

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Plataforma de pruebas y ajustes de sistemas de control para
vehículos multirrotores**

Trabajo de graduación presentado por Gabriel Andrés Martínez López
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

Guatemala,

2019

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



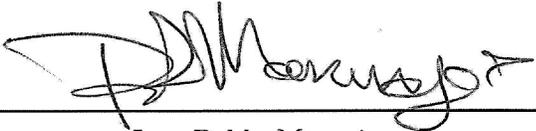
**Plataforma de pruebas y ajustes de sistemas de control para
vehículos multirrotores**

Trabajo de graduación presentado por Gabriel Andrés Martínez López
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Electrónica

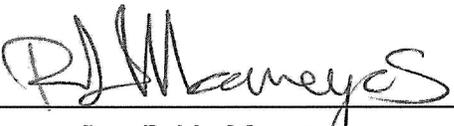
Guatemala,

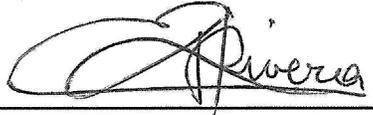
2019

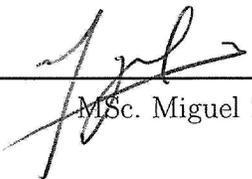
Vo.Bo.:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

Tribunal Examinador:

(f) 
Ing. Pablo Mazariegos

(f) 
Dr. Luis Rivera

(f) 
MSc. Miguel Zea

Fecha de aprobación: Guatemala, 6 de diciembre de 2019.

El siguiente trabajo fue realizado bajo la supervisión del Ingeniero Pablo Mazariegos de la Cerda y el Ingeniero Luis Montenegro Mejicanos, quiero expresar mi agradecimiento por guiarme en el proceso de desarrollo e implementación de este proyecto.

Agradezco el apoyo brindado por Hidrocortes de Guatemala, por los servicios de cortes en aluminio para la producción de las plataformas de pruebas; de igual manera agradezco a Industrias Sacramento, por los servicios de maquinado para las piezas utilizadas en las plataformas de pruebas.

Quiero agradecer a mis padres por apoyarme en toda mi vida académica y guiarme en el camino de volverme un profesional exitoso, sin ellos no podría ser la persona que soy ahora. Y por último quiero agradecer a todas aquellas personas que me han acompañado a lo largo de estos años, que han llenado mi vida universitaria de muchas memorias inolvidables.

| | |
|--|-------------|
| Prefacio | v |
| Lista de figuras | xI |
| Lista de cuadros | xIII |
| Resumen | xv |
| Abstract | xvII |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Antecedentes | 3 |
| 2.1. Requerimientos de la universidad | 3 |
| 2.2. Trabajos similares | 3 |
| 3. Justificación | 5 |
| 4. Objetivos | 7 |
| 4.1. Objetivo general | 7 |
| 4.2. Objetivos específicos | 7 |
| 5. Alcance | 9 |
| 6. Marco teórico | 11 |
| 6.1. Sistemas de control | 11 |
| 6.1.1. Control clásico | 11 |
| 6.2. Quadcopter | 12 |
| 6.2.1. Control de actitud de un Quadcopter | 13 |
| 6.3. Anillo colector | 14 |
| 6.4. Codificador rotacional | 14 |
| 6.5. Microcontrolador de placa reducida | 15 |
| 6.6. Quadcopter Crazyflie 2.0 | 16 |
| 6.7. Quadcopter Parrot AR 2.0 | 16 |

| | |
|---|-----------|
| 7. Metodología | 19 |
| 7.1. Dimensionamiento de los quadcopters | 19 |
| 7.2. Delimitación de requerimientos para las plataformas de pruebas | 20 |
| 8. Desarrollo para plataforma de pruebas Parrot AR 2.0 | 23 |
| 8.1. Prueba de concepto | 23 |
| 8.2. Sensores y distribución de energía | 24 |
| 8.3. Diseño primer prototipo | 25 |
| 8.3.1. Plataforma central: eje de cabeceo | 25 |
| 8.3.2. Aro intermedio: eje de alabeo | 26 |
| 8.3.3. Aro externo: eje de guiñada | 31 |
| 8.4. Implementación primer prototipo | 32 |
| 8.4.1. Fabricación de la plataforma de pruebas | 32 |
| 8.4.2. Ensamblaje de plataforma de pruebas | 34 |
| 8.5. Implementación segundo prototipo | 35 |
| 8.6. Implementación final | 43 |
| 9. Plataforma de pruebas Crazyflie 2.0 | 49 |
| 9.1. Desarrollo para plataforma de pruebas Crazyflie 2.0 | 49 |
| 9.2. Prueba de concepto | 49 |
| 9.3. Primer prototipo | 51 |
| 9.4. Segundo prototipo | 53 |
| 10. Conclusiones | 55 |
| 11. Recomendaciones | 57 |
| 12. Bibliografía | 59 |
| 13. Anexos | 61 |
| 13.1. Planos de construcción | 61 |

Lista de figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Estructura de un controlador PID. [6] | 12 |
| 2. | Quadcopter open source Crazyflie 2.0. | 12 |
| 3. | Movimientos de un quadcopter. [3] | 13 |
| 4. | Partes de un anillo colector de tipo cápsula. [10] | 14 |
| 5. | Funcionamiento de un codificador rotacional óptico. [11] | 15 |
| 6. | Microcontrolador de placa reducida launchpad Tiva C. [14] | 15 |
| 7. | Quadcopter Parrot AR 2.0. [17] | 17 |
| 8. | Modelo 3D Crazyflie 2.0. | 19 |
| 9. | Modelo 3D Parrot AR 2.0. | 20 |
| 10. | Diseño para la plataforma Parrot AR 2.0. | 23 |
| 11. | Modelo 3D del codificador rotacional LPD3806-600BM. | 24 |
| 12. | Modelo 3D del anillo colector SENRING M220-12S. | 25 |
| 13. | Modelo 3D de la plataforma central. | 25 |
| 14. | Modelo 3D del receptor para eje de cabeceo. | 26 |
| 15. | Modelo 3D de la plataforma central con receptores. | 26 |
| 16. | Modelo 3D de aro de alabeo. | 27 |
| 17. | Modelo 3D de la versión temprana para la pieza de montaje del anillo colector y codificador rotacional. | 27 |
| 18. | Modelo 3D de montaje del cojinete. | 28 |
| 19. | Modelo 3D de montaje del codificador rotacional. | 28 |
| 20. | Modelo 3D de montaje del anillo colector. | 29 |
| 21. | Modelo 3D de las partes del montaje para el codificador rotacional. | 29 |
| 22. | Ensamblado 3D del montaje del anillo colector. | 29 |
| 23. | Modelo 3D del receptor para el eje de alabeo. | 30 |
| 24. | Modelo 3D de anillo central con sensores y receptores. En el lado izquierdo se puede observar montado el codificador rotacional, mientras en el derecho se encuentra montado el anillo colector. | 30 |
| 25. | Modelo 3D de anillo externo con sensores y receptores. | 31 |
| 26. | Ensamble 3D del primer diseño de prototipo para la plataforma de pruebas Parrot AR 2.0 | 31 |
| 27. | Vector para cortadora láser de aro intermedio. | 32 |

| | | |
|-----|---|----|
| 28. | Vector para cortadora láser de aro externo. | 32 |
| 29. | Segmentos de aro intermedio y plataforma central cortados en MDF 6 mm. . . | 33 |
| 30. | Proceso de rebanado para impresión 3D de una pieza en el software Cura. . . | 33 |
| 31. | Piezas impresas PLA y Policarbonato. | 33 |
| 32. | Piezas impresas PLA y Policarbonato. | 34 |
| 33. | Fuerza aplicada sobre el receptor para eje de cabeceo. | 35 |
| 34. | Falla en receptor para eje de cabeceo. | 35 |
| 35. | Receptor para eje de cabeceo maquinado en ertalon. | 36 |
| 36. | Rebanado para impresión 3D del diseño actualizado del receptor para eje de cabeceo. | 36 |
| 37. | Rebanado para impresión 3D del diseño actualizado del receptor para eje de cabeceo. | 37 |
| 38. | Proceso de hidrocorte de aluminio. | 37 |
| 39. | Aros y plataforma central en aluminio 2 mm. | 38 |
| 40. | Modelo 3D de segunda versión montaje de cojinete. | 38 |
| 41. | Modelo 3D de segunda versión montaje del anillo colector. | 39 |
| 42. | Modelo 3D de segunda versión montaje del codificador rotacional. | 39 |
| 43. | Ensamblado 3D del montaje actualizado. | 40 |
| 44. | Acopladores de Ertalon. Acoplador de anillo colector en la izquierda, acoplador de codificador en la derecha. | 40 |
| 45. | Diagrama de tiempo y estados del codificador rotacional. | 41 |
| 46. | Segundo prototipo de plataforma de pruebas con quadcopter Parrot AR 2.0 . . | 42 |
| 47. | Montaje de codificador en grado de libertad de guiñada. | 43 |
| 48. | Montaje de anillo colector en grado de libertad de guiñada. | 44 |
| 49. | Diseño de carcasa para plataforma de pruebas. | 45 |
| 50. | Diseño de ensamblaje final de plataforma de pruebas. | 45 |
| 51. | Ensamblaje de plataforma de pruebas. | 46 |
| 52. | Plataforma de pruebas para quadcopters | 46 |
| 53. | Pruebas de sistemas de control en plataforma de pruebas para quadcopters . . | 47 |
| 54. | Diseño con rótula de articulación para plataforma de pruebas del crazyflie 2.0 | 50 |
| 55. | Ensamblaje de plataforma de pruebas utilizando rotula de articulación | 50 |
| 56. | Diseño con unión universal para plataforma de pruebas del Crazyflie 2.0 . . . | 51 |
| 57. | Ensamblaje de plataforma de pruebas utilizando unión universal. | 52 |
| 58. | Impresión de plataforma de pruebas con uniones universales. | 52 |
| 59. | Diseño segundo prototipo para plataforma de pruebas Crazyflie 2.0 | 53 |
| 60. | Pruebas de actitud en el segundo prototipo de la plataforma de pruebas para el Crazyflie 2.0 | 54 |
| 61. | Planos receptor eje de alabeo y guiñada. | 61 |
| 62. | Planos receptor eje de cabeceo. | 62 |
| 63. | Planos montaje de cojinete. | 63 |
| 64. | Planos montaje del codificador rotacional. | 64 |
| 65. | Planos montaje del anillo colector. | 65 |
| 66. | Planos plataforma central. | 66 |
| 67. | Planos segmento anillo intermedio. | 67 |
| 68. | Planos segmento anillo exterior. | 68 |
| 69. | Planos acoplador anillo colector. | 69 |

| | |
|--|----|
| 70. Planos acoplador codificador rotacional. | 70 |
|--|----|

Lista de cuadros

1. Tabla de estados 42

Este trabajo consiste en el proceso de diseño e implementación de plataformas para realizar pruebas sobre los sistemas de control de actitud para los multirrotores crazyflie 2.0 y Parrot AR 2.0. Esta plataforma será utilizada para diseñar, configurar y evaluar el desempeño de algoritmos de control de actitud en los quadcopters mencionados.

El procesó inició con la toma de medidas de los multirrotores crazyflie 2.0 y el Parrot AR 2.0, seguido se procedió a establecer las capacidades de cada quadcopter con el fin de delimitar los requerimientos para cada plataforma de pruebas. Seguido se procedió a diseñar una prueba de concepto para cada una de las plataformas.

Con las pruebas de concepto se procedió a diseñar una serie de prototipos para cada plataforma de pruebas, estos prototipos fueron posteriormente implementados para poder encontrar posibles mejoras en cada iteración.

Finalmente se implementó un prototipo final para cada plataforma:

- El prototipo de la plataforma del Parrot AR 2.0 es un diseño de tipo suspensión cardán de tres grados de libertad. Este esta compuesto por un aro externo, el cual proporciona permite el movimiento de guiñada; un aro interno, el cual permite el movimiento de alabeo; y una plataforma centra, la cual retiene al quadcopter y permite el movimiento de cabeceo. Cada eje de los aros posee un codificador rotacional con el objetivo de enviar retroalimentación al usuario sobre el desempeño del sistema de control implementado en el quadcopter.
- El prototipo final de la plataforma del crazyflie 2.0 es un diseño simplificado de suspensión cardan de un grado de libertad. Esta esta compuesta de una plataforma central que permite el movimiento de cabeceo o alabeo dependiendo de la orientación del quadcopter. El eje de movimiento posee un codificador rotacional con el objetivo de enviar retroalimentación al usuario sobre el desempeño en el grado de libertad a evaluar, ya sea este cabeceo o alabeo.

This work consists of the process of designing and implementing test benches to perform tests on attitude control systems for crazyflie 2.0 and Parrot AR 2.0 multirotors. This platform will be used to design, configure and evaluate the performance of attitude control algorithms in the mentioned quadcopters.

The process began with taking measurement of the crazyflie 2.0 multirotors and the Parrot AR 2.0, followed by proceeding to establish the capabilities of each quadcopter in order to delimit the requirements for each test platform. Then we proceeded to design a proof of concept for each of the platforms.

Starting from the proof of concept, a series of prototypes were designed for each test platform, these prototypes were subsequently implemented to find possible improvements in each iteration.

Finally, a final prototype was implemented for each platform:

- The prototype of the Parrot AR 2.0 platform is a gimbal suspension design with three degrees of freedom. This is composed of an outer ring, which provides allows yaw movement; an inner ring, which allows the roll movement; and a central platform, which retains the quadcopter and allows the pitch movement. Each axis of the rings has a rotary encoder with the objective of sending feedback to the user about the performance of the control system implemented in the quadcopter.
- The final prototype of the crazyflie 2.0 platform is a simplified cardan suspension design with a single degree of freedom. This is composed of a central platform that allows the movement of pitching or roll depending on the orientation of the quadcopter. The axis of movement has a rotary encoder encoder with the objective of sending feedback to the user about the performance in the degree of freedom to be evaluated, whether this pitch or roll.

Un multirrotor es un tipo de vehículo de ala rotativa compuesto por más de dos rotores. Una ventaja de los multirrotores a diferencia de los helicópteros de una hélice o dos hélices es que un multirrotor utiliza hélices de ángulo fijo por lo que pueden variar los ángulos de actitud de la aeronave variando únicamente las revoluciones por minuto en los motores. Debido a como está diseñado un multirrotor, es importante que cada uno de los motores funcione de manera adecuada para evitar estrellar la aeronave. Es por ello que el controlador de vuelo debe estar correctamente configurado y ser lo suficientemente robusto para no ser derribado por ligeras perturbaciones.

Este proyecto tiene como objetivo implementar una plataforma de pruebas para el controlador de vuelo de un quadcopter, específicamente el mini quadcopter crazyflie 2.0 y el quadcopter Parrot AR 2.0. La plataforma permitirá a la aeronave moverse en tres grados de libertad y probar el controlador de la actitud en el cabeceo, alabeo y la guiñada; para el caso de la plataforma para el parrot AR 2.0, la plataforma deberá permitir la medición de cada uno de los tres grados de libertad mencionados anteriormente, estos ángulos serán procesados por medio de un microcontrolador de placa reducida para generar la retroalimentación hacia una PC.

Las plataformas de pruebas serán posteriormente utilizadas en el curso de sistemas de control. Esto con el objetivo de poder evaluar el desempeño de los algoritmos de control aprendidos en una aplicación real como lo son los multirrotores. Estas plataformas permitirán al usuario, mientras se usen adecuadamente, un ambiente libre de peligro tanto para usuario como para el multirrotor en uso. Esto permitirá al usuario despreocuparse de posible accidentes y enfocarse en la optimización y ajuste correcto de los algoritmos de control implementados en el multirrotor.

2.1. Requerimientos de la universidad

Debido a que las plataformas de pruebas para multirrotores serán utilizadas para los cursos de sistemas de control 1 y sistemas de control 2, fue necesario reunirse con los catedráticos para establecer los requerimientos que estas deben poseer. Durante esta reunión se estableció que las plataformas deben ser fáciles de utilizar, así como también fáciles de ensamblar y reparar en caso de una falla. Las plataformas también deben proveer cierto grado de seguridad al usuario y al multirrotor utilizado, esto quiere decir que, bajo las condiciones correctas de uso, cualquier usuario pueda realizar pruebas sobre los algoritmos de los sistemas de control de actitud para cada quadcopter.

2.2. Trabajos similares

4DOF QUADCOPTER: DEVELOPMENT MODELING AND CONTROL

Este trabajo fue realizado por Santos Barbosa F. en el describe el proceso de desarrollo de un prototipo de quadcopter que permite el movimiento en cuatro grados de libertad, siendo estos cabeceo, alabeo guiñada y altitud. En este trabajo se implementa una plataforma para probar el desempeño de los algoritmos de control, esta plataforma permite el movimiento en los cuatro ejes mencionados.

La plataforma utiliza una rótula mecánica para permitir el movimiento de cabeceo, alabeo y guiñada, para permitir el movimiento en altitud se utiliza un rodamiento lineal conectado a una barra el cual permite el desplazamiento en ese eje. Para generar retroalimentación al usuario esta depende de los sensores a bordo del quadcopter.

Más información acerca de este trabajo puede encontrarse en [1]

Development of the Test Platform for Rotary Wing Unmanned Air Vehicle

Este trabajo consiste en la implementación de una plataforma de pruebas para multirrotores, esto con el propósito de probar el desempeño de los sistemas de control en los ejes de cabeceo, alabeo, guiñada y elevación sin el problema de estrellar el multirroto.

La plataforma consiste de un diseño de suspensión cardán, inspirado en un giroscopio. La plataforma permite el libre movimiento en los tres grados de libertad principales y uno adicional para altitud. La retroalimentación de la plataforma es obtenida mediante el uso de los sensores a bordo del quadcopter, esta información puede ser posteriormente visualizada utilizando una interfaz gráfica, lo cual permite el observar y evaluar el desempeño de los sistemas de control del quadcopter.

