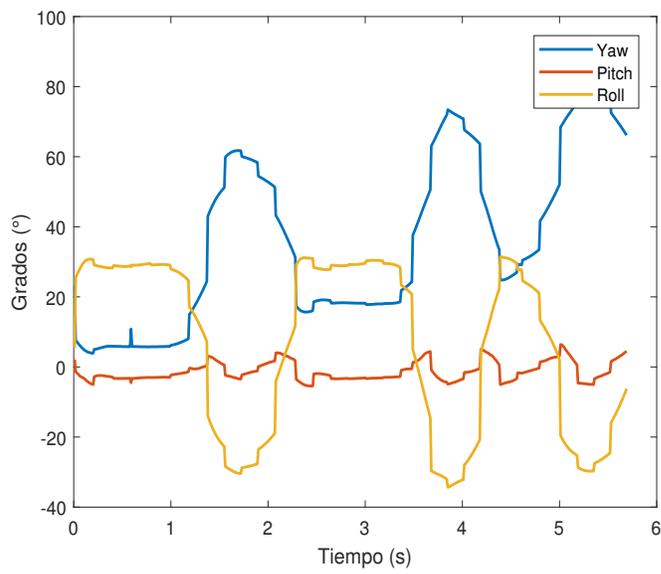


Figura 98: Iteración 5 de prueba de Roll

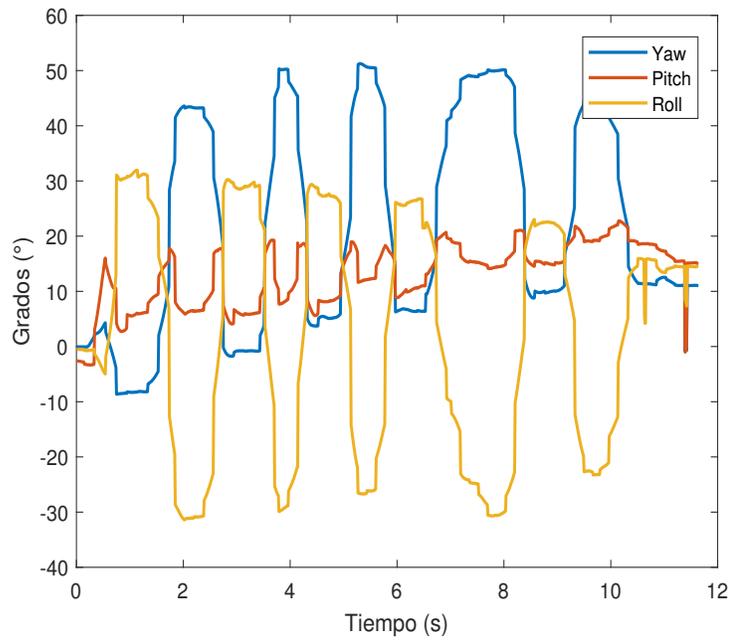


Figura 99: Iteración 6 de prueba de Roll

#### 12.1.4. Iteraciones de pruebas de Giro (Yaw) en Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo

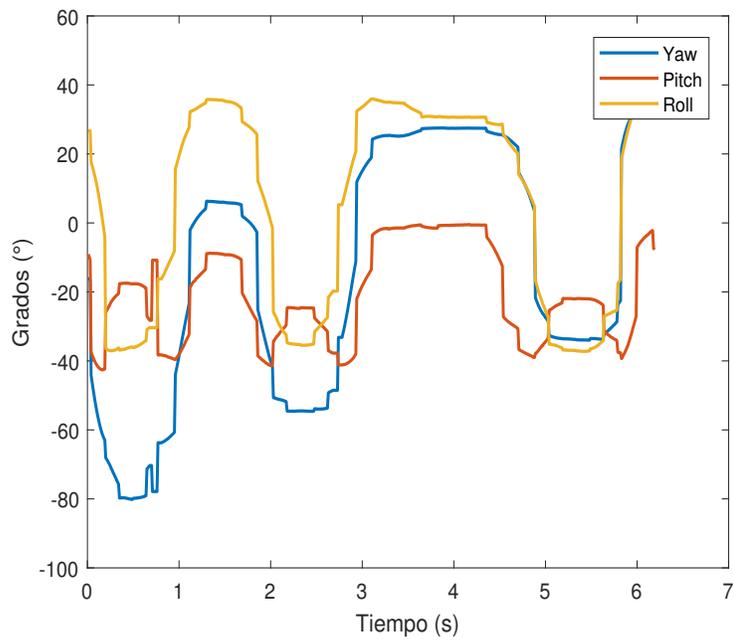


Figura 100: Iteración 2 de prueba de Yaw

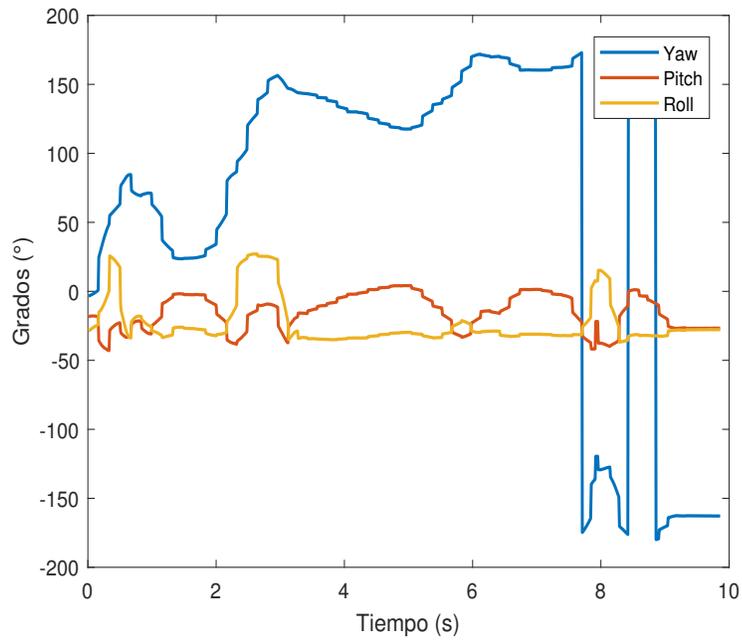


Figura 101: Iteración 3 de prueba de Yaw

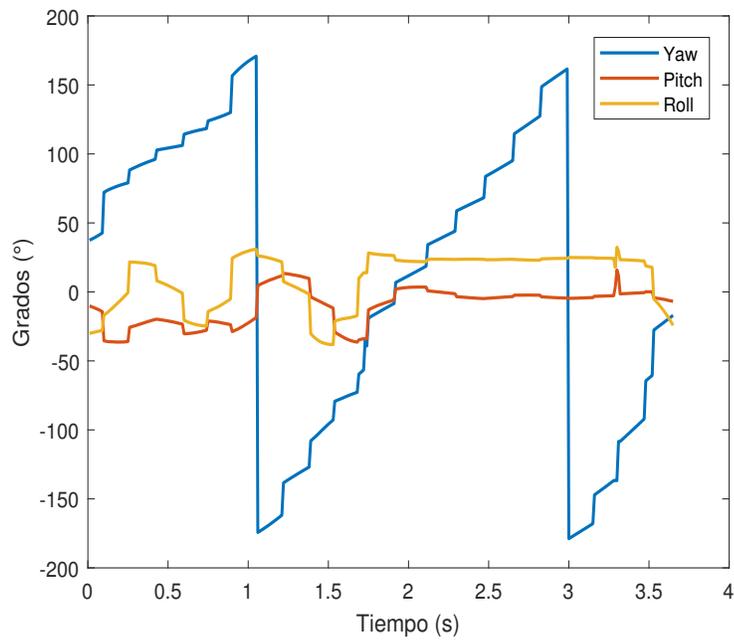


Figura 102: Iteración 4 de prueba de Yaw

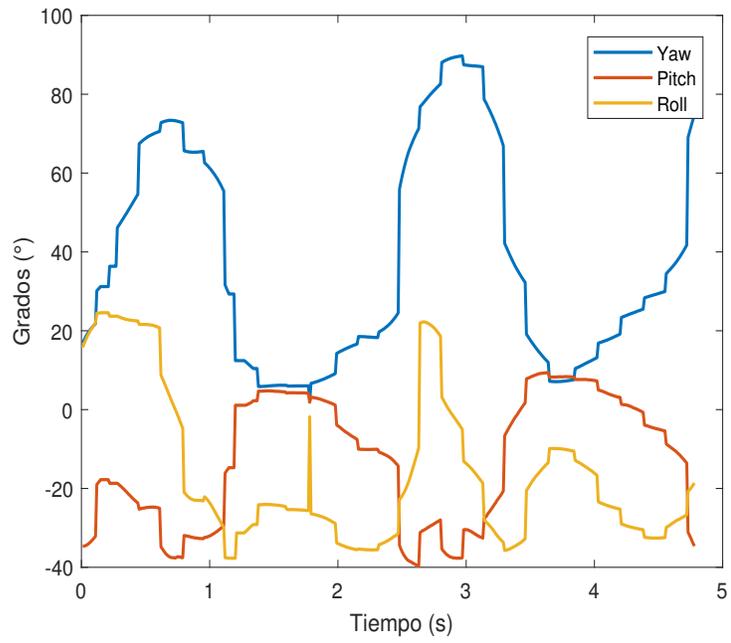


