Universitat Politècnica de Catalunya

ESEIAAT

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Proyecto de Final de Grado

Proyecto de diseño de un control de attitude de un CubeSat basado en motor brushless

Joan Rodriguez Ortiz

Director: Javier Gago Barrio

Co-director: Manel Lamich Arocas

Cuatrimestre Primavera 2020

26-09-2020

Declaración de honor

Declaro que:

La Memoria del Trabajo de Fin de Grado denominado *Proyecto de diseño de un control de attitude de un cubesat basado en motor brushless* ha sido desarrollado respetando la propiedad intelectual (citando las fuentes bibliográficas utilizadas en la redacción de dicho trabajo), así como cualquier otro derecho, por ejemplo, el de imagen, que pudiese estar sujeto a protección del copyright.

En virtud de esta declaración afirmo que este trabajo es inédito y de mi autoría, por lo que me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo Fin de Grado y asumo las consecuencias administrativas y jurídicas que se deriven en caso de incumplimiento de esta declaración.

Y para que así conste, firmo la presente declaración en

Barcelona, a 26 de septiembre de 2020

Fdo:

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a Javier Gago por hacer posible este proyecto. Su visión y motivación por desarrollar un satélite a nivel académico han sido un gran impulso a la hora de realizar este trabajo.

También me gustaría agradecer a Manel Lamich por sus ideas y su capacidad de ofrecer una guía en los momentos clave.

Cabe notar que este trabajo de final de grado ha sido realizado en unas circunstancias muy especiales. Este trabajo empezó a mediados de febrero del 2020. A partir de marzo dejó de ser posible asistir al laboratorio debido a un confinamiento general producido por la pandemia de COVID-19. Esto ha planteado muchos retos añadidos y por ello estoy especialmente agradecido a ambos directores por el esfuerzo que han hecho al realizar un seguimiento del trabajo de manera remota.

Finalmente me gustaría agradecer a todas las personas que me han ayudado, apoyado y acompañado en este proceso: Daniel Vidal-Barraquer, Pablo A. Moreno, Noemi Castiñeiro y Marina Rodriguez.

Resumen

Este proyecto es la continuación de otro ya realizado el año previo[1] y forma parte de una serie de proyectos promovidos por el grupo de investigación DISEN de la UPC (Universitat Politècnica de Catalunya) con el objetivo de diseñar y construir un CubeSat con enlace óptico de comunicaciones.

El objetivo del presente proyecto es desarrollar un sistema de control de actitud de un CubeSat mediante una rueda de inercia (Reaction Wheel). Se realizará el diseño de un módulo, el cual controla la orientación del satélite en un eje (el satélite llevará un módulo para cada uno de los 3 ejes).

Se estudiarán y calcularán las condiciones de trabajo del sistema para poder dimensionarlo correctamente.

Se realizará el diseño de una PCB (Printed Circuit Board), la cual contendrá los circuitos y componentes necesarios para controlar el motor. Dicha PCB estará basada en la placa de expansión IHM07M1 de *STM Microelectronics* y contendrá el microcontrolador STM32F302R8 y el driver L6230. También contendrá la IMU (Inertial Measurement Unit) ICM20948.

Se desarrollará el software necesario para controlar el motor mediante FOC (Field Oriented Control) y poder darle consignas desde un computador externo mediante i2c.

Se diseñará y fabricará mediante impresión 3d un encapsulamiento del módulo para poderlo incorporar a la estructura de un CubeSat.

Para sacar conclusiones de la viabilidad del sistema se realizará una batería de pruebas y con ello se validará o rechazará el diseño.

Índice

1. Introducción 1
1.1. Historia de los CubeSat 2
1.2. Clasificación de satélites 2
1.3. Sistemas comunes en los CubeSat 3
1.3.1. Estructura 3
1.3.2. Comunicaciones 4
1.3.3. Transmisión de órdenes y manejo de datos 5
1.3.4. Potencia eléctrica 5
1.3.5. Propulsión 6
1.3.6. Guiado, navegación y control (GNC) 6
1.4. Reaction Wheels 8
1.5. Objetivo y alcance del proyecto 10
2. Fundamentos teóricos del funcionamiento de los volantes de inercia 11
2.1. Especificaciones e hipótesis 11
2.2. Conceptos de inercia y reacción 11
2.3. Motores brushless 13
2.3.1. Sensored vs sensorless 13
2.3.2. BLDC vs PMSM 15
3. Desarrollo y experimentación 17
3.1. Especificaciones del diseño 17
3.1.1. Especificaciones mecánicas 17
3.1.2. Especificaciones eléctricas 17
3.1.3. Funcionalidades 18