Más información acerca de este trabajo puede encontrarse en [2]

DESIGN OF MULTICOPTER TEST BENCH

Este trabajo consiste en la implementación de dos plataformas de pruebas para quadcopters. El primer diseño es una plataforma de pruebas de eje único, esto permite evaluar el desempeño de un algoritmo de control en el eje de cabeceo o alabeo, dependiendo de la orientación del quadcopter.

Por último se implementó una segunda plataforma, esta consiste en un diseño de rótula mecánica. Este diseño permite movimiento en los grados de libertad de cabeceo, alabeo y guiñada. La plataforma fue conectada a una PC, posteriormente los datos son visualizados en una PC utilizando LabView, esto permite evaluación en tiempo real de los algoritmos de control implementados en el multirroto.

Más información acerca de este trabajo puede encontrarse en [3]

Para calibrar el controlador es necesario realizar pruebas con la aeronave, pero debido a que está es susceptible a estrellarse en estas condiciones y el elevado precio de los componentes esto no es viable. Es por ello que este proyecto propone implementar una plataforma de pruebas, con el objetivo de ofrecer un ambiente en el cual pueda configurarse y probar adecuadamente los sistemas de control de vuelo de un multirrotor de forma segura y sin la posibilidad de dañar la integridad de la aeronave o sus componentes.

El proyecto surgió como una necesidad para utilizar los multirrotores crazyflie 2.0 para aplicar los algoritmos aprendidos en el curso de sistemas de control; sin embargo, debido a la agilidad y fragilidad de estos multirrotores es necesario diseñar una plataforma para realizar pruebas de control que sea segura tanto para el multirrotor, como para el usuario que realiza las pruebas. Luego el alcance se modificó para incluir una plataforma de pruebas para el multirrotor Parrot AR 2.0.

El sistema podrá ser utilizado en cursos de sistemas de control, las plataformas podrá ser utilizada con los quadcopters crazyflie 2.0 y Parrot AR 2.0 para implementar y probar sistemas de control de vuelo. Esta plataforma puede ser de utilidad para observar aplicaciones de los sistemas de control, especialmente en carreras como la electrónica y la mecatrónica. Por ejemplo, en los cursos de sistemas de control 1 y sistemas de control 2, esto con el objetivo que los conocimientos teóricos aprendidos en estos cursos puedan ser aplicados a una aplicación utilizada en la actualidad. La plataforma podrá utilizarse para que cada estudiante implemente su algoritmo de control (ya sea este control clásico o control moderno), y observar el desempeño del algoritmo implementado al estabilizar un sistema inestable como un quadcopter. Esto podría ayudar a los alumnos de estos cursos a consolidar y familiarizarse con los algoritmos de control aprendidos a lo largo de los cursos de sistemas de control en aplicación conocida y en un ambiente seguro.

4.1. Objetivo general

Implementar un ambiente de pruebas para implementación y configuración de sistemas de control de actitud para quadcopters crazyflie 2.0. y Parrot AR 2.0

4.2. Objetivos específicos

- Implementar una plataforma de pruebas que permita al quadcopter permanecer en un punto fijo, pero reteniendo los grados de libertad de alabeo, cabeceo y guiñada para el correcto ajuste del controlador de vuelo para quadcopters Crazyflie 2.0.
- Implementar una plataforma de pruebas que permita al quadcopter permanecer en un punto fijo, pero reteniendo los grados de libertad de alabeo, cabeceo y guiñada para el correcto ajuste del controlador de vuelo para quadcopters Parrot AR 2.0.
- Implementar comunicación entre la plataforma del Parrot AR 2.0 y una PC, con el objetivo de generar retroalimentación para ayudar en la implementación y configuración del controlador de vuelo.
- Evaluar la posibilidad de realizar cambios en los sistemas de control de vuelo para el Crazyflie 2.0. Ya sea únicamente cambios a los valores PID del controlador actual o un cambio total del controlador de vuelo.

El alcance de este proyecto consiste en el diseño e implementación de una plataforma de pruebas de sistemas de control para los multirrotores Crazyflie 2.0 y Parrot AR 2.0.

Para el quadcopter Parrot AR 2.0 se propone implementar una plataforma que permita el movimiento en los tres grados de libertad de actitud, siendo estos el movimiento de cabeceo, alabeo y guiñada. El movimiento en cada uno de estos ejes principales será medible mediante el uso de codificadores rotacionales de tipo lineal de dos canales, estos codificadores generan 600 pulsos por revolución, esto permite saber la posición, velocidad y dirección del movimiento en los grados de actitud del multirrotor. Para la distribución de energía y señales generadas por los codificadores rotacionales es necesario utilizar anillos colectores, estos poseen por 12 canales individuales para transmisión de energía o señales desde una plataforma estacionaria hacia una rotacional. Cada uno de los codificadores está conectado a un microcontrolador, este se encarga de enviar la retroalimentación del movimiento del quadcopter a una PC.

Para el crazyflie 2.0 se propone implementar una plataforma de pruebas que permita el movimiento en los tres grados de libertad principales de actitud, siendo estos cabeceo, alabeo y guiñada. Debido al bajo peso máximo de vuelo del crazyflie 2.0 es necesario que la plataforma sea lo suficientemente ligera para no impedir el movimiento del multirrotor. Con el objetivo de no agregar peso a la plataforma, el desempeño del sistema de control de actitud de la plataforma será evaluado utilizando los sensores a bordo del crazyflie 2.0.

6.1. Sistemas de control

Un sistema de control consiste en un ensamble de subsistemas, llamados plantas, que tienen como objetivo conseguir una salida deseada dada una entrada específica. [4]

El desempeño de un sistema de control puede medirse por dos atributos importantes:

- Respuesta transitoria: Es el cambio realizado por el sistema donde se va de un estado inicial a un estado final, el cual establecido por una entrada específica. [5]
- Respuesta en estado estacionario: Es la respuesta cuando se alcanza el estado del final y describe el comportamiento del sistema cuando el tiempo de respuesta tiende a infinito. Si la salida del sistema no es igual a la entrada del sistema, se dice que este posee un error en estado estacionario. [5]

Las teorías de control más utilizadas hoy en día son la teoría del control clásico y la teoría de control moderno. [5]

6.1.1. Control clásico

El control clásico es utilizado en la actualidad en sistemas lineales e invariantes en el tiempo de una entrada y una salida. [5]

Uno de los algoritmos de control clásicos más utilizados en la actualidad debido a su simplicidad es el controlador de tipo PID, este controlador es muy común en usos industriales ya que no es necesario conocer el modelo específico del modelo a controlar y posee un buen desempeño aunque no sea este el más óptimo [6]. La estructura de un controlador PID se puede observar en la Figura 1.

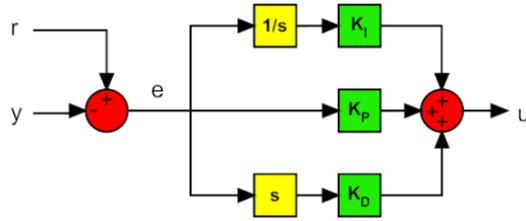


Figura 1: Estructura de un controlador PID. [6]

Un controlador PID posee tres partes fundamentales: una parte proporcional, una parte derivativa y una parte integral. La parte proporcional K_P del controlador es proporcional al error del sistema, aumentar este parámetro puede disminuir el tiempo de la respuesta transitoria, pero aumenta la posibilidad generar sobre impulsos y oscilaciones[7]. La parte derivativa K_D del controlador varía según la derivada del error, esta componente ayuda a minimizar el sobre impulso[6] por medio de compensaciones de alta frecuencia. [7] La parte integral K_I varía según la integral del error, esta componente ayuda a disminuir el error en el estado estable [6] por medio de compensaciones de baja frecuencia. [7]

6.2. Quadcopter

El término quadcopter define a un vehículo de ala rotativa que esta compuesto por cuatro rotores, cada uno de estos esta posicionado de forma simétrica alrededor de su centro. Una de las ventajas de un vehículo multirrotor es la simplicidad de su diseño, el uso de rotores de pala fija hace que la única forma de controlar estos vehículos sea mediante la variación de las revoluciones por minuto (RPM) de cada uno de los rotores. [8]

El diseño del quadcopter presenta varias ventajas, la principal es la simplicidad de aplicar algoritmos para controlar la actitud del vehículo. Esto se debe a que para variar la actitud en un multirrotor únicamente es necesario incrementar o disminuir la velocidad en cada uno de los rotores, mientras que para vehículos de un rotor o dos rotores es necesario variar el ángulo de las palas para conseguir cambios en la actitud. [8]



Figura 2: Quadcopter open source Crazyflie 2.0.

6.2.1. Control de actitud de un Quadcopter

Una de las configuraciones de vuelo más utilizadas en quadcopters es la configuración "-", esta configuración se puede observar claramente en la Figura 3. Esta configuración depende de un rotor al frente y uno atrás, mientras los dos rotores restantes se encuentran a los lados; el primer grupo de rotores gira en un sentido horario, mientras que el segundo gira en un sentido antihorario con el propósito de cancelar los torques provocados por los rotores. [8] Los movimientos básicos de un quadcopter son los siguientes:

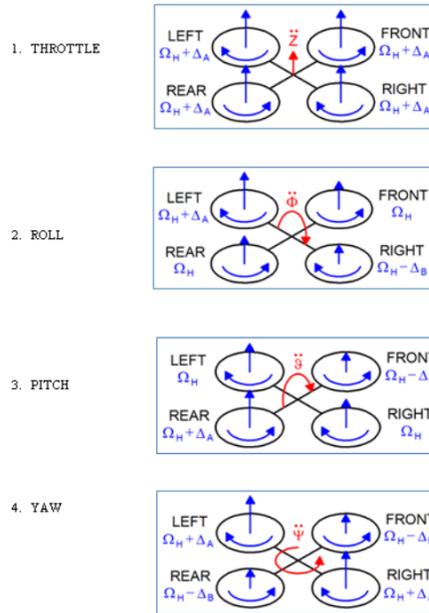


Figura 3: Movimientos de un quadcopter. [3]

- Cabeceo: Este movimiento se logra incrementando (o disminuyendo) la velocidad del rotor frontal mientras se disminuye (o incrementa) la velocidad del rotor posterior. Esto lleva a un aumento del torque sobre el ángulo de cabeceo del vehículo, consiguiendo así este movimiento. [6]
- Alabeo: Este movimiento se logra incrementando (o disminuyendo) la velocidad del rotor izquierdo mientras se disminuye (o incrementa) la velocidad del rotor derecho. Esto lleva a un aumento del torque sobre el ángulo de alabeo del vehículo, consiguiendo así este movimiento. [6]
- Guiñada: Este movimiento se logra incrementando (o disminuyendo) la velocidad de los rotores delantero y posterior mientras se disminuye (o incrementa) la velocidad de los rotores izquierdo y derecho. Esto lleva a un aumento del torque sobre el ángulo de guiñada del vehículo, consiguiendo así este movimiento. [6]

6.3. Anillo colector

Un anillo colector es un dispositivo electromagnético que permite la transmisión de potencia y señales eléctricas desde una estructura estacionaria a una estructura rotativa. Un anillo colector puede ser utilizado en cualquier sistema electromecánico que requiera rotación continua sin restricciones mientras transmite potencia o datos. Puede ser utilizados para disminuir en estrés provocado a los cables en uniones móviles y mejorar así el desempeño mecánico. [9]

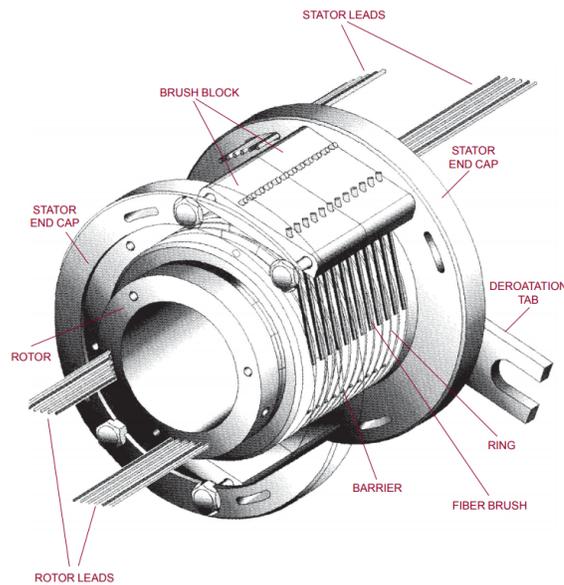


Figura 4: Partes de un anillo colector de tipo cápsula. [10]

El diseño de anillo colector más común es el tipo cápsula o tambor, como se puede observar en la Figura 4, este dispositivo está compuesto por una serie de anillos adyacentes a lo largo del centro [10]. Cada anillo hace contacto con una fibra la cual pasa la potencia o los datos de la parte fija (estátor) a la parte móvil (rotor).

6.4. Codificador rotacional

Un codificador es un sensor de movimiento mecánico que gradualmente genera una señal en respuesta al movimiento. Esto permite a sistemas de control de movimiento información acerca de la posición, velocidad y dirección de los sistemas electromecánicos. [11]

Uno de los codificadores más simples y más comúnmente utilizados son los codificadores rotacionales incrementales. Estos proveen información instantánea sobre la posición de una barra rotacional. El codificador logra esto produciendo una onda cuadrada por cada incremento de movimiento de la barra. [12]

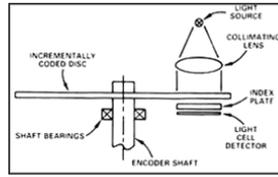


Figura 5: Funcionamiento de un codificador rotacional óptico. [11]

Uno de los diseños más comunes de codificador rotacional incremental es de tipo óptico. Este codificador, como se puede observar en la Figura 6, está compuesto por un disco transparente con secciones opacas a una separación equidistante para determinar el movimiento. Un diodo emisor de luz es utilizado para hacer pasar luz por el disco y es detectado por un foto detector. Esto causa que el codificador genere un tren de pulsos mientras rota. En la industria estos sensores son utilizados en la configuración cuadratura de dos canales, esto permite retroalimentación no solo de la velocidad y la posición, sino también permite saber la dirección del movimiento. [11]

6.5. Microcontrolador de placa reducida

Un microcontrolador de placa reducida, o SBC por sus siglas en inglés, es una solución a la construcción de sistemas dedicados utilizando componentes de micro computadora. Un SBC está compuesto por un microprocesador, una memoria reprogramable capaz de almacenar los programas, una memoria de tipo RAM para ser utilizada en tareas de lectura y escritura y una interfaz de comunicación para servir como interfaz de programación. [13]

Un SBC cuenta con interfaces de tipo entrada y salida, estas pueden ser de tipo discreto de un bit (0 o 1), o de tipo continuo para valores como temperatura, voltaje o presión. [13]

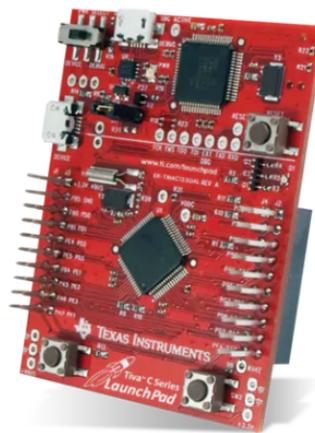


Figura 6: Microcontrolador de placa reducida launchpad Tiva C. [14]

6.6. Quadcopter Crazyflie 2.0

El crazyflie 2.0 es un quadcopter de código abierto con el fin de funcionar como una plataforma de desarrollo, la cual posee un peso ligero de 27g. El crazyflie esta equipado con un módulo bluetooth LE, como también con un radio de largo alcance/baja latencia.[15] Esto le permite al crazyflie un alcance de 1000 metros utilizando radio, y un alcance de 20 metros utilizando bluetooth. [16]

Especificaciones mecánicas:

- Peso de vuelo: 27g.
- Tamaño: 92x92mm (tamaño motor a motor).

Especificaciones del módulo de radio:

- Radio de banda ISM de 2.4Ghz.

Especificaciones de Microcontrolador e IMU:

- Unidad de microcontrolador principal: STM32F405 (Cortex-M4, 168Mhz, 192kb SRAM, 1Mb flash).
- Unidad de microcontrolador de radio y manejo de energía: nRF51822 (Cortex-M0, 32Mhz, 16kb SRAM, 128kb flash).
- Unidad de medición de Inercia: MPU-9250, el cual cuenta con giroscopio, acelerómetro y magnetómetro de tres ejes.

Especificaciones de vuelo:

- Tiempo de vuelo: 7 minutos.
- Tiempo de carga: 40 minutos.
- Carga máxima recomendada: 15g.

6.7. Quadcopter Parrot AR 2.0

El parrot AR 2.0 es un multirrotor diseñado por Parrot, este multirrotor se caracteriza por ser pilotado utilizando un smartphone o una tablet por medio de Wi-Fi. El Parrot AR 2.0 posee un sistema de asistencia que le permite al usuario y despegue y un aterrizaje automático, gracias a la cámara y sensor ultrasónico montados en la parte inferior del multirrotor. [17]



Figura 7: Quadcopter Parrot AR 2.0. [17]

Especificaciones mecánicas:

- Peso de vuelo: 420 gramos.
- Tamaño: 451 x 451 mm.

Especificaciones de Microcontrolador y sensores:

- Procesador: TMS320DMC64 (1 GHz 32 bits ARM Cortex A8 con DSP vídeo 800 MHz TMS320DMC64x).
- Unidad de medición de Inercia: cuenta con giroscopio, acelerómetro y magnetómetro de tres ejes. Sensor de presión ± 10 Pa. Sensores ultrasónicos para medición de altitud. Cámara vertical QVGA 60 FPS para medir velocidad de vuelo.

Especificaciones del módulo Wi-Fi:

- Wi-Fi b g n.

Especificaciones de vuelo:

- Tiempo de vuelo: 12 minutos.
- Tiempo de carga: 40 minutos.

7.1. Dimensionamiento de los quadcopters

El primer paso que se tomó para implementar cada una de las plataformas fue realizar las respectivas mediciones para los multirrotores Crazyflie 2.0 y Parrot AR 2.0. El proceso se realizó utilizando esquemáticos y modelos 3D proporcionados por los distribuidores oficiales de cada aparato.



Figura 8: Modelo 3D Crazyflie 2.0.



Figura 9: Modelo 3D Parrot AR 2.0.