Figura 103: Iteración 5 de prueba de Yaw

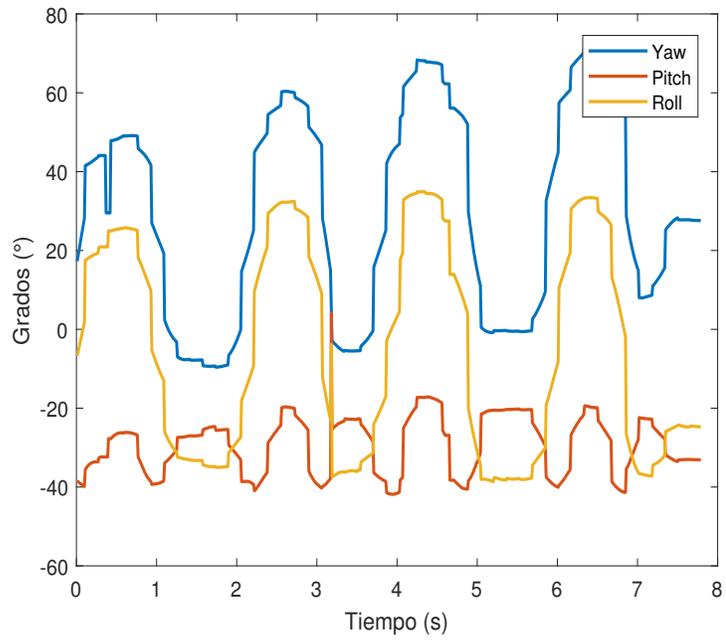


Figura 104: Iteración 6 de prueba de Yaw

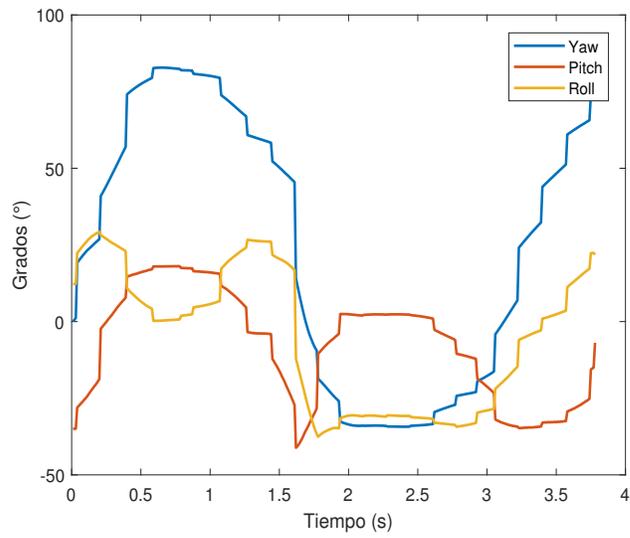


Figura 105: Iteración 7 de prueba de Yaw

## 12.2. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1

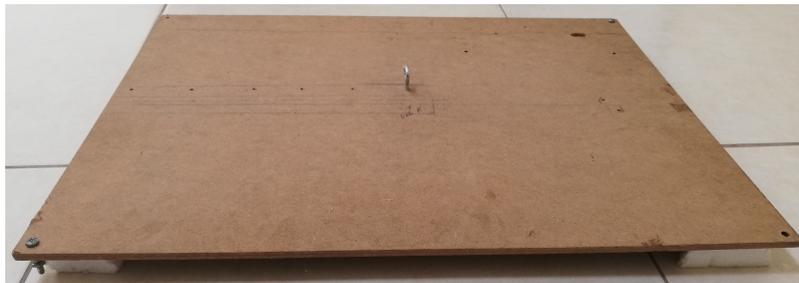


Figura 106: Vista frontal plataforma de pruebas Modelo 1



(a) Vista superior

(b) Vista inferior

Figura 107: Vistas superior e inferior plataforma de pruebas Modelo 1



Figura 108: Ejemplificación de colocación de argolla plataforma de pruebas Modelo 1