7.2. Delimitación de requerimientos para las plataformas de pruebas

Para cada plataforma de pruebas se buscó delimitar el alcance que se busca con cada una, para ello se establecieron las características y requerimientos para cada plataforma.

Plataforma crazyflie 2.0:

- Ser ligera. Esto se debe a que el Crazyflie 2.0 posee un peso máximo de vuelo de cincuenta y dos gramos, por lo que la plataforma debe mantenerse ligera para no afectar drásticamente las características de vuelo del Crazyflie 2.0.
- Permitir evaluar el desempeño en los los grados de libertad principales. Para ello es necesario la instalación de un sensor capaz de medir el desempeño del multirrotores en el ángulo de libertad seleccionado, sea este cabeceo, alabeo o guiñada.
- Distribución de energía. Debido a que el Crazyflie 2.0 posee un tiempo de vuelo de 10 minutos debido a la limitada capacidad de sus baterías, es necesario la adición de una fuente de poder capaz de mantener vuelos más largos con el objetivo de poder realizar pruebas de control sin limitaciones de tiempo de vuelo.

Plataforma Parrot AR 2.0

- Ser ligera. Aunque el Parrot AR posee una mayor capacidad de peso máximo de vuelo, es necesario que la plataforma se mantenga ligera con el objetivo de no afectar la inercia del vehículo y que los algoritmos implementados se mantengan lo más apegados posibles a las características de vuelo del Parrot AR.
- Permitir al menos tres grados de libertad. Para un correcto ajuste del sistema de control de actitud es necesario que la plataforma permita un libre movimiento en los ángulos de libertad de cabeceo, alabeo y guiñada.

- Sensores en los tres grados de libertad principales. Adicionalmente a la retroalimentación recibida por la telemetría del quadcopter es deseado que cada uno de los tres grados de libertad de la actitud del vehículo sean medidos por sensores externos. Esto con el objetivo de lograr una calibrar los sensores a bordo del aparato o poder realizar experimentos con vehículos sin necesidad de utilizar una unidad de medición de inercia (IMU por sus siglas en ingles) para implementar los algoritmos de control.
- Facilidad de producción. Debido a que el diseño sera implementado en la universidad, todas las piezas deben de poder ser producibles fácilmente. Es también deseable que en caso una pieza se rompa esta pueda ser remplazada utilizando los recursos a disposición de la universidad.

Desarrollo para plataforma de pruebas Parrot AR 2.0

8.1. Prueba de concepto

Para la plataforma de pruebas del parrot AR Drone 2.0 se decidió optar por un diseño de "suspensión cardán", este permite al quadcopter movimiento sin obstáculos en sus tres grados de libertad principales, siendo estos cabeceo, alabeo y guiñada. Una ventaja adicional de este diseño es la posibilidad de montar codificadores rotacionales en cada uno de los ejes principales, esto con el objetivo evaluar el desempeño de los sistemas de control de actitud del quadcopter.

Una vez establecido el diseño deseado, se procedió a utilizar el CAD de Autodesk, Inventor 2019, para establecer una prueba de concepto antes de desarrollar un prototipo.

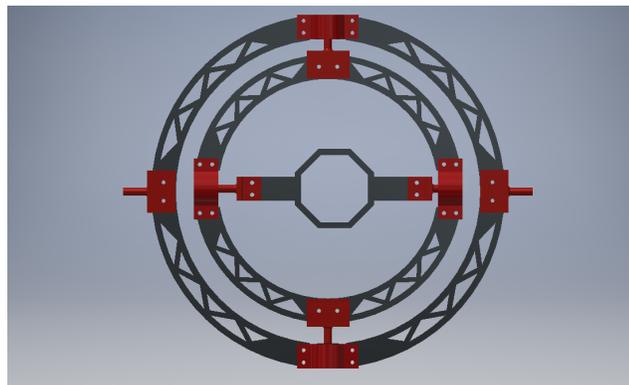


Figura 10: Diseño para la plataforma Parrot AR 2.0.

En la Figura 10 se puede apreciar el primer diseño para la plataforma de pruebas para el quadcopter Parrot AR 2.0, este diseño cuenta de tres elementos principales: una plataforma central, que permite el movimiento en el grado de libertad de cabeceo, y dos anillos concéntricos, los cuales permiten el movimiento en los grados de libertad de alabeo y guiñada.

Como se puede observar en la Figura 10, es posible medir cada uno de los ángulos principales mediante el uso de un codificador rotacional incremental de tipo óptico, esto no solo permite saber el ángulo de cada uno de los ejes principales, sino que también permite saber la dirección y la velocidad a la que se mueve el quadcopter en cada uno de sus ejes. Debido a la complejidad del diseño, la distribución de energía a cada uno de los sensores no puede ejecutarse utilizando únicamente cables, esto se debe al riesgo que estos se enreden y se rompan debido al movimiento del quadcopter. Es por ello que se decidió utilizar anillos colectores de doce canales para la distribución de energía y señales de retroalimentación, estos dispositivos electromecánicos permiten la distribución de energía de una estructura estacionaria a una estructura rotacional, en este caso de los anillos exteriores a los anillos interiores de la suspensión cardán.

8.2. Sensores y distribución de energía

Con el diseño a implementar seleccionado para el prototipo se procedió a seleccionar codificadores rotacionales, para implementar en la plataforma se seleccionó el codificador rotacional LPD3806-600BM. Este es un codificador incremental de tipo óptico de dos canales, esto permite determinar no solo la posición sino también la velocidad y dirección del movimiento. Este codificador posee una resolución de 600 pulsos por revolución, esto es de gran importancia ya que esto provee una mayor exactitud sobre la posición en cada uno de los grados de libertad de quadcopter, permitiendo una mejor evaluación del desempeño de los sistemas de control.



Figura 11: Modelo 3D del codificador rotacional LPD3806-600BM.

Para la distribución de energía se decidió utilizar el anillo colector SENRING M220-12S, este es un anillo colector de tipo cápsula que posee un diámetro de 22 mm. Este anillo colector cuenta con 12 canales, estos serán instalados en cada uno de los ejes para distribuir energía desde los anillos exteriores hacia los anillos interiores.

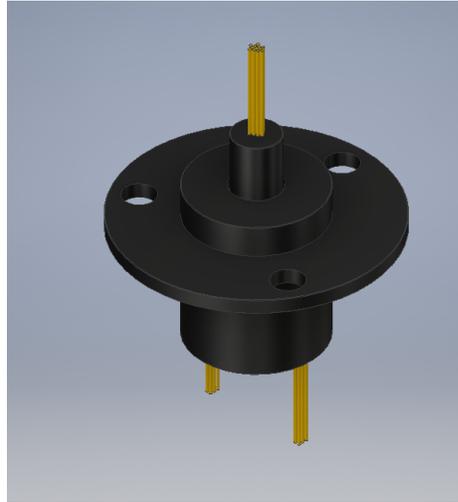


Figura 12: Modelo 3D del anillo colector SENRING M220-12S.

8.3. Diseño primer prototipo

8.3.1. Plataforma central: eje de cabeceo

El diseño establecido durante la prueba de concepto, aunque funcional, no posee las dimensiones correctas ni los sensores que se utilizaran para el prototipo final. Como primer paso de diseño la plataforma central de la suspensión central, esta plataforma cumple la función de retener al quadcopter y permitir el movimiento de cabeceo. Esta plataforma tiene un largo de 550 mm, esta dimensión fue elegida debido a que el Parrot AR 2.0 tiene un largo y un ancho de 451 mm; esta dimensión también permite el uso de quadcopters con tamaños similares, en el rango de 350 a 450 mm.

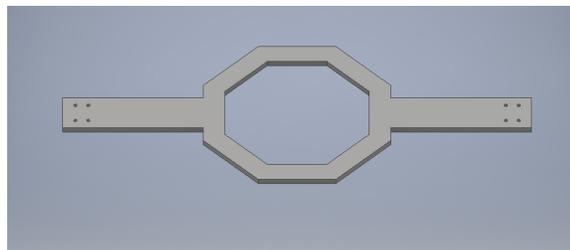


Figura 13: Modelo 3D de la plataforma central.

Como se puede observar en la Figura 13, la plataforma cuenta con un espacio diseñado para montar el quadcopter, este se posiciona en el centro de la plataforma y la carcasa del quadcopter debe reposar sobre el octágono, luego este es retenido mediante el uso de cinchos plásticos.

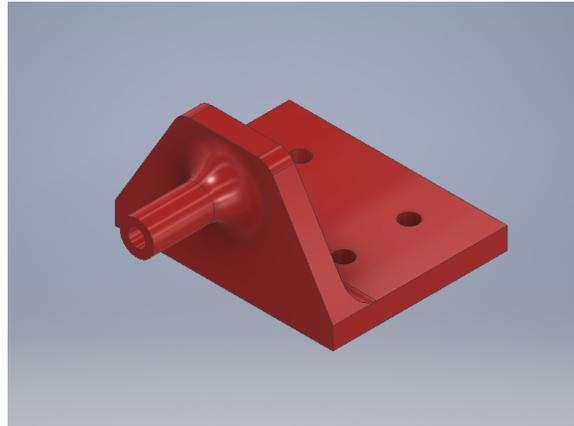


Figura 14: Modelo 3D del receptor para eje de cabeceo.

La Figura 14 se puede observar el diseño del receptor para la plataforma central, el receptor se encarga de unir el aro intermedio de alabeo con la plataforma central, esta pieza posee un orificio por el cual los cables del anillo colector entran a la plataforma central. Esta pieza debe ser capaz de soportar de la plataforma central y del quadcopter, ya sea que este se encuentre inactivo o ejerciendo máxima aceleración.

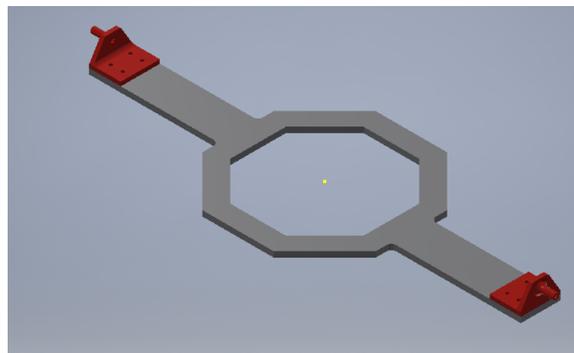


Figura 15: Modelo 3D de la plataforma central con receptores.

8.3.2. Aro intermedio: eje de alabeo

Este aro cumple la función de permitir el movimiento en grado de libertad de alabeo, este aro está conectado al anillo exterior y a la plataforma central. Debido al tamaño del Parrot AR 2.0 este anillo tiene un diámetro de 600 mm, esto permite al quadcopter moverse

sin peligro de golpear las hélices con la estructura del aro, también permite a quadcopters de tamaños similares al parrot operar sin dificultades dentro de esta plataforma.

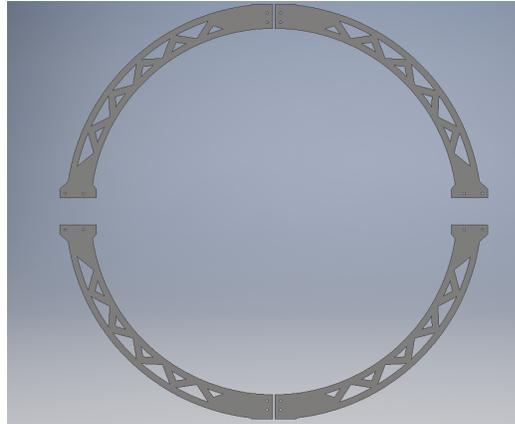


Figura 16: Modelo 3D de aro de alabeo.

La Figura 16 presenta el diseño del aro de alabeo para el primer prototipo, este aro está fragmentado en cuatro segmentos para el montaje del codificador rotacional, encargado de medir la posición de cabeceo, y el montaje para el anillo colector, encargado de distribuir energía a la plataforma central. Debido a que es importante que la estructura de la plataforma de pruebas sea lo más ligera posible, se implementó un patrón a lo largo del aro con el objetivo de reducir considerablemente el peso de este, sin embargo un inconveniente es que esto compromete, a cierto punto, la rigidez del aro.

Seguido se procedió a diseñar una pieza de montaje para el anillo colector y el codificador rotacional, esta pieza se encarga de montar ambos componentes al anillo, de la misma manera debe de poseer la suficiente rigidez para no ceder ante el peso de la plataforma central y el quadcopter.

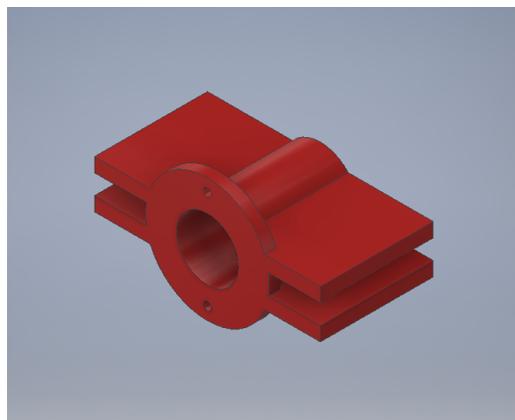


Figura 17: Modelo 3D de la versión temprana para la pieza de montaje del anillo colector y codificador rotacional.

Luego de diseñar la pieza se decidió cambiar ligeramente la forma en que la plataforma central conecta con el aro intermedio, debido a que el anillo colector y el codificador son piezas bastante frágiles, es necesario que el peso de la estructura no sea ejercido sobre estos componentes. Por lo que se decidió diseñar una pieza de montaje extra, esta pieza retiene un cojinete de 12 x 32 x 10 mm; esto con el objetivo de cumplir dos funciones: disminuir la carga ejercida sobre el anillo colector y el codificador, y alinear los ejes entre el aro intermedio y la plataforma central.

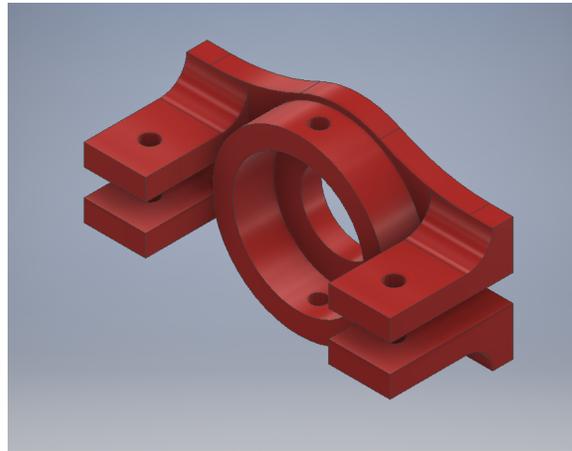


Figura 18: Modelo 3D de montaje del cojinete.

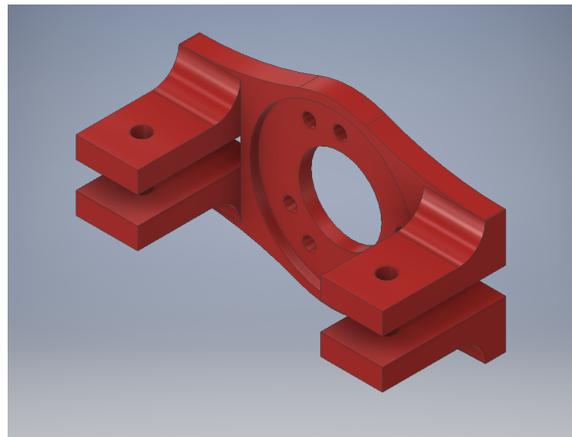


Figura 19: Modelo 3D de montaje del codificador rotacional.

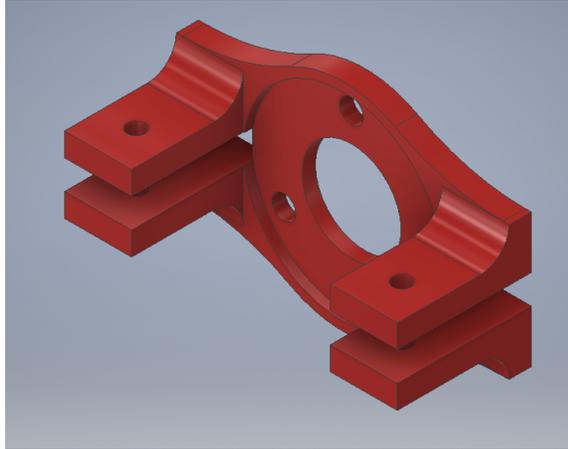


Figura 20: Modelo 3D de montaje del anillo colector.

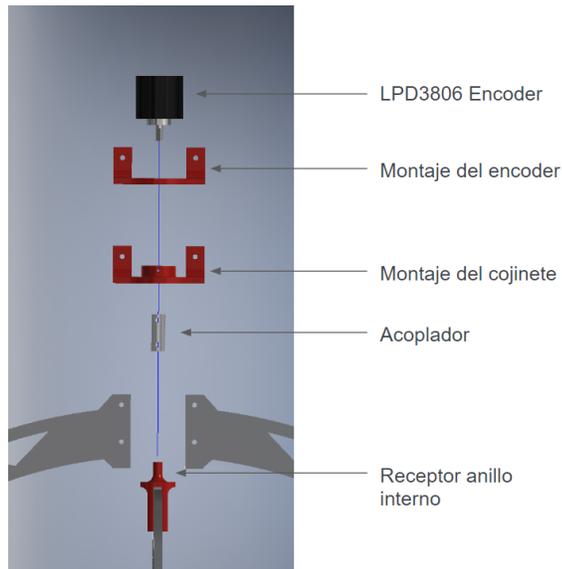


Figura 21: Modelo 3D de las partes del montaje para el codificador rotacional.

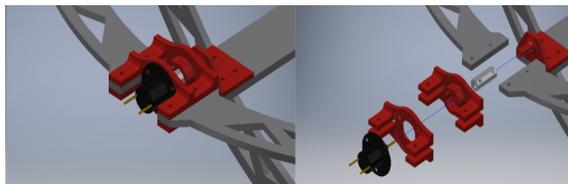


Figura 22: Ensamblado 3D del montaje del anillo colector.

En la Figura 22 se puede observar ya ensamblado el montaje para el anillo colector, esta forma de montaje no solo remueve peso del anillo colector sino que también asegura que la

unión entre los segmentos del aro sea lo mas robusta posible tanto en compresión como en tensión desde los dos ejes de estrés posibles.

Al igual que con la plataforma central, es necesario diseñar una pieza que conecte el aro interno de cabeceo con el aro externo de guiñada. Esta pieza posee un orificio por el cual los cables del anillo colector entran al aro interno, también cumple la función de mantener unidos los segmentos de aro.

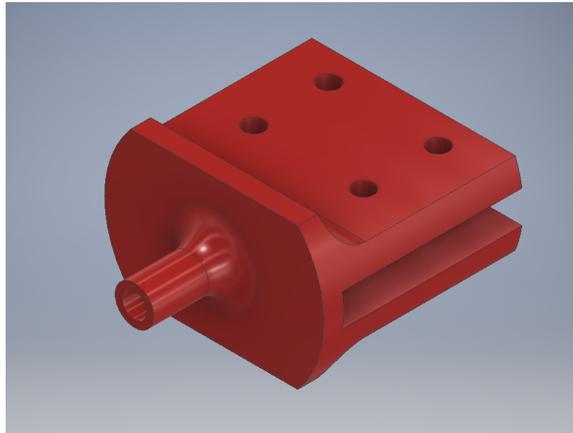


Figura 23: Modelo 3D del receptor para el eje de alabeo.

Una vez diseñadas todas las piezas para el eje de cabeceo se procedió a realizar un ensamble de todo el anillo interior.

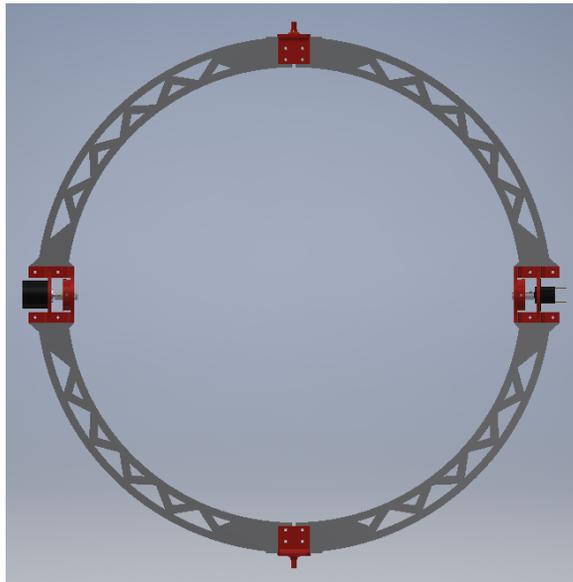


Figura 24: Modelo 3D de anillo central con sensores y receptores. En el lado izquierdo se puede observar montado el codificador rotacional, mientras en el derecho se encuentra montado el anillo colector.

8.3.3. Aro externo: eje de guiñada

Este aro permite el movimiento en el grado de libertad de guiñada, se encuentra conectado al aro intermedio intermedio por medio de un anillo colector y un codificador rotacional. Para facilitar la producción de las piezas todas las piezas del aro intermedio son compatibles con el aro externo, esto facilita el proceso de desarrollo ya que si en la implementación se detectan problemas con las piezas solo es necesario actualizar para un aro. La única diferencia notable es que este aro cuenta con un diámetro de 730 mm.

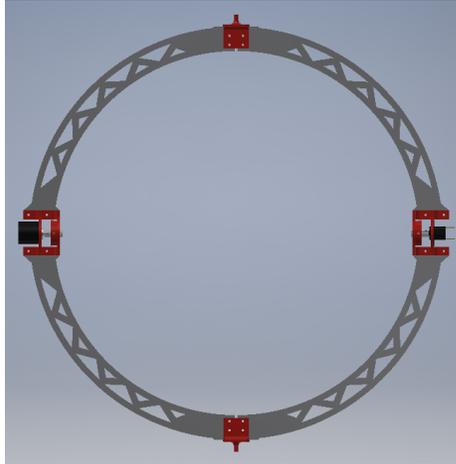


Figura 25: Modelo 3D de anillo externo con sensores y receptores.

Una vez diseñado cada uno de los segmentos se procedió con el ensamble completo de todas las piezas de la plataforma de pruebas.



Figura 26: Ensamble 3D del primer diseño de prototipo para la plataforma de pruebas Parrot AR 2.0

8.4. Implementación primer prototipo

8.4.1. Fabricación de la plataforma de pruebas

Una vez completado el diseño 3D de la plataforma se procedió a implementarlo a un prototipo real, para ello cada una de las piezas deben de ser producidas. Ya que los segmentos de aro y la plataforma central poseen una forma plana, se decidió utilizar MDF de 6 mm como material para producirlas; para realizar el corte de estas se utilizó la cortadora láser, de Universal Laser System, PLS 4.75.

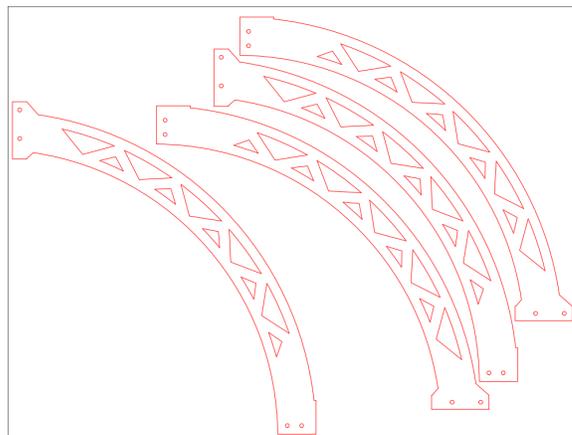


Figura 27: Vector para cortadora láser de aro intermedio.

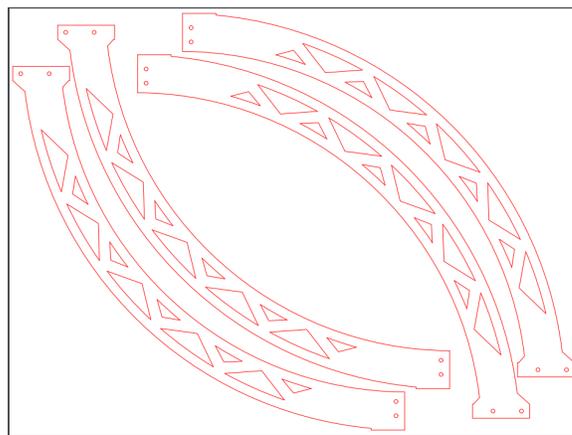


Figura 28: Vector para cortadora láser de aro externo.

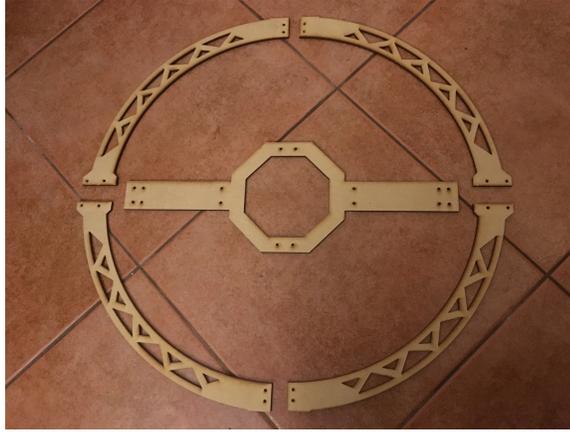


Figura 29: Segmentos de aro intermedio y plataforma central cortados en MDF 6 mm.

Seguido se procedió a producir las piezas para el montaje de los anillos colectores, los codificadores rotacionales y los cojinetes. Estas piezas fueron fabricadas utilizando las impresoras 3D, ultimaker 3D y Prusa i3, disponibles en la Universidad del Valle de Guatemala; como material se utilizó PLA de distintos colores debido a su facilidad de imprimir objetos este material (baja temperatura de extrusión). Debido a que los montajes de los cojinetes se encuentran bajo gran estrés debido al peso de la plataforma central y el quadcopter, se decidió imprimir estas piezas en policarbonato (PC), esto debido a que este material presenta buenas características tanto en fuerza como resistencia a impacto.

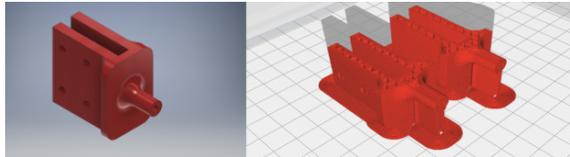


Figura 30: Proceso de rebanado para impresión 3D de una pieza en el software Cura.



Figura 31: Piezas impresas PLA y Policarbonato.

8.4.2. Ensamblaje de plataforma de pruebas

Una vez obtenidas las piezas necesarias se procedió a ensamblar el prototipo, cada pieza fue ajustado utilizando tornillos M4. Para el primer prototipo el objetivo fue evaluar la rigidez de la estructura y determinar posibles puntos débiles en esta, por esta razón los sensores no fueron montados en el primer prototipo.

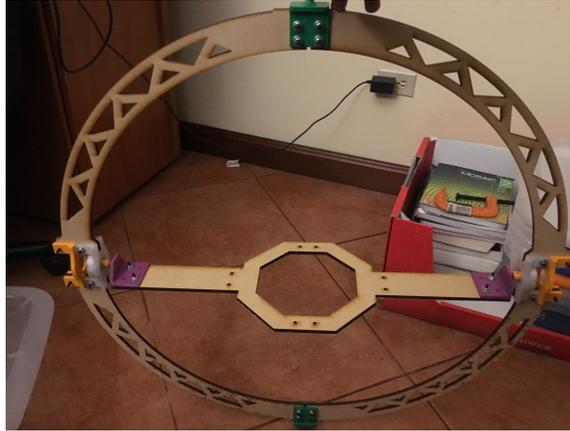


Figura 32: Piezas impresas PLA y Policarbonato.

La Figura 32 muestra el primer prototipo de la plataforma de pruebas para el Parrot AR 2.0 ya ensamblada. Seguido se procedió a analizar la estructura en busca de posibles mejoras, se pudo notar lo siguiente.

- Desalineación de los ejes. debido a como se diseñó el sistema de montaje de los sensores y el cojinete (ver Figura 21) la pieza del montaje del cojinete y el montaje del codificador poseen cierta libertad de movimiento, esto provoca que los ejes de desalineen ligeramente, provocando que el acoplador este sobre mucho estrés, rompiéndose.
- Alta deflexión en el aro intermedio. Debido a que los aros están hechos de MDF estos tienden a deflectarse fácilmente por el peso de la plataforma central, esto es un problema ya que, debido a la deflexión de los aros, las hélices de quadcopter pueden golpear la estructura de la plataforma de pruebas, dañando a la plataforma y al aparato.
- Fragilidad de receptores en el eje de cabeceo. Una pieza fabricada en una impresora 3D debe ser producida capa por capa, esto permite producir formas muy complejas, sin embargo esto también significa que las piezas tienden a ser débiles sobre el eje de la impresión.

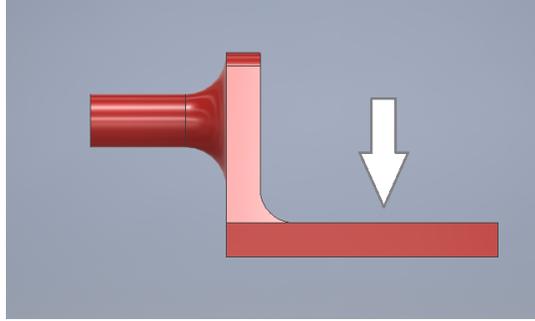


Figura 33: Fuerza aplicada sobre el receptor para eje de cabeceo.

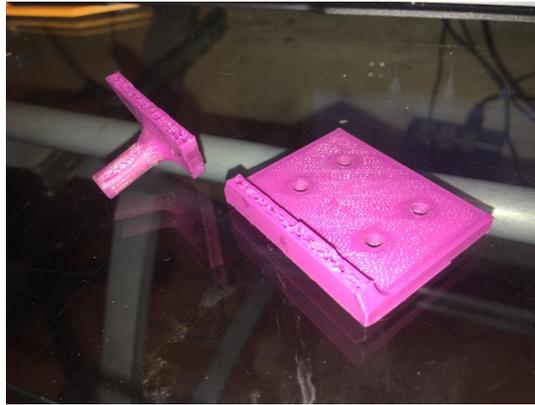


Figura 34: Falla en receptor para eje de cabeceo.

Como se puede observar en la Figura 34 el receptor para el eje de cabeceo presenta su falla sobre una de las capas de impresión, esta pieza presentó fallas en dos ocasiones, en ambas se utilizó pegamento epoxico para unir la pieza y terminar las pruebas con la primera plataforma de pruebas.

8.5. Implementación segundo prototipo

El segundo prototipo tuvo como objetivo abordar los problemas encontrados en el primer prototipo y buscar soluciones a estos. Como primer paso primero se buscó resolver el problema de fragilidad en los receptores para el eje de cabeceo. Como primera solución se pensó cambiar el material y el proceso de fabricación diferente a impresión 3D, para ello se pensó en otros materiales como ertalon. El ertalon es un nylon que se distingue por sus propiedades: alta resistencia y rigidez mecánica, y facilidad de maquinabilidad.



Figura 35: Receptor para eje de cabeceo maquinado en ertalon.

Como se puede ver en la Figura 35, las piezas fueron maquinadas utilizando ertalon como material seleccionado. Estas piezas presentaron una alta rigidez ante pesos mucho mayores a los sometidos en la plataforma de pruebas, presentando al mismo tiempo una deflexión mínima de la pieza. Sin embargo al ensamblar en el prototipo se pudo notar una considerable desalineación de los ejes, provocando estrés sobre el montaje de los cojinetes hasta el punto de desviar estos significativamente. Esto se debe a que las piezas fueron maquinadas por un operador y no maquinadas en una CNC.

Debido al problema encontrado con piezas maquinadas, se optó por continuar utilizando piezas fabricadas mediante impresión 3D, para ello se modificó el grueso de la pieza de 3 mm a 5 mm, esto aunque refuerza significativamente la pieza no soluciona el problema de esta fallando entre las capas de impresión, para arreglar este problema la pieza se imprimió recostada sobre su eje vertical, rotando la pieza rotando 90° sobre su eje de impresión original.

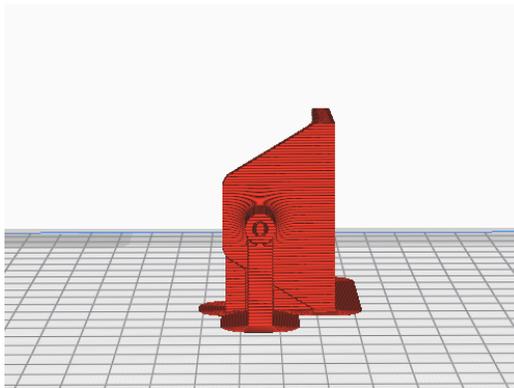


Figura 36: Rebanado para impresión 3D del diseño actualizado del receptor para eje de cabeceo.

Seguido se procedió a resolver el problema de la deflexión en los segmentos de aro intermedio, el problema de la deflexión del aro interno se debe a dos factores: primero el aro esta hecho en MDF de 6 mm, aunque el MDF es rígido, este no provee la suficiente rigidez para evitar deflexión por el peso del quadcopter y la plataforma central; segundo el patrón diseñado en el aro intermedio, aunque esto reduce considerablemente el peso de los segmentos

de aro, también compromete la rigidez del mismo. Es por ello que se decidió realizar ciertos cambios en el diseño del aro interno:

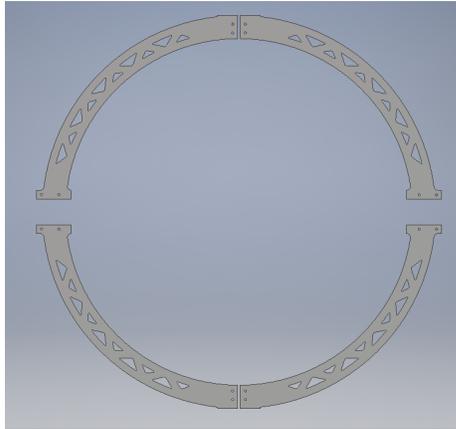


Figura 37: Rebanado para impresión 3D del diseño actualizado del receptor para eje de cabeceo.

La Figura 37 muestra el diseño actualizado del aro interno, este posee una mayor área de superficie, buscando al mismo tiempo reducir su peso. Además de modificar el diseño también se consideró cambiar el material de los aros y la plataforma central a aluminio, esto ya que incluso la plataforma central presenta cierto grado de deflexión a pesar sobre esta solo recae el peso del quadcopter. Debido a esto fue deseable seleccionar un nuevo material para la producción de los aros y la plataforma central que fuese más rígido y con un peso similar; el material seleccionado para esta tarea fue aluminio, aunque el aluminio es mucho más denso que el MDF (2.700 g/cm^3 y 0.7 g/cm^3 respectivamente) los aros y la plataforma central poseen un peso similar si estos son fabricados en aluminio de 2 mm. Debido a que en 2mm el aluminio es difícil de maquinar se utilizó hidrocorte por CNC para fabricar los aros y la plataforma central.



Figura 38: Proceso de hidrocorte de aluminio.



Figura 39: Aros y plataforma central en aluminio 2 mm.

Por último se abordó el problema de la desalineación de los ejes provocado por el sistema de montaje del cojinete y el montaje de codificador rotacional/anillo colector. Para corregir este problema se modificaron las piezas de montaje del cojinete, del anillo colector y el codificador rotacional. También se buscó reducir el peso del montaje cambiando el cojinete de 12 x 32 x 10 mm a uno de 12 x 21 x 5 mm, este cambio hace reduce el peso de la pieza del montaje y utiliza un cojinete más ligero.