### 12.3. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2

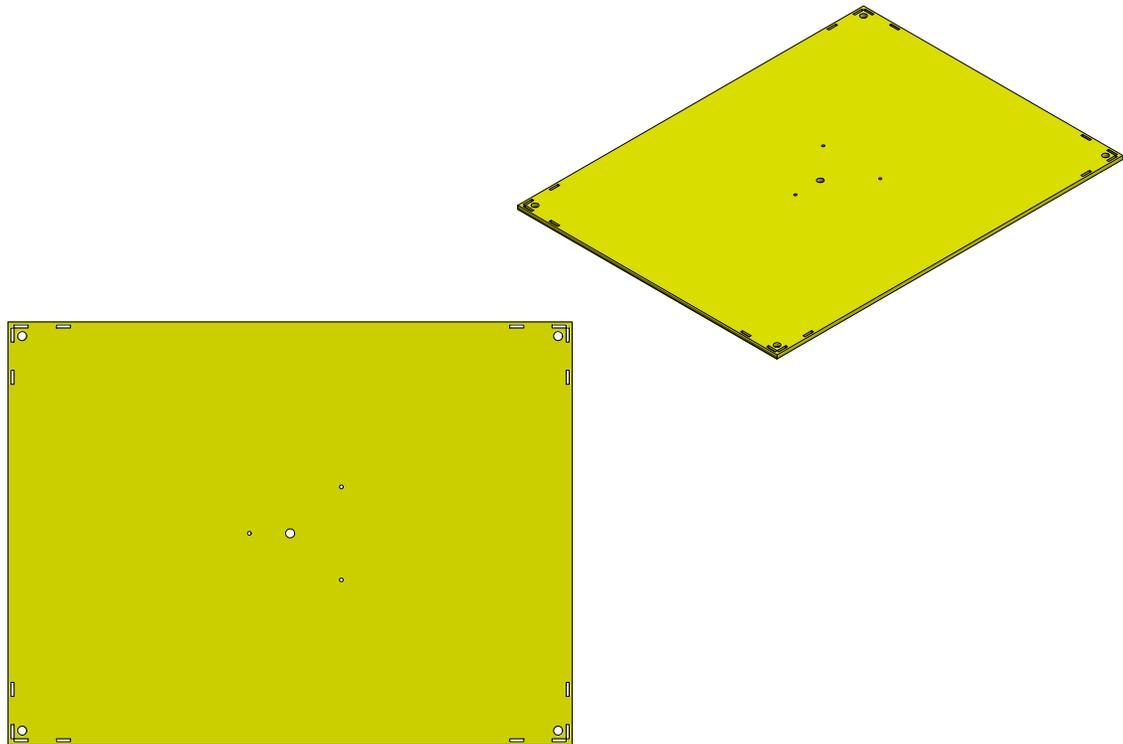


Figura 109: Diseño de superficie de plataforma de pruebas Modelo 2

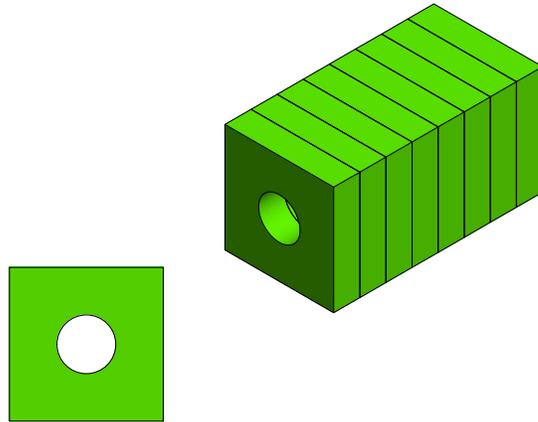
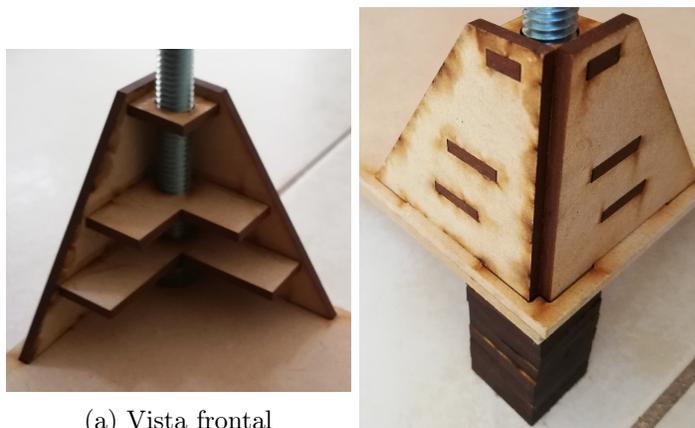


Figura 110: Diseño de patas plataforma Modelo 2



Figura 111: Pata de plataforma Modelo 2



(a) Vista frontal

(b) Vista trasera

Figura 112: Escuadra de soporte para plataforma de pruebas Modelo 2



Figura 113: Unión de superficies con patas, varillas roscadas y escuadras



Figura 114: Ejemplificación de nudos de sujeción



Figura 115: Topes de guías

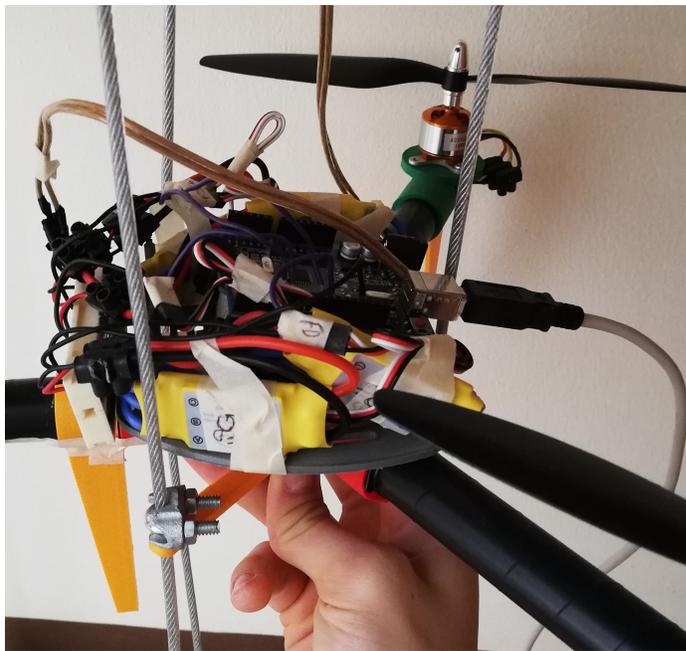


Figura 116: Ejemplificación tope dron con guía

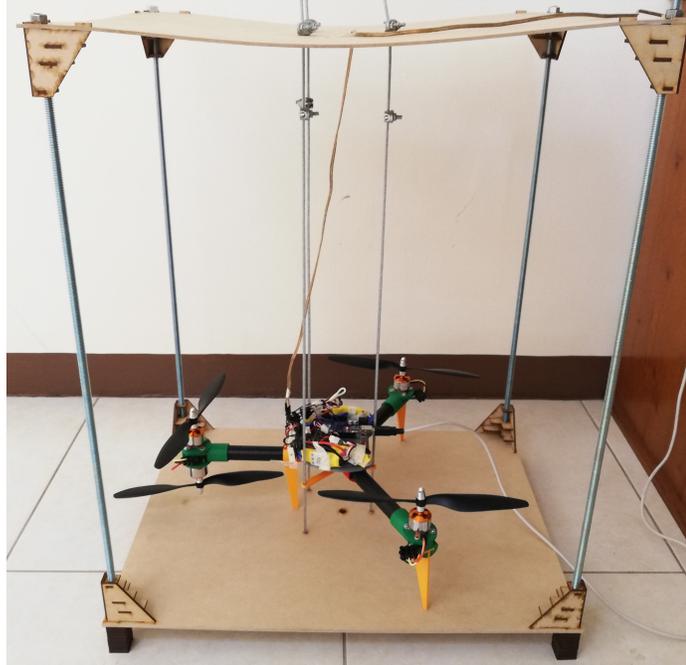


Figura 117: Modelo 2 plataforma de pruebas de vuelo con dron

#### 12.4. Figuras de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 3



(a) Rótula completa



(b) Rótula insertada en varilla

Figura 118: Rótula fabricada para plataforma de prueba de vuelo Modelo 3



Figura 119: Modelo 3 de plataforma de pruebas de vuelo

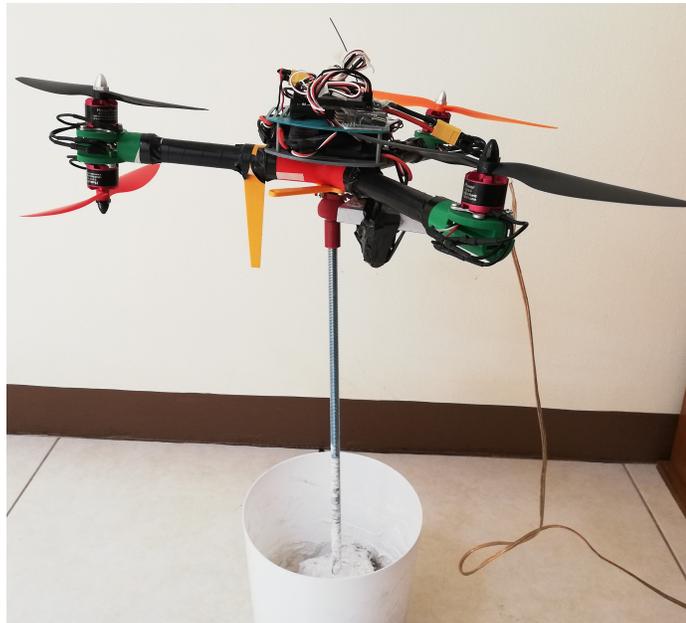
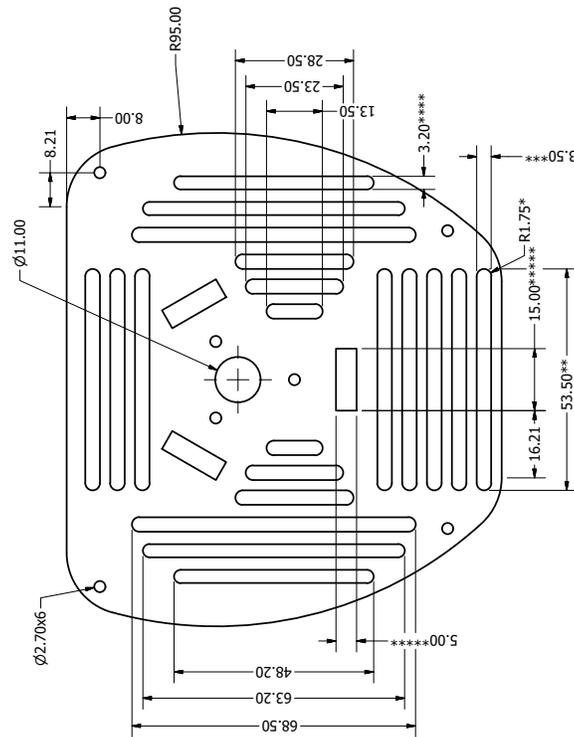
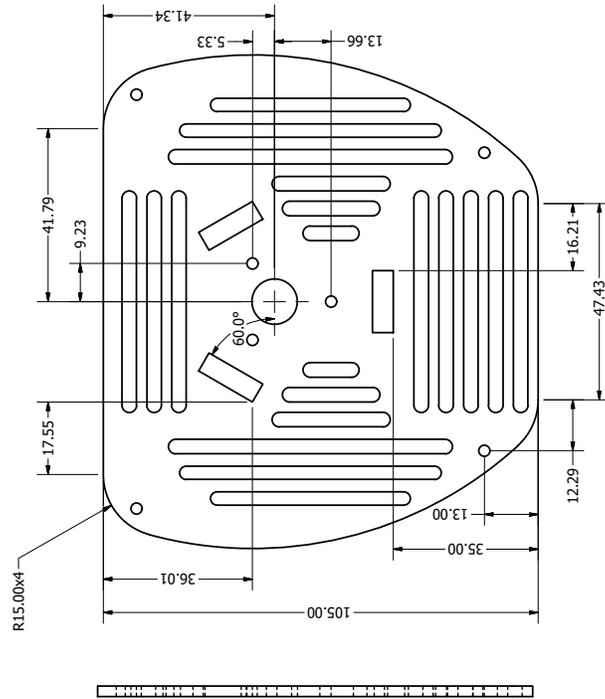
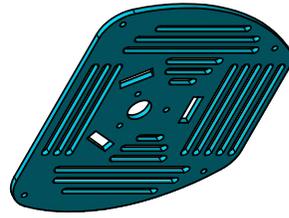


Figura 120: Modelo 3 plataforma de pruebas de vuelo con dron





NOTA:  
 Todas las medidas se encuentran en milímetros  
 Grosor de la pieza 2,5 mm  
 \*Todas la elipses poseen esta medida  
 \*\*Todas las elipses horizontales poseen esta medida  
 \*\*\*Todas las elipses poseen esta medida, excepto las 2 últimas verticales  
 \*\*\*\*Las 2 últimas elipses poseen esta medida  
 \*\*\*\*\*Todos los cuadros poseen esta medida

Figura 122: Plano base superior cuerpo

NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros  
 \*El resto de dimensiones son iguales a la Base Superior del Cuerpo

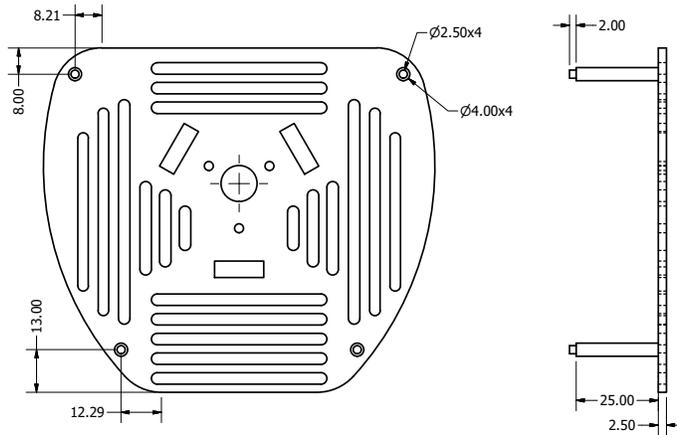
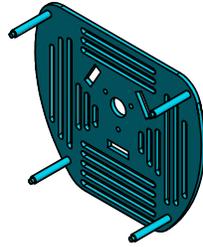
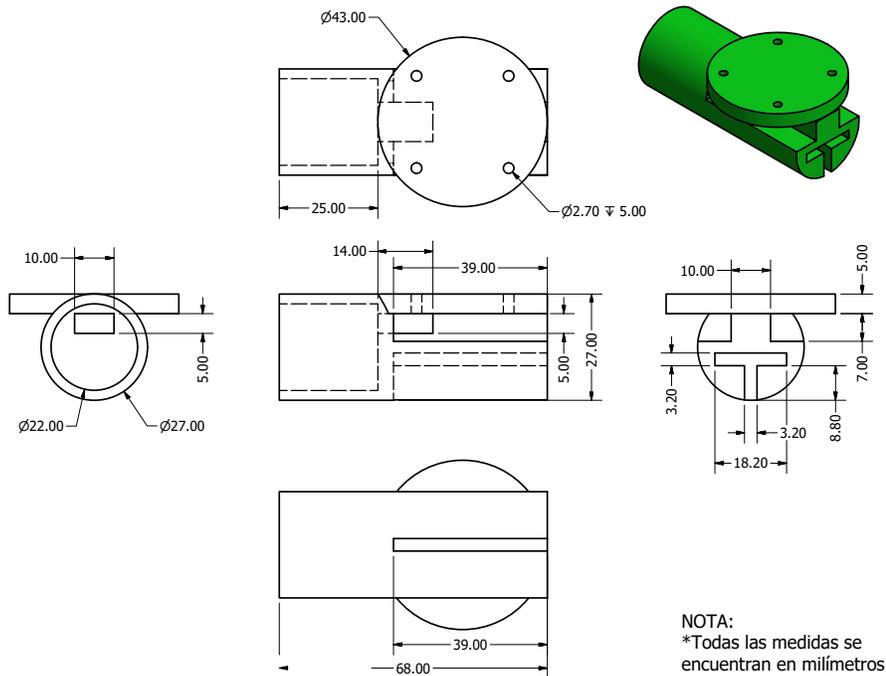