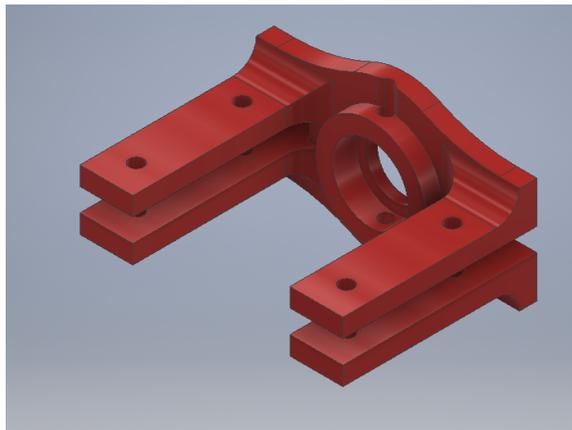


Figura 40: Modelo 3D de segunda versión montaje de cojinete.

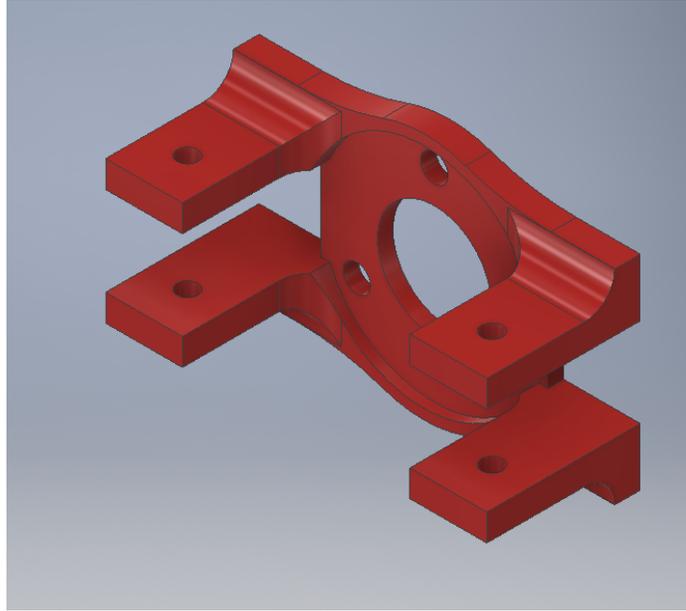


Figura 41: Modelo 3D de segunda versión montaje del anillo colector.

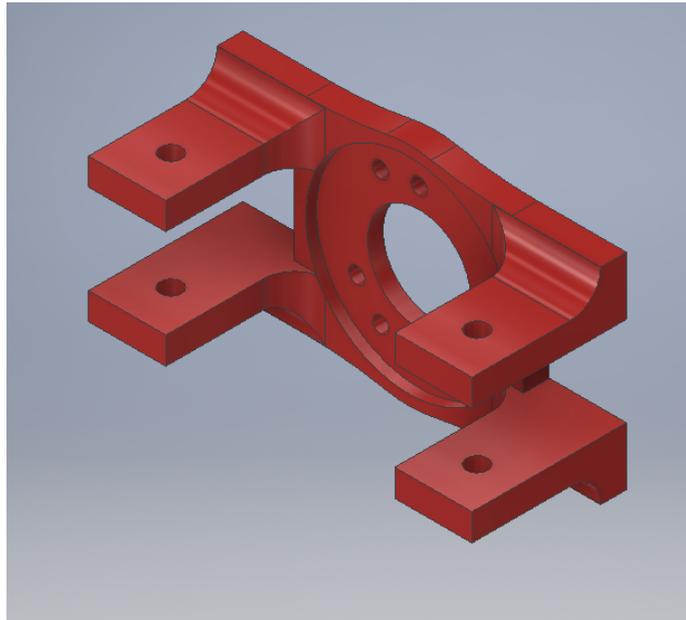


Figura 42: Modelo 3D de segunda versión montaje del codificador rotacional.

En la Figura 40 se puede observar la segunda versión de la pieza para el montaje del cojinete, esta pieza ahora se encarga de unir los segmentos de aro, por lo cual se reforzó la estructura de esta, mientras que las piezas de montaje para codificador (Figura 42) y montaje para anillo colector (Figura 41) ahora sirven como soporte extra al montaje del cojinete.

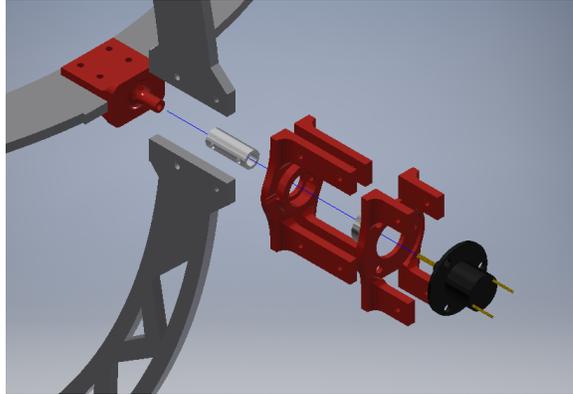


Figura 43: Ensamblado 3D del montaje actualizado.

En la Figura 46 se puede observar el montaje del anillo colector con el diseño actualizado, este nuevo diseño resuelve el problema del montaje del cojinete y el montaje del anillo colector sean desalineados del eje del receptor del eje interior. Adicionalmente también se cambió el material de los acopladores de PLA a ertalon, esto con el objetivo de evitar que los acopladores se rompan por el peso de la plataforma. Para fabricar los acopladores se maquinó un bloque de ertalon utilizando un torno, posteriormente estas fueron perforadas con las medidas exactas para acoplar los receptores con el anillo colector o codificador rotacional.



Figura 44: Acopladores de Ertalon. Acoplador de anillo colector en la izquierda, acoplador de codificador en la derecha.

Una vez resueltos los problemas encontrados durante el primero prototipo, se procedió con el ensamblaje del segundo prototipo. Durante esta fase se fabricaron los nuevos montajes utilizando la impresora 3D. Una vez ensamblado el giroscopio completo se procedió a instalar los codificadores rotacionales y los anillos colectores en cada uno de los ejes, seguido estos fueron asegurados con los respectivos acopladores. Se procedió a analizar la estructura en busca de posibles fallas importantes como las encontradas durante el primer prototipo; algo que llamo la atención es que el aro intermedio, encargado del movimiento de alabeo, se

encuentra desbalanceado. Esto se debe a que el codificador rotacional posee más masa que el anillo colector montado en el otro extremo (111.9 gramos y 12.3 gramos respectivamente); la solución encontrada fue montar pesos en el lado del anillo colector hasta equilibrar el aro.

El último elemento a probar fueron los codificadores rotacionales, estos se comunican a una computadora por medio de un microcontrolador de placa reducida Tiva C. El codificador rotacional utilizado en la plataforma de pruebas utilizado fue el LPD3806-600BM, este codificador como es capaz de generar 600 pulsos por revolución o PPR; en codificadores de un canal es posible duplicar la resolución si se utiliza tanto el flanco de subida como el flanco de bajada, sin embargo el LPD3806-600BM posee 2 canales, esto permite un aumento de cuatro veces la resolución. El tamaño de un pulso en grados esta dado por la siguiente formula:

$$Resolucion = \frac{360^\circ}{4 * PPR} \quad (1)$$

Sabiendo que el sensor genera 600 pulsos por revolución:

$$0.15^\circ = \frac{360^\circ}{4 * 600} \quad (2)$$

Esto quiere decir que por cada revolución se pueden detectar 2400 posiciones individuales. Para la programación de la tiva C se decidió utilizar interrupciones en cada uno de los puertos conectados a los canales de los codificadores rotacionales, en total fueron utilizados 6 GPIO para los 3 codificadores. Para decodificar la posición se analizó la entrada de los canales A y B del codificador:

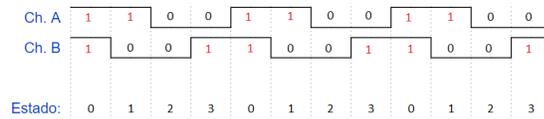


Figura 45: Diagrama de tiempo y estados del codificador rotacional.

Como se puede observar en la Figura 45 el diagrama de tiempo el canal A y el canal B se encuentran desfasados 90°, esto es lo que permite saber la dirección de movimiento. En el diagrama también se puede observar que existen cuatro estados, estos estados permiten saber la dirección del movimiento; por ejemplo, al realizar una lectura de los canales A y B se determina que el estado actual es 3, dependiendo si el siguiente estado es 0 o 2 es posible saber en que dirección es el movimiento. Para facilitar el proceso de decodificación se elaboró la siguiente tabla:

Implementando la tabla con una matriz en el código, se y el estado anterior actual como los índices, fue posible utilizar los codificadores para determinar la posición en los tres grados de libertad principales; esta información sobre la posición en cada eje es enviada a

| | | Anteriores | | | |
|----------|---|------------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 2 | 3 |
| Actuales | 0 | 0 | -0.15 | 0 | +0.15 |
| | 1 | +0.15 | 0 | -0.15 | 0 |
| | 2 | 0 | +0.15 | 0 | -0.15 |
| | 3 | -0.15 | 0 | +0.15 | 0 |

Cuadro 1: Tabla de estados para proceso de decodificación.

una computadora por medio de comunicación serial. Sin ningún otro problema aparente se procedió a montar el quadcopter y realizar las pruebas finales.



Figura 46: Segundo prototipo de plataforma de pruebas con quadcopter Parrot AR 2.0

Durante las pruebas se utilizó el nuevo diseño del aro intermedio, sin embargo se utilizó MDF para comparar el desempeño de este con el aluminio en el prototipo final. Se pudo notar una ligera deflexión del aro intermedio, pero esta no fue lo suficiente severa como la observada en el primer prototipo. En esta prueba se pudo apreciar que el quadcopter no tiene dificultad para moverse en los grados de libertad de cabeceo y alabeo, sin embargo se pudo notar dificultad en el grado de la guiñada.

8.6. Implementación final

La implementación final tiene como objetivo abordar el problema del movimiento en el ángulo de libertad de guiñada, para ello se desarrolló un sistema de montaje para la plataforma de pruebas. Este sistema asegura que todo el peso de la plataforma esté sobre el montaje, el cual posee un cojinete para facilitar el movimiento en el eje de la guiñada.

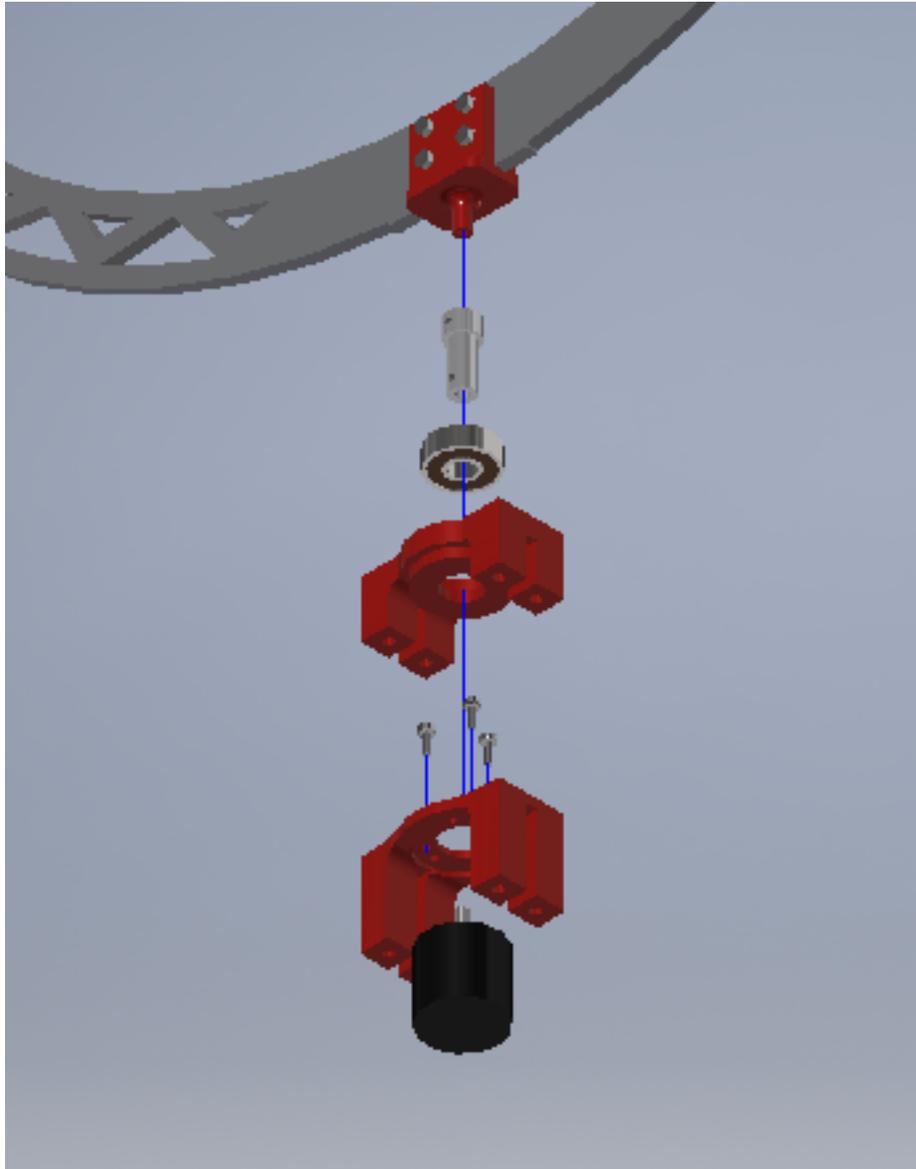


Figura 47: Montaje de codificador en grado de libertad de guiñada.

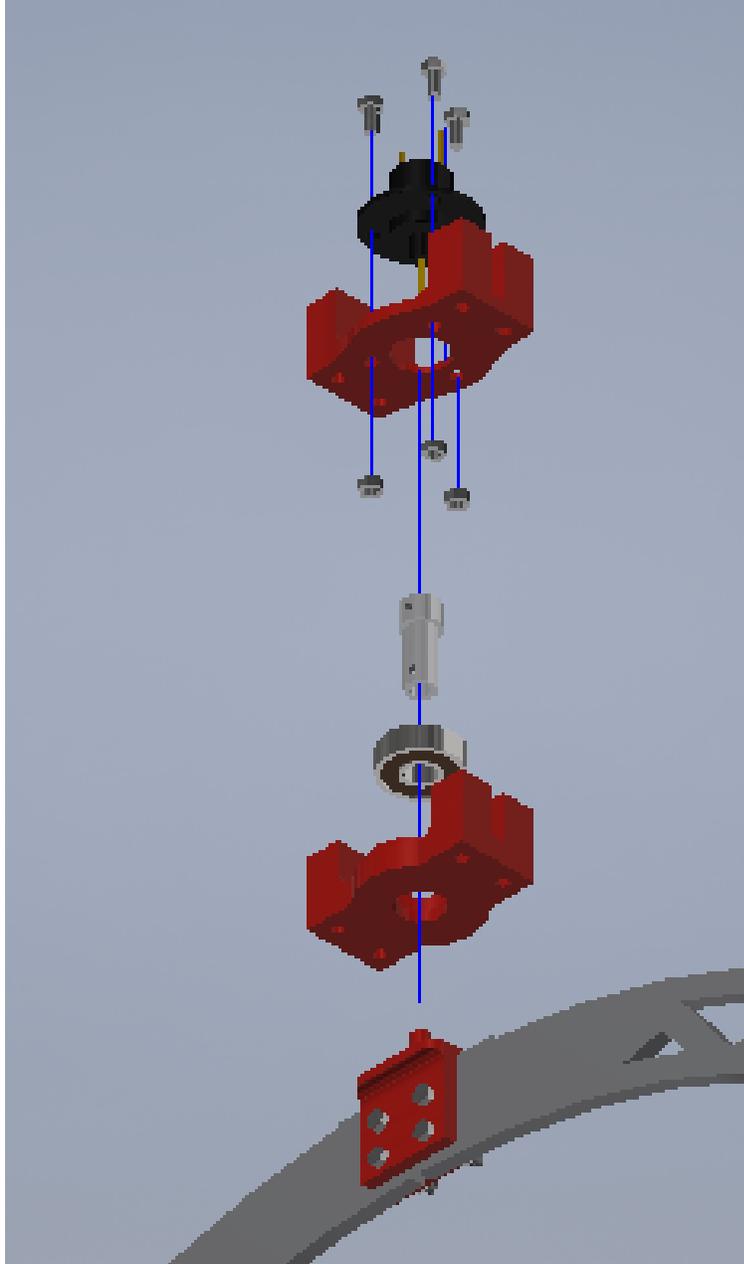


Figura 48: Montaje de anillo colector en grado de libertad de guiñada.

En las figuras 47 y 48 se puede observar que el sistema de montaje también posee un anillo colector y un codificador. Esto permite la distribución de energía a los ejes interiores, como también la posibilidad de medir el movimiento en el grado de libertad de guiñada gracias al codificador rotacional.

Para alojar a la plataforma de pruebas se diseñó una carcasa utilizando tubo cuadrado de acero inoxidable, esta plataforma debe ser lo suficiente robusta para soportar los movimientos repentinos que puede presentar una prueba de quadcopter. La plataforma debe ser pesada para mantener su posición mientras se realizan las pruebas.

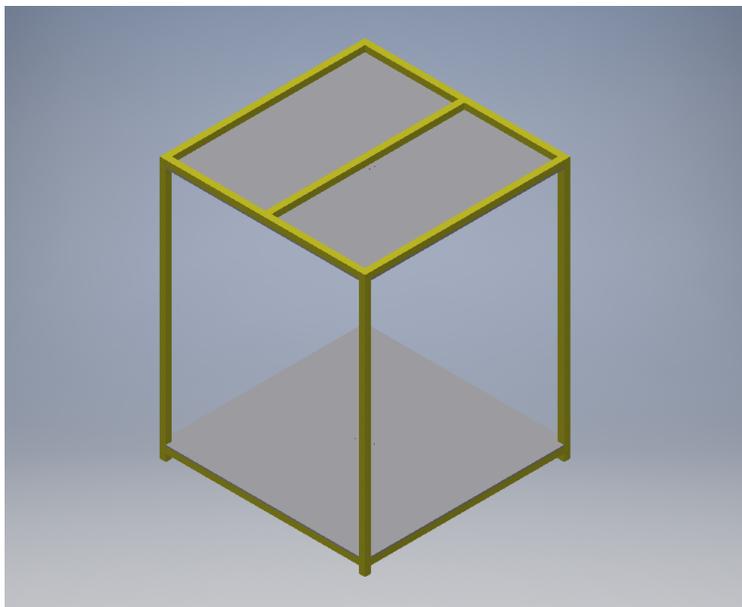


Figura 49: Diseño de carcasa para plataforma de pruebas.