Figura 123: Plano base inferior cuerpo



NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros

Figura 124: Plano base motor frontal

NOTA:  
\*Todas las medidas se encuentran en milímetros

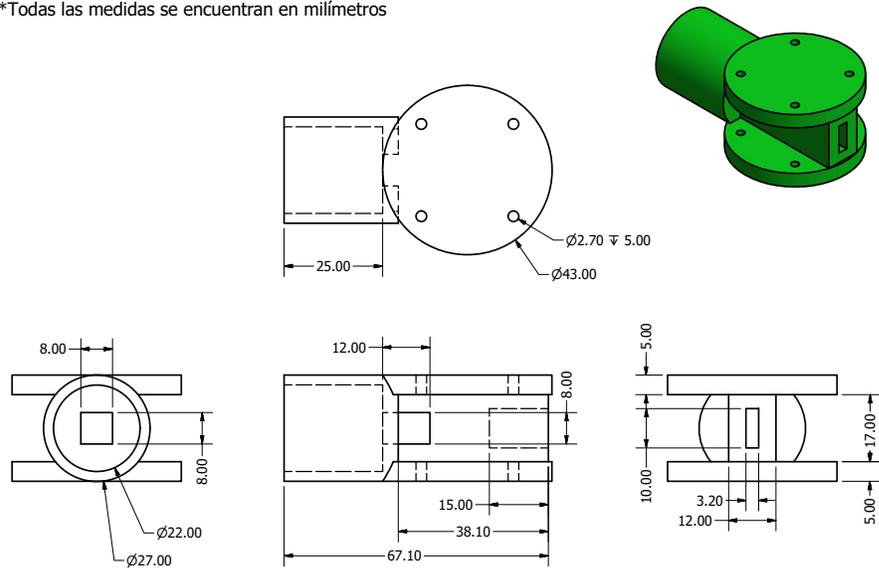


Figura 125: Plano base motores colineales

NOTA:  
Todas las medidas se encuentran en milímetros

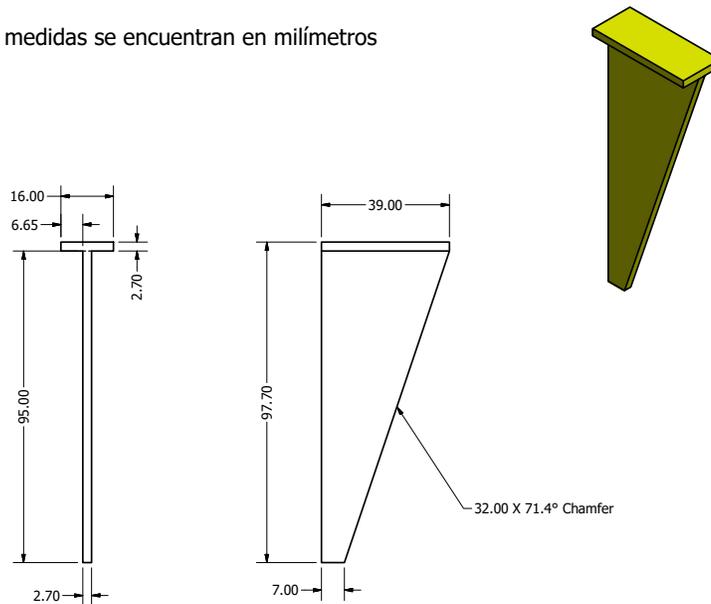


Figura 126: Plano soporte brazo frontal

NOTA:  
Todas las medidas se encuentran en milímetros

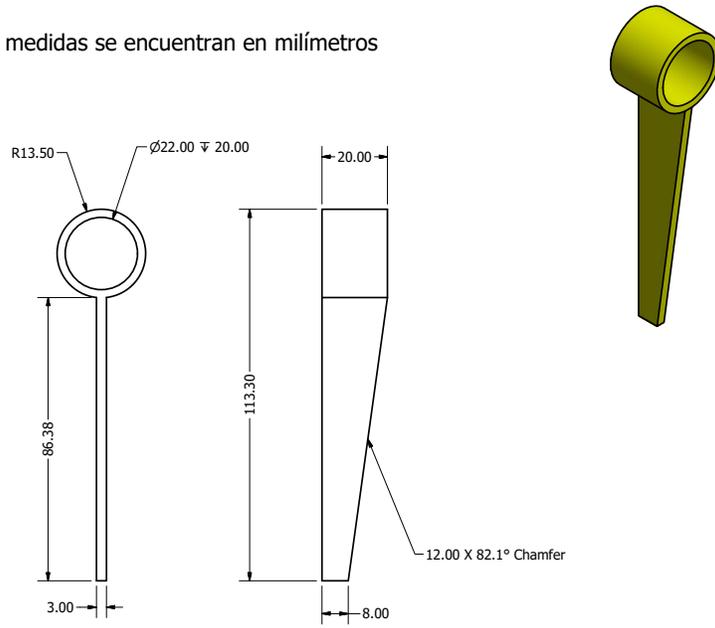


Figura 127: Plano soporte brazo trasero

NOTA:  
Todas las medidas se encuentran en milímetros

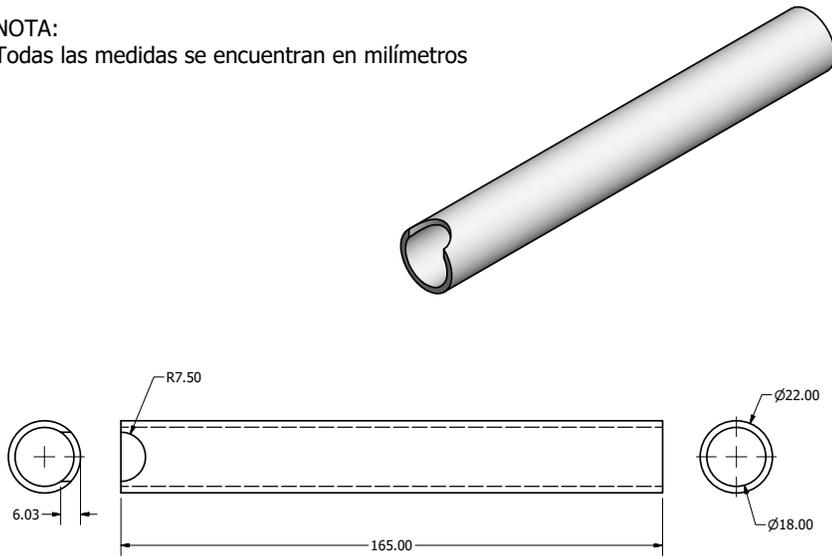


Figura 128: Plano brazo

NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros  
 \*La pieza posee un chamfer de 1 mm en su orilla

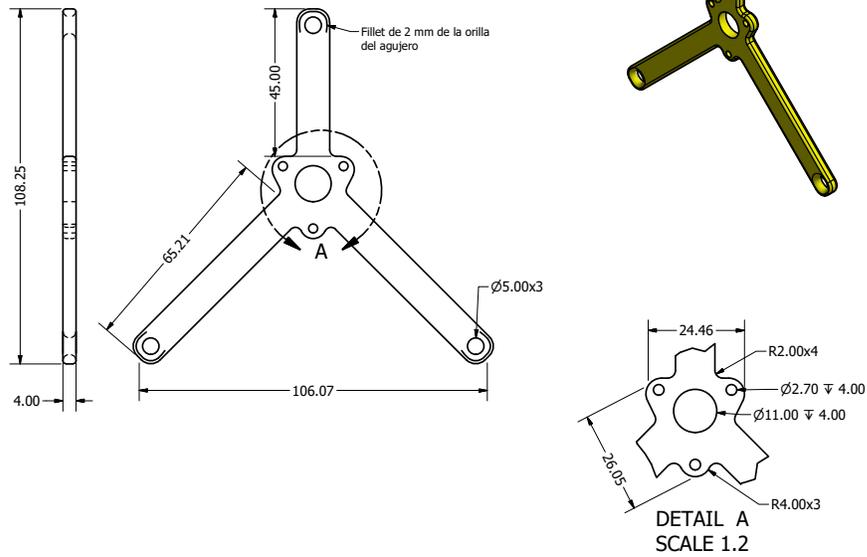


Figura 129: Plano guía para pruebas de vuelo

## 12.5.2. Planos de estructura de dron Modelo 5

NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros.