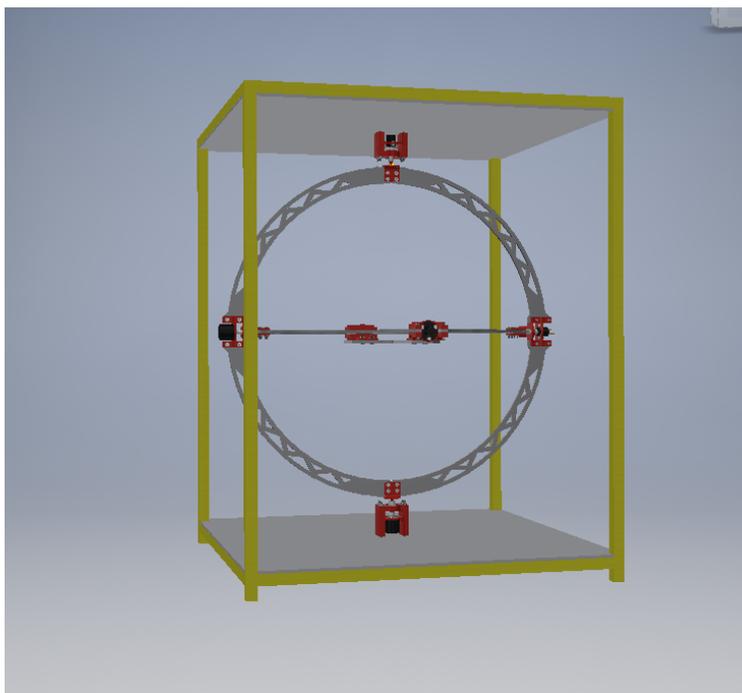


Figura 50: Diseño de ensamblaje final de plataforma de pruebas.

Una vez terminados los diseños se procedió a la fabricación de estos y el posterior ensamblaje de la plataforma. Con el ensamblaje terminado se procedió a realizar las conexiones de los sensores al controlador.



Figura 51: Ensamblaje de plataforma de pruebas.



Figura 52: Plataforma de pruebas para quadcopters

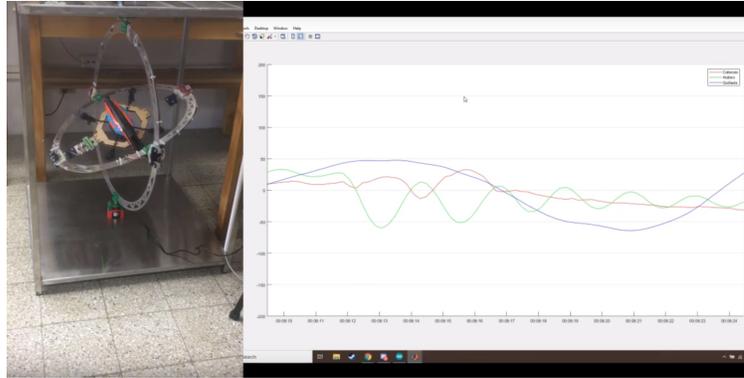


Figura 53: Pruebas de sistemas de control en plataforma de pruebas para quadcopters

Como se puede observar en la Figura 53 las pruebas se realizaron utilizando el quadcopter crazyflie 2.0, la plataforma terminada permite al usuario evaluar el desempeño de controlador de vuelo mediante una interfaz gráfica que muestra el movimiento en los grados de libertad de cabeceo, alabeo y guiñada.

Plataforma de pruebas Crazyflie 2.0

9.1. Desarrollo para plataforma de pruebas Crazyflie 2.0

Crazyflie 2.0 es un multirrotor producido por Bitcraze, este quadcopter posee ciertas características que lo hacen un bastante interesante:

- Tamaño pequeño. El crazyflie 2.0 posee un tamaño de 11.5 mm x 11.5 mm, esto le permite ser utilizado en ambientes cerrados como laboratorios. Esta siluete hace posible mantener un peso ligero de 27 gramos, sin embargo esto significa que el peso máximo de vuelo es de 42 gramos.
- Código abierto. Bitcraze ha hecho tanto el software como el hardware del crazyflie sean abiertos. Esto permite la configuración del firmware del Crazyflie para implementar varias funciones o su uso en otros proyectos, como vuelo autónomo.
- Flexibilidad y capacidad de expansión. Crazyflie posee entradas y salidas de propósito general (GPIO), pines de modulación de ancho de pulsos (PWM), y entradas y salidas analógicas.

9.2. Prueba de concepto

Debido al bajo peso máximo de vuelo del crazyflie, es deseable que la plataforma sea lo más ligera posible para lograr pruebas de los sistemas de control de actitud del quadcopter. Para la prueba de concepto se pensó utilizar una rótula de articulación para permitir el movimiento en los grados de libertad de cabeceo, alabeo y guiñada. Esta consiste de tres

piezas, una plataforma sobre la cual se retiene al quadcopter y dos piezas que forman la rótula de articulación.

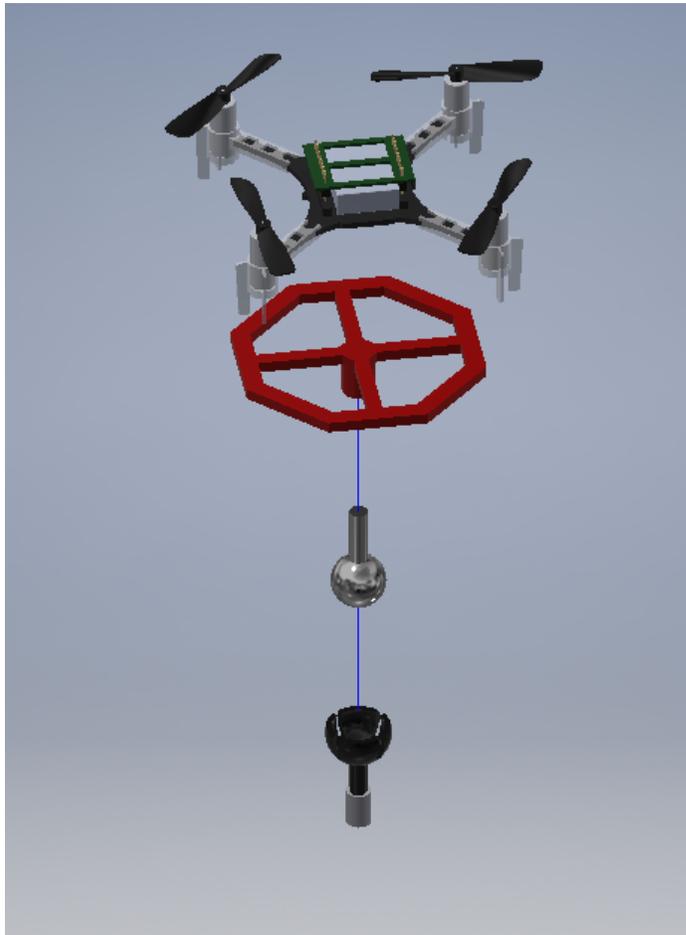


Figura 54: Diseño con rótula de articulación para plataforma de pruebas del crazyflie 2.0

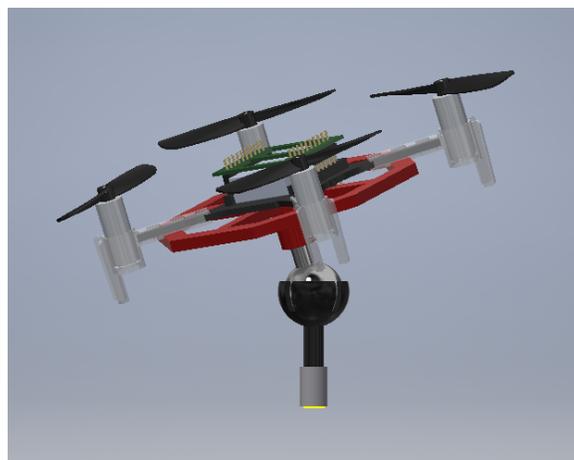


Figura 55: Ensamblaje de plataforma de pruebas utilizando rotula de articulación

Para obtener retroalimentación sobre el movimiento del quadcopter se optó por utilizar un crazyradioPA; este dispositivo se conecta al crazyflie utilizando ondas de radio, esto no solo permite el control del quadcopter desde una computadora, sino que también permite enviar variables como la altura, ángulos de inclinación en los tres grados de libertad principales y otras variables como temperatura.

Fabricar el diseño de rótula articulada resultó ser muy complicado, la rotula debe ser muy lisa para no generar mucha fricción entre la bola y la cavidad en la que esta se encuentra. Al consultar en múltiples talleres se determino que el material más factible para esta tarea sería teflón debido a su bajo coeficiente de fricción, sin embargo no se podía asegurar que la unión entre la bola y la cavidad ya que estas serían maquinadas a mano.

9.3. Primer prototipo

Debido a los problemas encontrados en la fabricación de una rotula de bola y cavidad, se procedió a implementar un diseño similar pero más fácil de producir. Es por ello que se decidió utilizar una unión universal para lograr el movimiento obtenido por la rótula en los grados de libertad de cabeceo y alabeo.

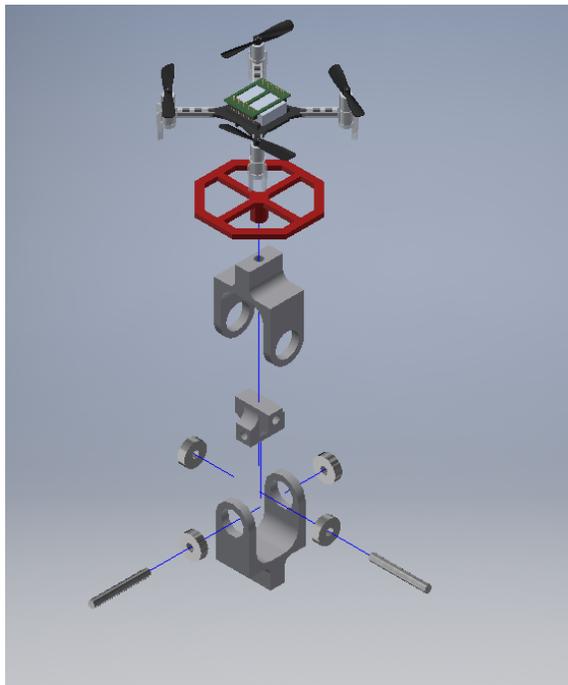


Figura 56: Diseño con unión universal para plataforma de pruebas del Crazyflie 2.0

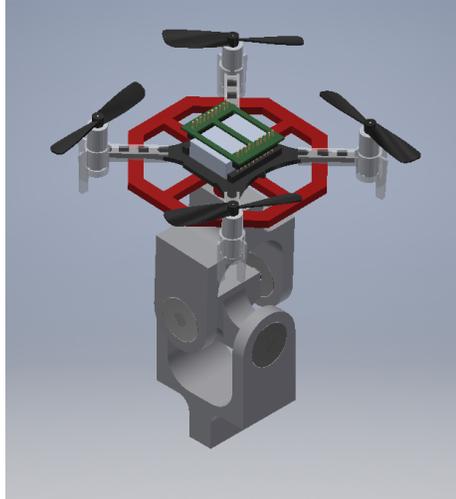


Figura 57: Ensamblaje de plataforma de pruebas utilizando unión universal.

La unión universal se compone de dos horquillas las cuales retienen dos cojinetes cada una, estas se conectan entre si mediante una cruceta. Esto permite el libre movimiento de cabeceo y alabeo, sin embargo no es posible obtener movimiento de guiñada con este diseño. Para obtener la guiñada fue necesario montar un cojinete en la base de la plataforma.

Una vez completado el diseño se utilizó una impresora 3D para fabricar las piezas, para ello se cambiaron los parámetros de la impresión para hacer las piezas lo más ligeras posibles, esto se logró removiendo material en el interior de las piezas. Este cambio hizo que las piezas fueran más frágiles, pero debido al bajo peso de Crazyflie 2.0 esto no fue un problema.

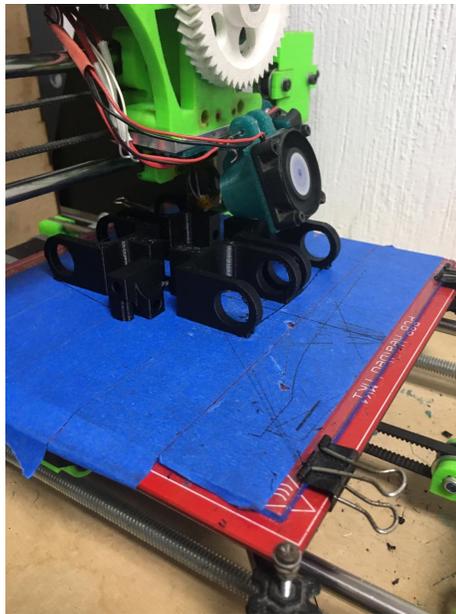


Figura 58: Impresión de plataforma de pruebas con uniones universales.

Una vez ensamblada la plataforma se procedió a montar el crazyflie con el objetivo de realizar pruebas. Durante las pruebas se notó que el Crazyflie no puede generar la suficiente fuerza para mover la plataforma de pruebas, esto a pesar solo la segunda horquilla ejerce peso sobre el quadcopter.

9.4. Segundo prototipo

Para el segundo prototipo se decidió utilizar una versión de la plataforma de pruebas utilizada para el Parrot AR 2.0. Sin embargo, se determinó que no sería posible establecer un diseño de tipo cardan completo debido a que solo con el peso de un anillo colector basta para inmovilizar al crazyflie en una plataforma de ese tipo. Por esta razón se modificó ligeramente el diseño para solo consistir de una plataforma central y permitir el movimiento solo en un grado de libertad:

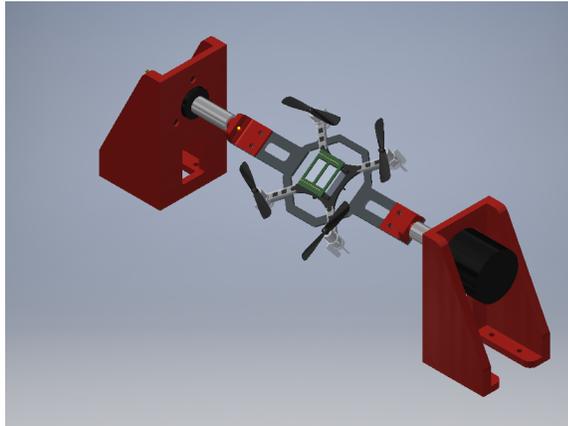


Figura 59: Diseño segundo prototipo para plataforma de pruebas Crazyflie 2.0

En la Figura 59 se puede apreciar el diseño del segundo prototipo para la plataforma de pruebas, esta está compuesta por una plataforma central sobre la cual se retiene al quadcopter, la plataforma central se conecta a un codificador rotacional y a un anillo colector en cada extremo respectivo. El codificador y el anillo colector son montados mediante dos piezas que funcionan como la base de la plataforma. Para esta plataforma el anillo colector es utilizado para distribuir energía al quadcopter debido a que este tiene un tiempo de vuelo de 10 minutos; de los doce canales del anillo colector seis se encuentran disponibles, estos pueden ser utilizados para hacer uso de las entradas y salidas analógicas o digitales del crazyflie 2.0.

En esta plataforma el codificador rotacional funciona como un sistema redundante a la telemetría del quadcopter. Los valores son capturados mediante un Arduino Nano y luego son enviados a una computadora mediante comunicación serial. Para leer los valores del codificador se utilizó el mismo proceso descrito en el segundo prototipo de la plataforma de pruebas para el Parrot AR 2.0.

Con el diseño finalizado, se procedió a fabricar las piezas utilizando una impresora 3D con PLA como material seleccionado. La plataforma central fue fabricada utilizando una cortadora láser, el material fue MDF de 3mm. Una vez obtenidas todas las piezas se procedió a ensamblar la plataforma y montar el quadcopter para realizar pruebas al sistema de control.

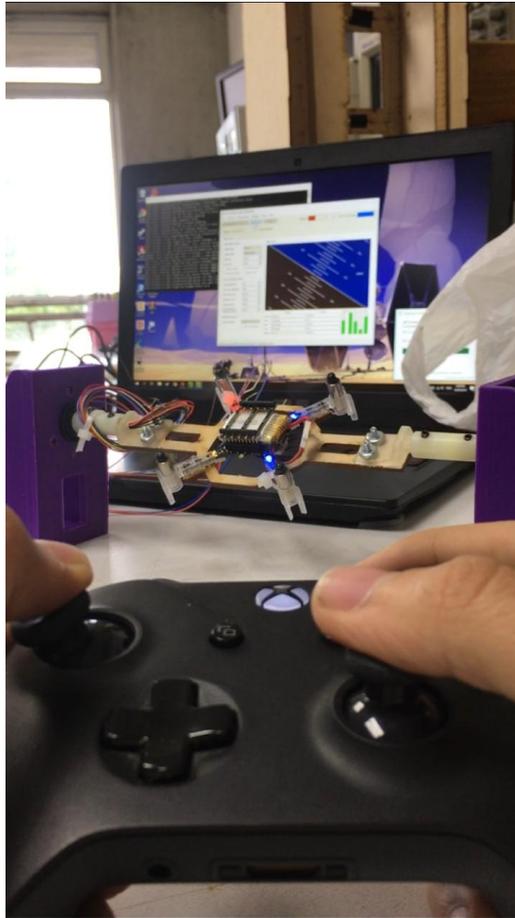


Figura 60: Pruebas de actitud en el segundo prototipo de la plataforma de pruebas para el Crazyflie 2.0

Como se puede observar en la Figura 60 solo es posible probar un grado de libertad a la vez, este puede ser alabeo o cabeceo dependiendo de la orientación sobre la cual se monta el quadcopter para hacer la prueba. Debido al diseño de la plataforma el movimiento en el grado de libertad de la guiñada no es posible, esto se debe al peso extra necesario para necesario para medir y permitir el movimiento. Se determinó que no es posible generar movimiento en grado de libertad de guiñada debido a que montar un anillo colector en este eje agregaría demasiado peso para movimiento del crazyflie 2.0.

Se determinó que las pruebas de realizadas en el segundo prototipo fueron exitosas, utilizando el software de vuelo en la PC se pudo observar que los valores de referencia para el movimiento de cabeceo y el valor medido estuvieron bastante a no más de 5 grados de diferencia. Utilizando una fuente de poder de 3.7 voltios fue posible alimentar al crazyflie durante una sesión de pruebas de 15 minutos, esto sin la necesidad de cambios de batería.

- Se implementó una plataforma de pruebas de sistemas de control de actitud para el crazyflie 2.0. Esta plataforma de pruebas permite el movimiento y la medición de un grado de libertad a la vez (Cabeceo o alabeo). Esta plataforma permite la distribución de energía desde una fuente de poder al crazyflie 2.0, esto con el objetivo de pruebas de los sistemas de control de actitud más largas sin depender de baterías.
- Debido al bajo peso máximo de vuelo no fue posible implementar una plataforma para el crazyflie 2.0 que permita movimiento en tres grados de libertad, ya que agregar un anillo colector o un codificador extra impiden el movimiento total del quadcopter.
- Se implementó una plataforma de pruebas de sistemas de control de actitud para el Parrot AR 2.0. Esta plataforma permite el libre movimiento y medición en los tres grados de libertad de cabeceo alabeo y guiñada, esto permite evaluar el desempeño sistema de control de actitud del Parrot 2.0 o cualquier otro quadcopter con dimensiones similares. La plataforma puede generar retroalimentación a una computadora por medio de una Tiva C en conexión por puerto serial.
- Se determinó que es posible modificar el algoritmo de control PID del quadcopter crazyflie 2.0, adicionalmente se verificó que también es posible cambiar el algoritmo de control PID por un algoritmo de control moderno. Esto se debe a que el crazyflie es una plataforma de código abierto, por lo cual todo el código del crazyflie 2.0 puede ser modificado según la especificación que se necesite.

- Para lograr una mayor precisión sobre la posición en los ángulos de movimiento, se recomienda utilizar codificadores rotacionales absolutos en lugar de incrementales. Esto ya que un codificador absoluto siempre retorna la posición actual, mientras que un codificador incremental únicamente detecta movimiento y dirección del movimiento.
- Implementar un quadcopter fijo a la plataforma Parrot AR 2.0. Es posible diseñar e implementar un quadcopter para la plataforma Parrot AR 2.0, este debería de utilizar un microcontrolador de tipo código abierto para poder ser programado y así implementar una variedad de algoritmos de control.

-
- [1] F. S. Barbosa, “4DOF Quadcopter: Development, Modeling and Control”, pág. 86, 2017. DOI: 10.11606/D.3.2017.tde-23102017-144556.
 - [2] U. Yüzgeç, İ. Ökten, H. Üçgün, A. R. Gün, T. Türkyilmaz, M. Kesler, C. Karaku-zu y G. Uçar, “Development of the Test Platform for Rotary Wing Unmanned Air Vehicle”, vol. 7575, págs. 18-24, 2016.
 - [3] S. Govindarajan, T. Agarwal, S. K. R., C. S. Suraj, G. Ramesh y V. Devi, “Design of Multicopter Test Bench”, *International Journal of Modeling and Optimization*, n.º May 2014, págs. 251-255, 2013, ISSN: 20103697. DOI: 10.7763/ijmo.2013.v3.276.
 - [4] N. N., “Control Systems Engineering”, págs. 547-548, 2012, ISSN: 00223395. DOI: 10.1016/0005-1098(86)90018-X.
 - [5] K. Ogata, *Modern control engineering, 5th*, 5th., 3. 1972, vol. 17, págs. 419-419, ISBN: 0136156738. DOI: 10.1109/TAC.1972.1100013. arXiv: 0605511 [cond-mat]. dirección: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1100013/>.
 - [6] M. Walid, N. Slaheddine, A. Mohamed y B. Lamjed, “Modelling, identification and control of a quadrotor UAV”, *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2018*, n.º October, págs. 1017-1022, 2018. DOI: 10.1109/SSD.2018.8570512.
 - [7] K. H. Ang, G. Chong e Y. Li, “PID control system analysis, design, and technology”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 13, n.º 4, págs. 559-576, 2005, ISSN: 10636536. DOI: 10.1109/TCST.2005.847331.
 - [8] V. Martinez, “Modelling of Flight Dynamics of a Quadrotor Helicopter”, *A MSc Thesis in Cranfield University*, págs. 1-289, 2007. dirección: http://prometheus4.com/share/quad-articles/martinez%7B%5C_%7D2007.pdf.
 - [9] M. Inc, *Slip Rings*. dirección: <https://www.moog.com/products/slip-rings.html>.
 - [10] M. C. Group, *Motion Technology Catalog*. dirección: <https://www.moog.com/content/dam/moog/literature/MCG/srcatalog.pdf>.
 - [11] *Encoders | Optical and Magnetic, Incremental and Rotary*. dirección: <https://www.anaheimautomation.com/manuals/forms/encoder-guide.php>.

- [12] Beisensors.com, *Optical Rotary Encoders - Rugged and Precise Speed and Position Encoder Products*. dirección: <http://www.beisensors.com/optical-rotary-encoders.html>.
- [13] Intel Corporation, “Introducing the SBC 80 / 10 Single Board Computer ... the lowest-cost computer system solution for OEM applications with CPU , Memory , Programmable Serial and Parallel I / O . . . all on a Single Printed Circuit Board !”,
- [14] *EK-TM4C123GXL Tiva C LaunchPad Evaluation Board*, ago. de 2018. dirección: <https://www.mouser.mx/new/Texas-Instruments/ti-tm4c123gxl-eval-board/>.
- [15] *Crazyflie 2.0*. dirección: <https://store.bitcraze.io/products/crazyflie-2-0>.
- [16] *FAQ*. dirección: <https://www.bitcraze.io/frequently-asked-questions-crazyflie-2.0/>.
- [17] *Parrot AR.Drone 2.0 Elite Edition*, feb. de 2018. dirección: <https://www.parrot.com/es/drones/parrot-ardrone-20-elite-edition>.

13.1. Planos de construcción

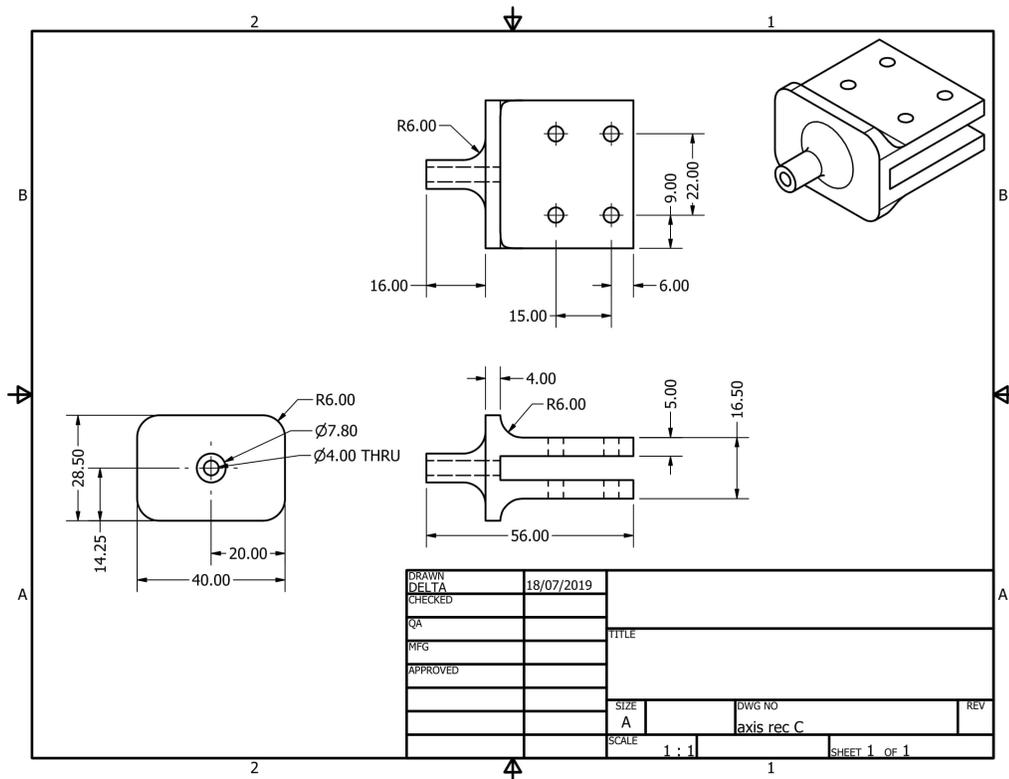


Figura 61: Planos receptor eje de alabeo y guiñada.

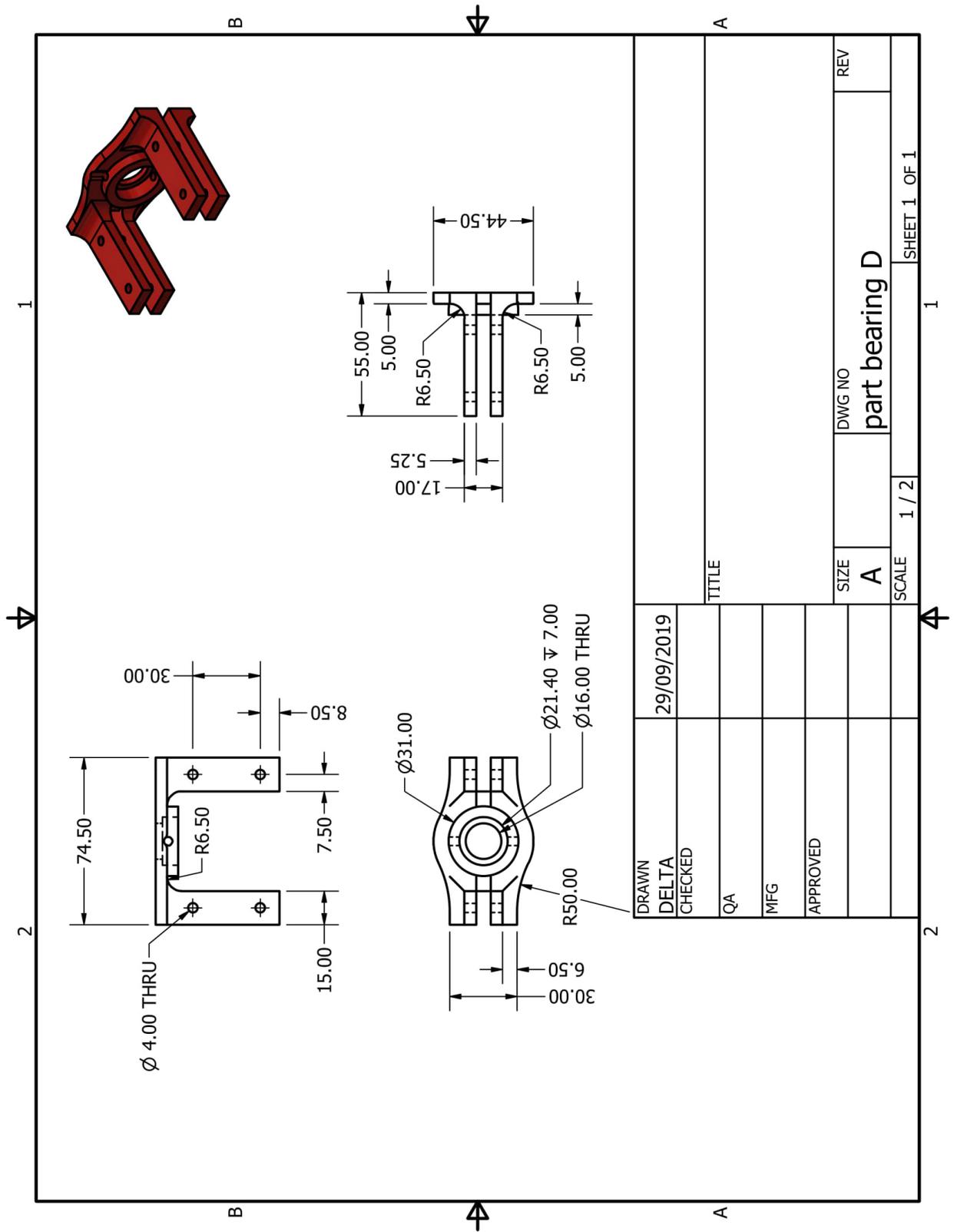


Figura 63: Planos montaje de cojinete.

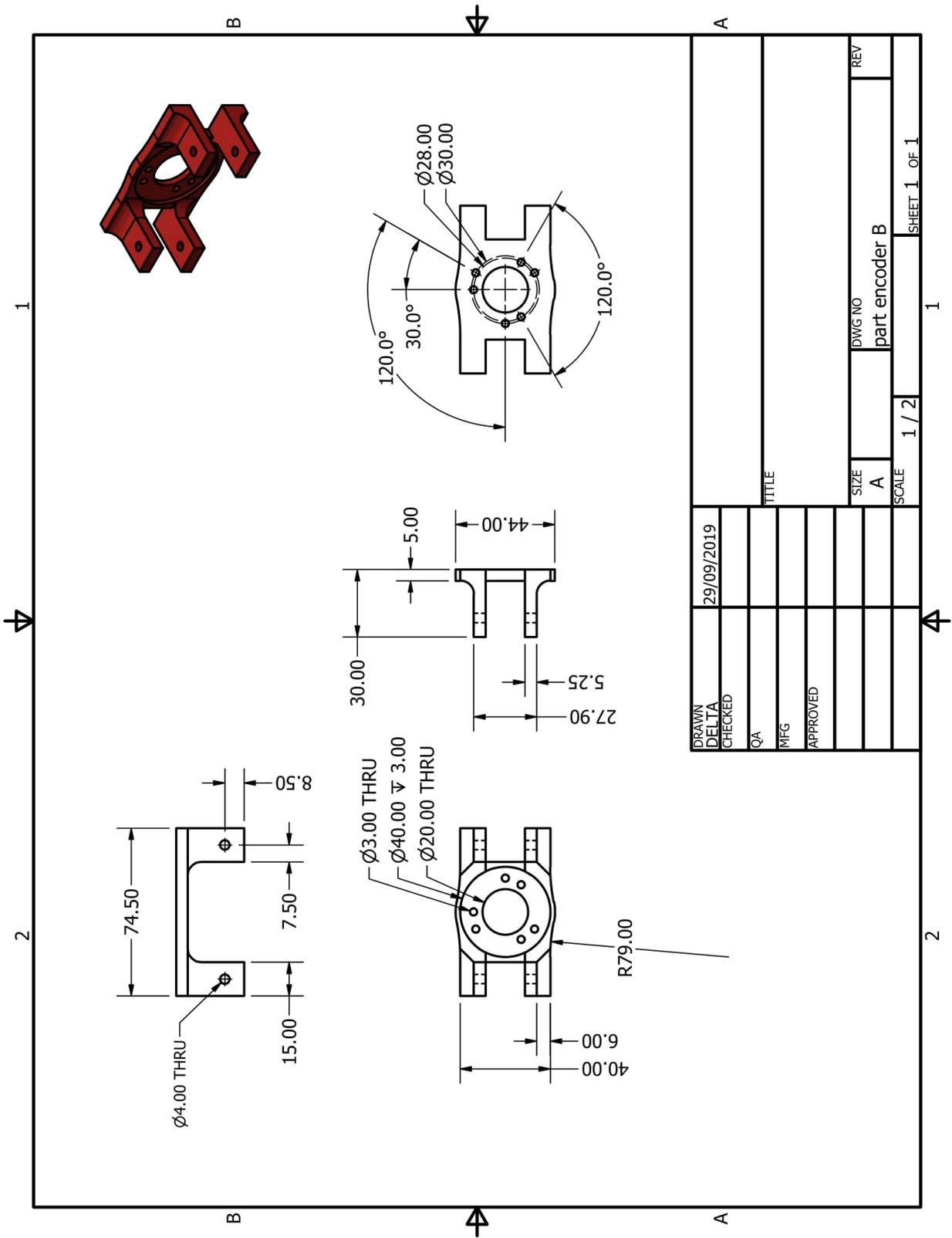


Figura 64: Planos montaje del codificador rotacional.