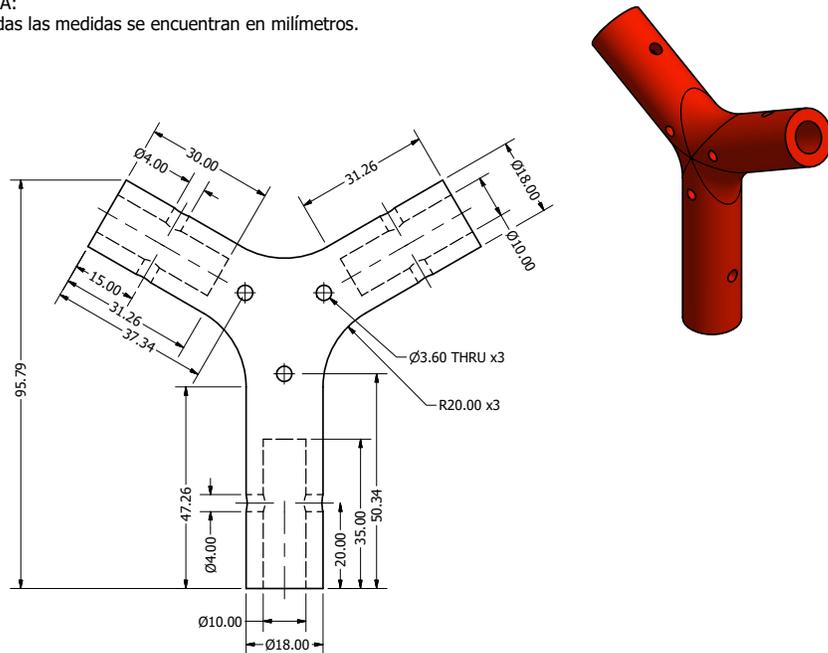


Figura 130: Plano unión Y Modelo 5

NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros

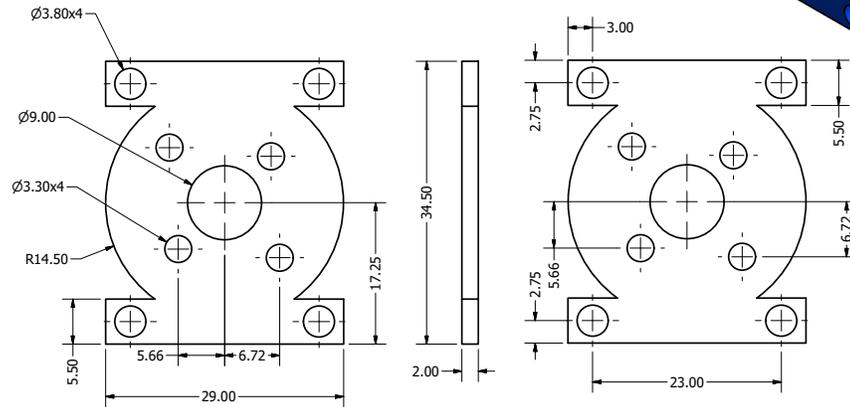


Figura 131: Base motores Modelo 5

NOTA:  
 \*Todas las medidas se encuentran en milímetros

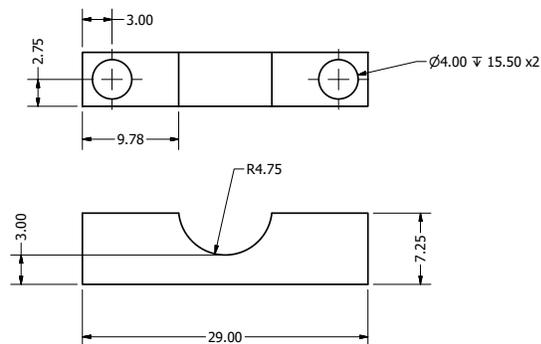
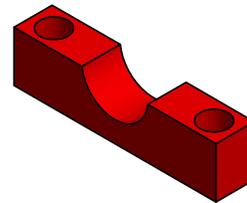


Figura 132: Plano unión base motores con brazo Modelo 5

NOTA:  
\*Todas las medidas se encuentran en milímetros

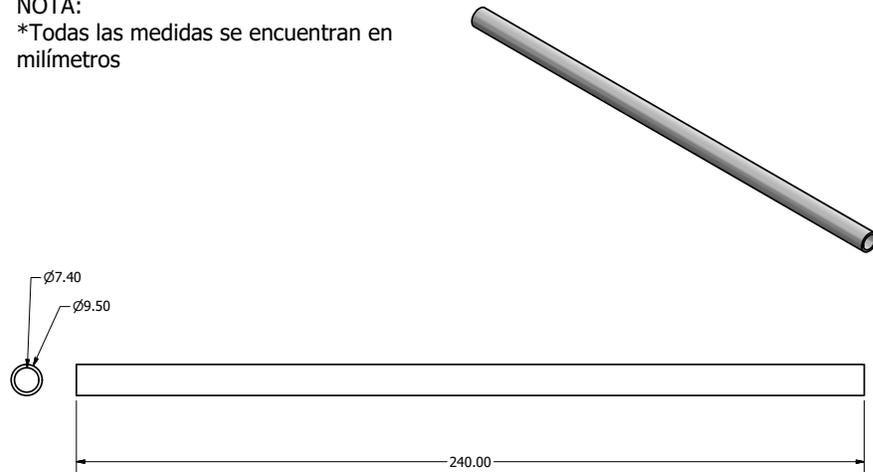


Figura 133: Plano brazo Modelo 5

NOTA:  
\*Todas las medidas se encuentran en milímetros y las medidas del soporte contrario son las mismas, solo que este está invertido

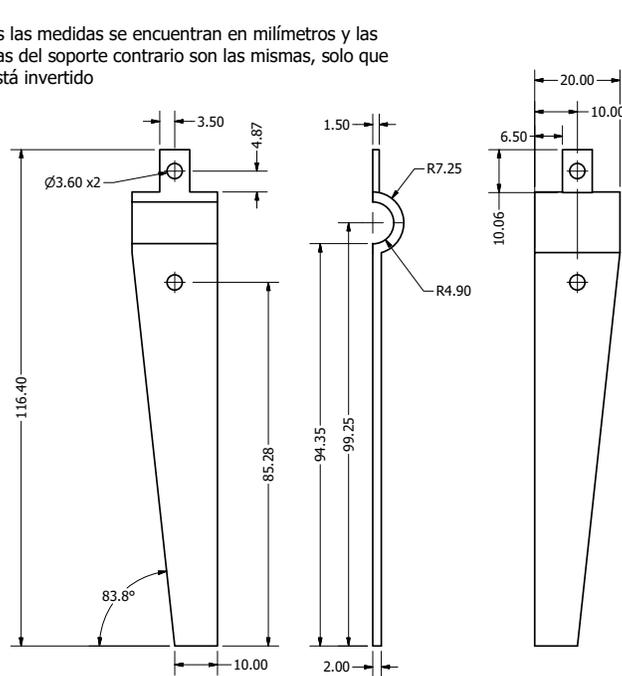


Figura 134: Plano soporte Modelo 5

### 12.5.3. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1

NOTA:  
\*Las medidas estan en milímetros  
\*El grosor es 3.2 mm

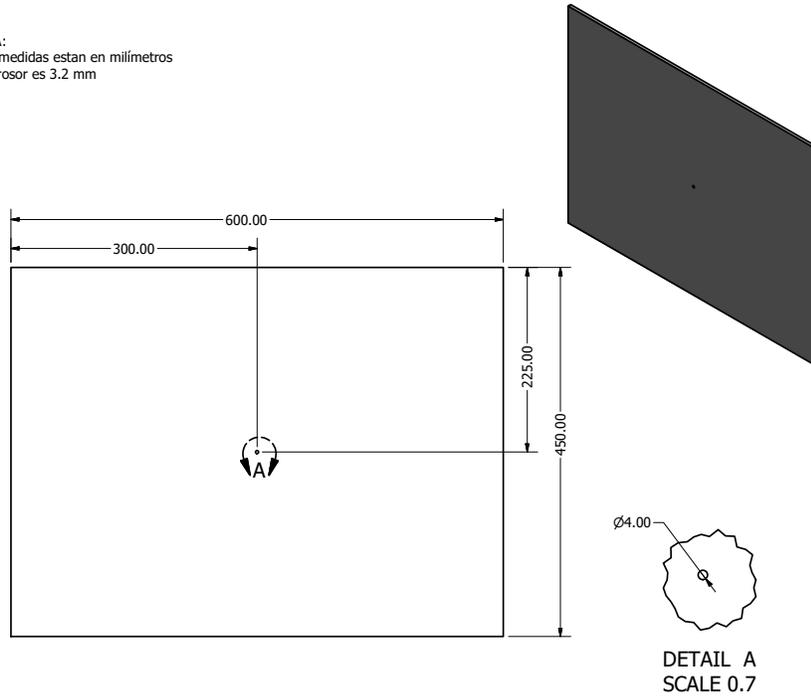


Figura 135: Plano de superficie de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1