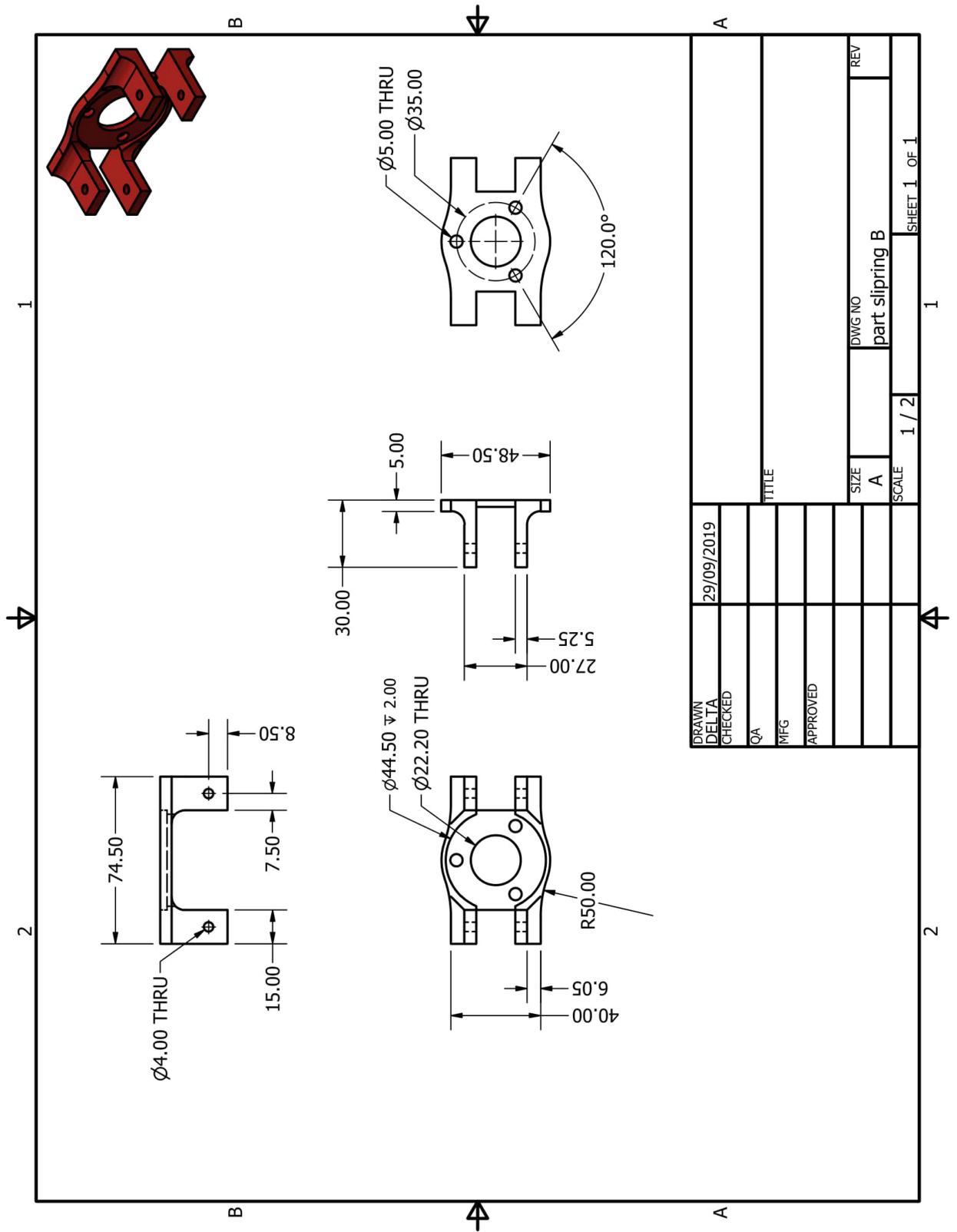
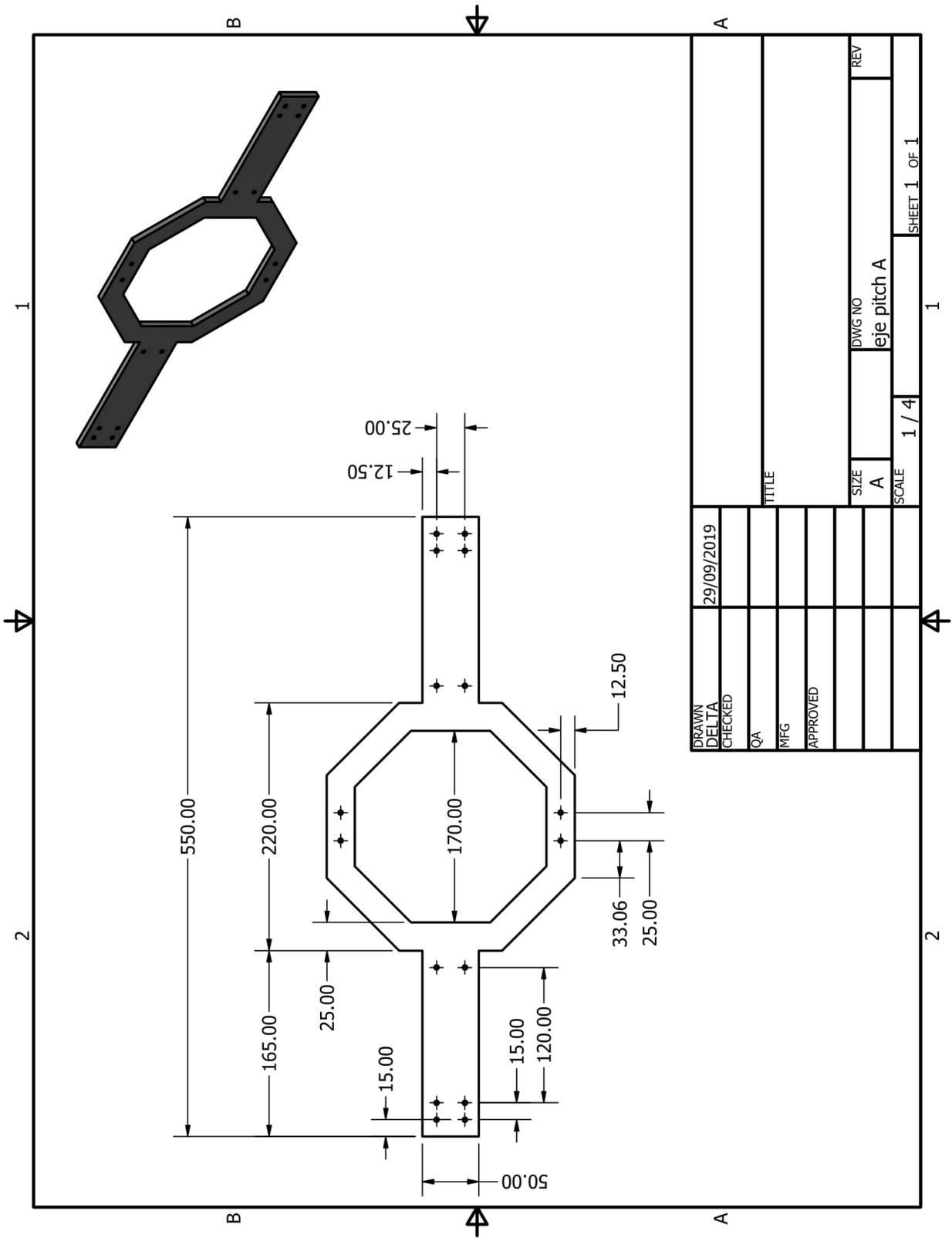


Figura 65: Planos montaje del anillo colector.



| | | | | | | |
|----------|------------|-------|--|--------|-------------|--------------|
| DRAWN | 29/09/2019 | TITLE | | SCALE | 1 / 4 | SHEET 1 OF 1 |
| DELTA | | | | SIZE | A | REV |
| CHECKED | | | | DWG NO | eje pitch A | |
| QA | | | | | | |
| MFG | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

Figura 66: Planos plataforma central.

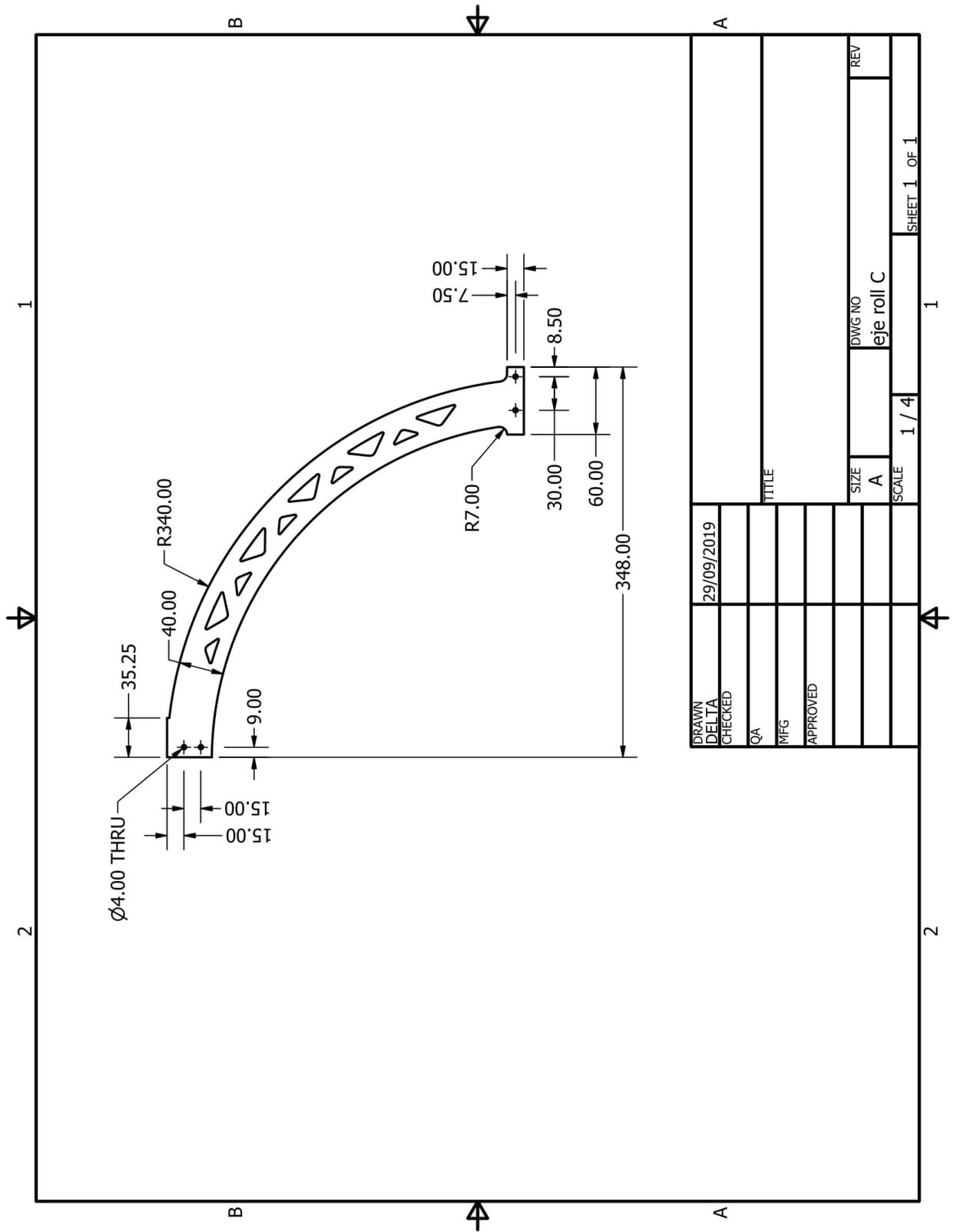


Figura 67: Planos segmento anillo intermedio.

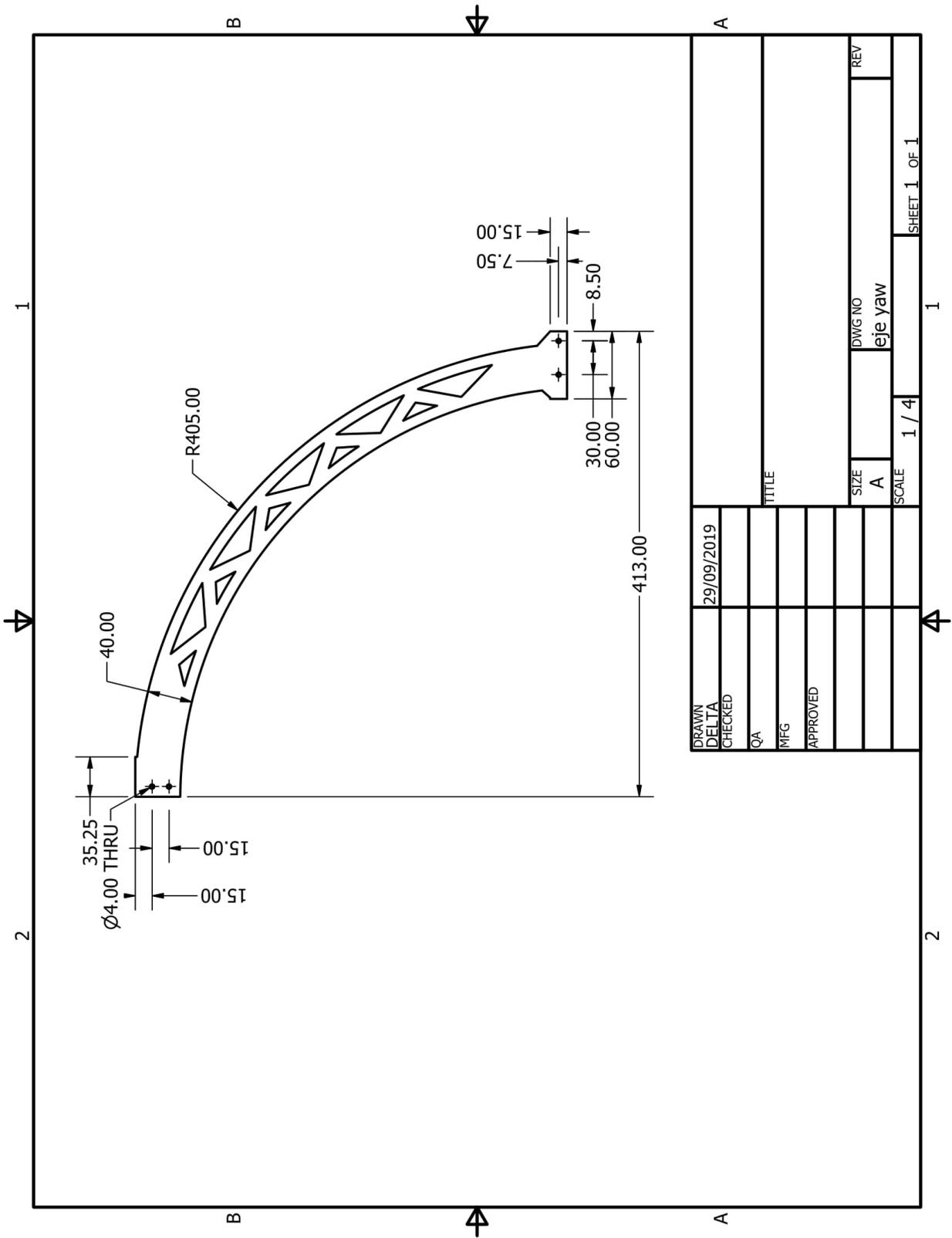
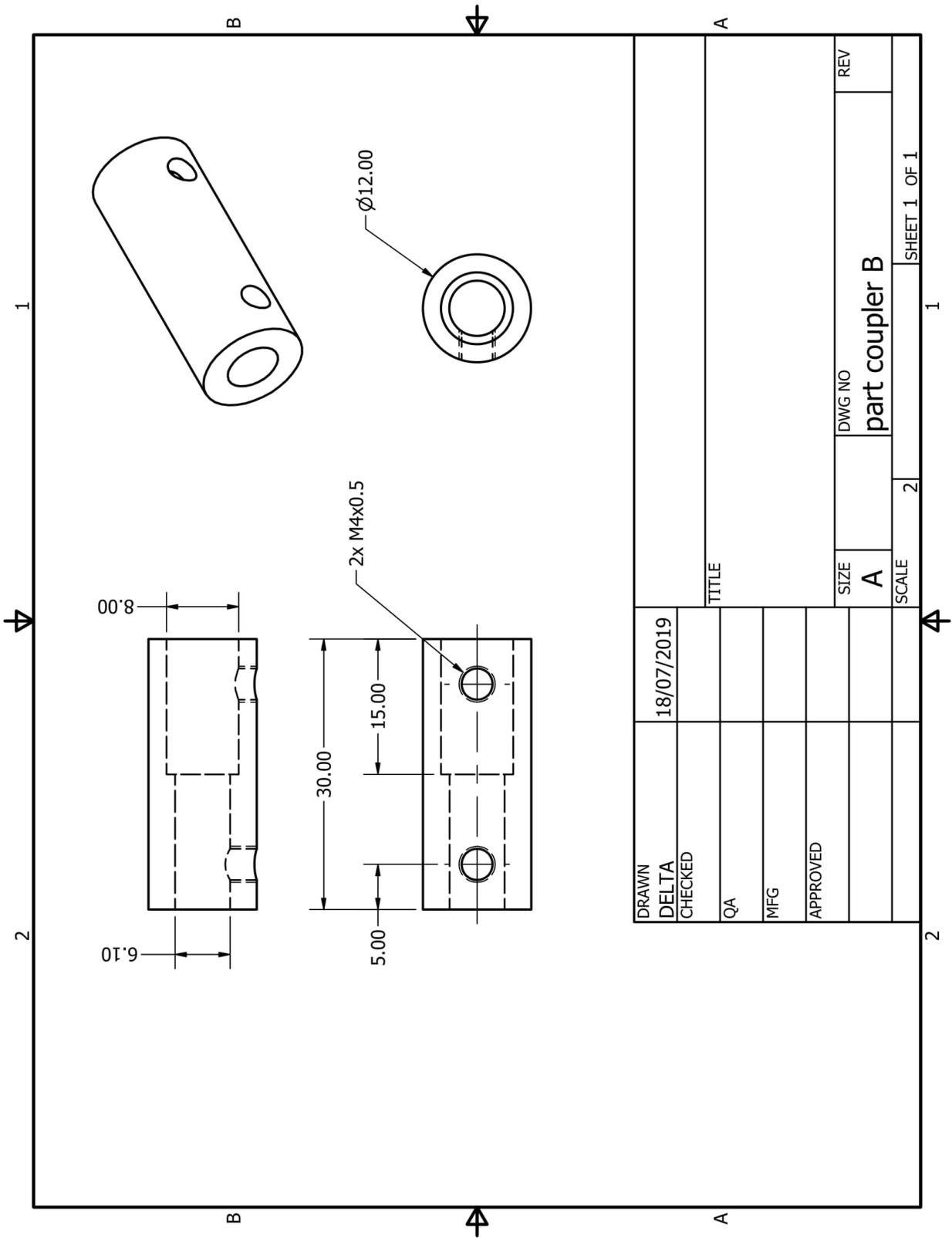


Figura 68: Planos segmento anillo exterior.



| | | | | | | |
|----------|------------|----------------|--|-------|---|--------------|
| DRAWN | 18/07/2019 | TITLE | | SCALE | 2 | SHEET 1 OF 1 |
| DELTA | | DWG NO | | SIZE | A | REV |
| CHECKED | | part coupler B | | | | |
| QA | | | | | | |
| MFG | | | | | | |
| APPROVED | | | | | | |

Figura 70: Planos acoplador codificador rotacional.