NOTA:  
\*Las medidas estan en milímetros

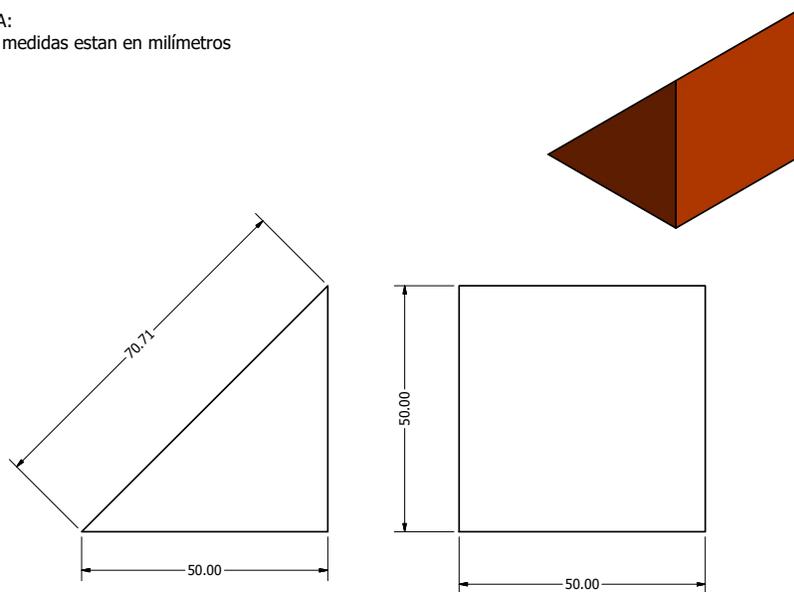


Figura 136: Plano de patas de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 1

### 12.5.4. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2

NOTA:  
 -Todas la medidas se encuentran en milímetros  
 -Grosor de la pieza 6.4 mm

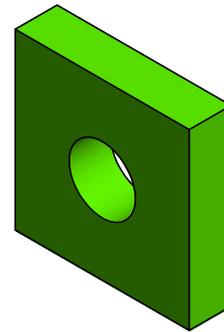
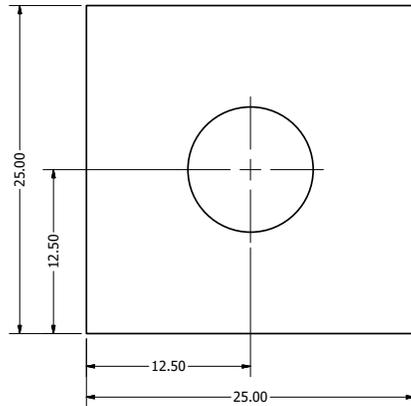


Figura 137: Plano de patas de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2

NOTA:  
 -Todas la medidas se encuentran en milímetros  
 -Grosor de la superficie 6.4 mm

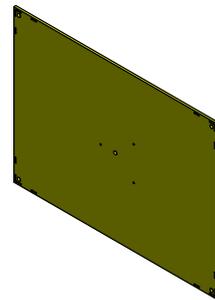
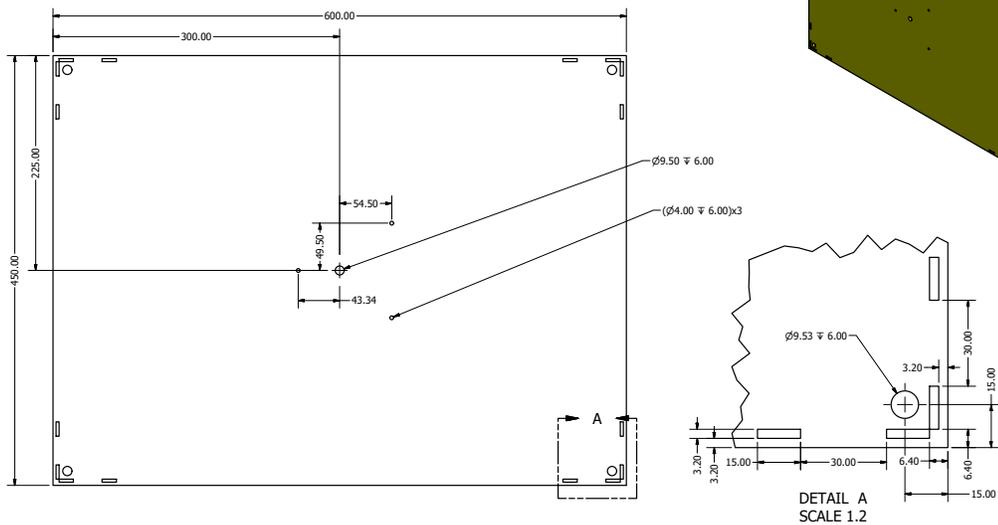


Figura 138: Plano de superficie inferior y superior de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 2

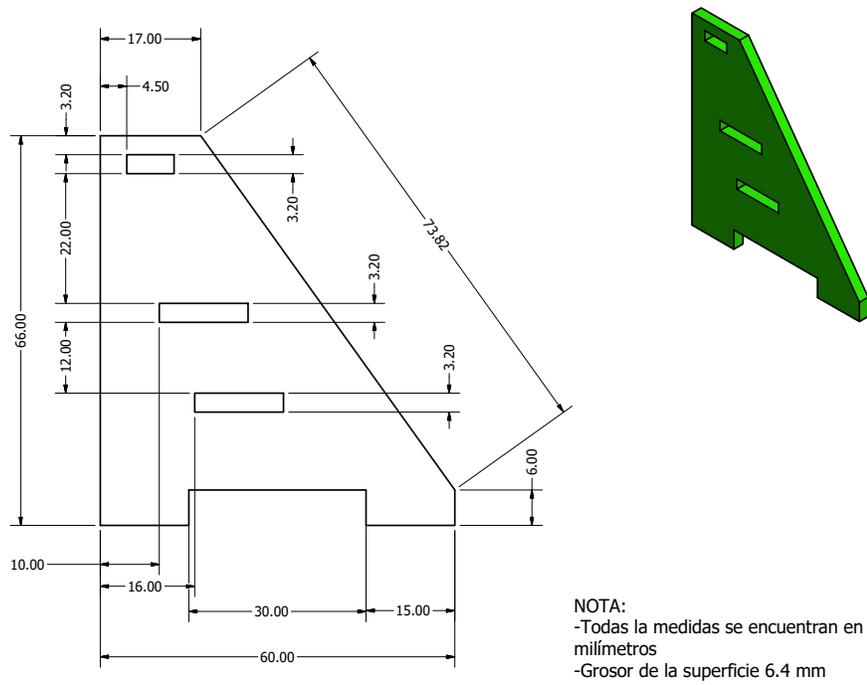


Figura 139: Plano de parte lateral de escuadra

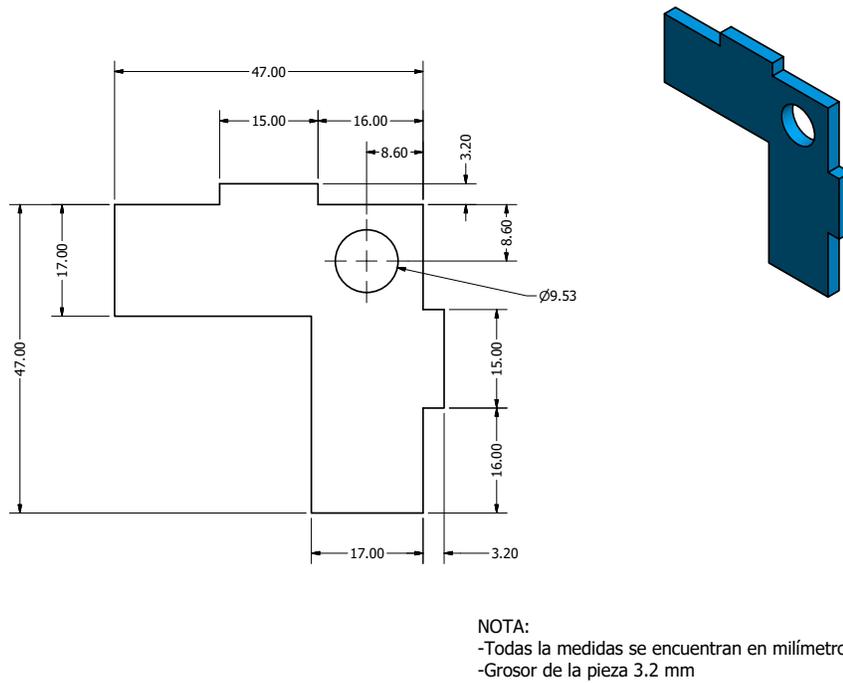
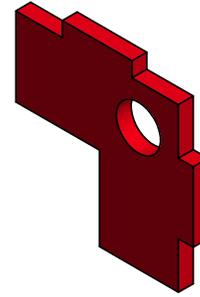
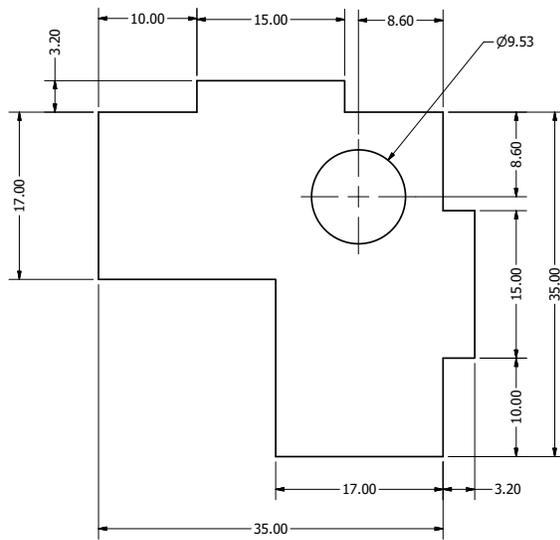
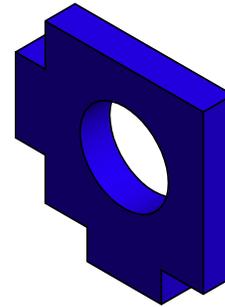
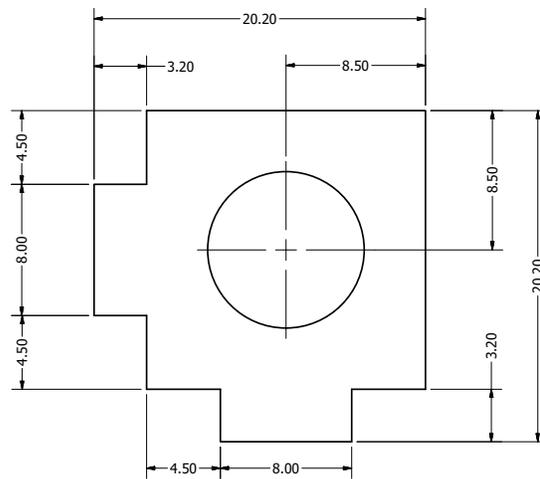


Figura 140: Plano de unión inferior de escuadra



NOTA:  
 -Todas la medidas se encuentran en milímetros  
 -Grosor de la pieza 3.2 mm

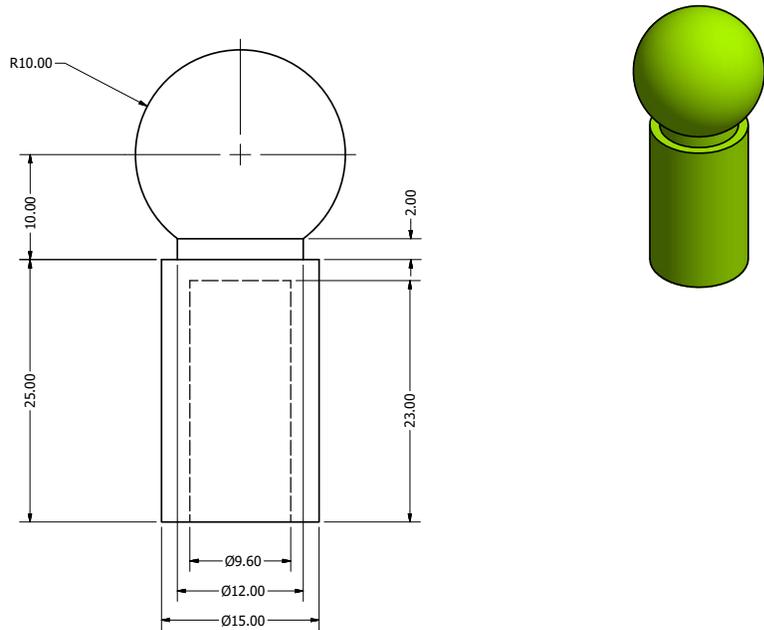
Figura 141: Plano de unión media de escuadra



NOTA:  
 -Todas la medidas se encuentran en milímetros  
 -Grosor de la pieza 3.2 mm

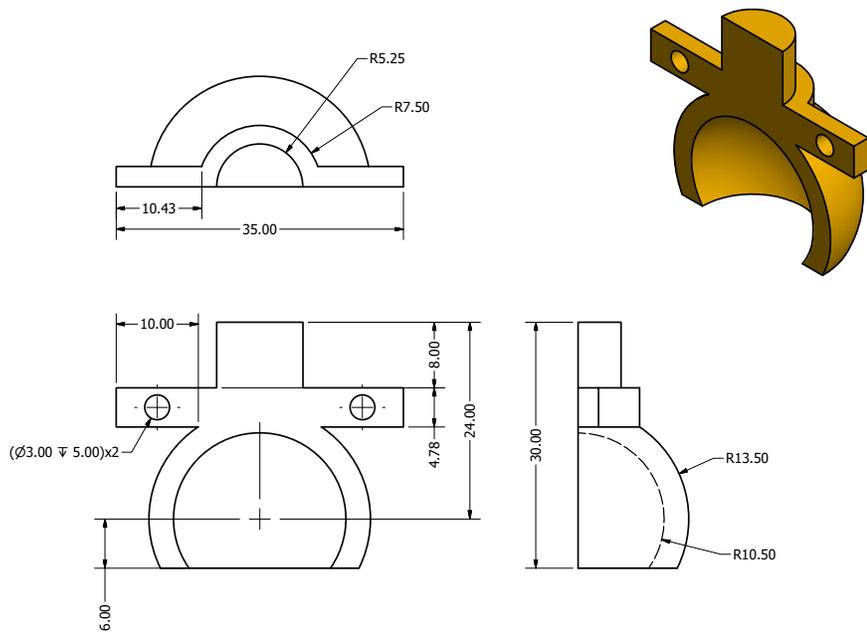
Figura 142: Plano de unión superior de escuadra

### 12.5.5. Planos de plataforma de pruebas de vuelo Modelo 3



Nota: Todas las medidas se encuentran en milímetros

Figura 143: Plano de rótula



Nota: Todas las medidas se encuentran en milímetros

Figura 144: Plano pieza superior rótula