3.1.4. Elección de los elementos (solución elegida) 18
3.2. Caracterización del motor 20
3.2.1. Forma de onda 20
3.2.2. Número de polos 21
3.2.3. Otros parámetros 22
3.3. Desarrollo de la PCB 22
3.3.1. Requerimientos 23
3.3.2. Elección de componentes y compatibilidades 24
3.3.3. Realización del esquemático 25
3.3.4. Layout de la placa 34
3.3.5. Fabricación 40
3.4. Programación del microcontrolador 41
3.4.1. Entorno de programación 41
3.4.2. Motor control workbench 42
3.4.3. Programación de la imu 43
3.5. Diseño mecánico 43
3.6. Pruebas y tests 47
3.6.1. Funcionamiento del motor 47
4. Presupuesto y valoración económica 50
4.1. Mano de obra 50
4.2. Material amortizable 51
4.3. Bill of Materials PCB 52
4.4. Material para la implementación del sistema 55
4.5. Total 56
5. Esquemáticos 57

6. Planos 63

7. Conclusiones y planificación del trabajo futuro propuesto 68

8. Bibliografía 69

1. INTRODUCCIÓN

Si bien este trabajo se centra en el desarrollo y prototipado de un sistema de control de actitud mediante una Reaction Wheel, comenzaremos por ofrecer una visión general del vehículo espacial en el que se incorpora este sistema, así como de otros sistemas análogos que existen actualmente. Resulta necesario que un lector no iniciado en este campo posea unos conocimientos mínimos introductorios para poder entender la función de una Reaction Wheel. Este es, a su vez, parte del trabajo previo que ha tenido que realizar el autor del proyecto, ya que ha sido necesaria una composición de lugar.

Este trabajo parte de otro ya realizado el año pasado por otro proyectista. Toma como punto de partida las conclusiones resultantes y se ha redactado con la finalidad de que sea de la máxima utilidad para el siguiente estudiante que se embarque en la implementación de una Reaction Wheel en el proyecto general del desarrollo de un CubeSat por el departamento de electrónica de la ESEIAAT. No es un prototipo definitivo y aún queda camino por recorrer para que esté listo y pueda ser instalado en un CubeSat, pero significa un avance en la dirección correcta. Se aportarán, por lo tanto, un buen número de referencias, fuentes de información. También se ofrecerán a modo de libre disposición todos los archivos fuente del diseño de las PCBs (Placas de Circuito Impreso), software y archivos de diseño 3D, así como recomendaciones de mejora.

El punto central de este proyecto y su mayor logro ha sido el desarrollo de la circuitería necesaria para realizar el control del motor. Uno de los puntos de mejora que tuvo el proyecto predecesor fue la incapacidad de realizar un control adecuado del motor en ciclo cerrado. Esto fue causado por un error en la elección del circuito integrado del driver (Electronic Speed Controler) del motor (un DRV10983 de Mikroe), el cual no especificaba bien en el datasheet sus características de corriente mínima admisible, y resultó no ser válido para el motor usado. En este trabajo se ha optado por la vía de hacer el driver desde cero, usando el chip L6230 de ST Microelectronics, el cual es una integración de 6 MOSFET (Transistor de Efecto de Campo Metal-Óxido-Semiconductor) en un puente trifásico con protección de sobrecorriente, sobretemperatura y algunas funciones añadidas.

1.1. Historia de los CubeSat

Los CubeSat empezaron en 1999 como un trabajo colaborativo entre Jordi Puig-Suari, profesor de la universidad politécnica de California (Cal Poly) y Bob Twiggs, profesor en el Laboratorio de desarrollo de sistemas espaciales de la universidad de Stanford (SSDL). El objetivo del proyecto fue abrir la puerta al espacio a las universidades mediante un programa espacial que las mismas se pudieran permitir. Gracias a los CubeSat, muchas universidades e incluso escuelas de secundaria y primaria cuentan actualmente con un programa espacial. [2]

Su reducido tamaño y su forma estandarizada permiten que su precio sea muy reducido. También permiten la realización de misiones de alto riesgo que las agencias espaciales no estarían dispuestas a llevar a cabo a gran escala.

Los CubeSat se ponen en órbita mediante lanzamientos de las agencias espaciales en los cuales hay capacidad extra o en lanzamientos a la Estación Espacial Internacional

Más del 50% de las misiones que se realizan son de carácter científico. Algunos ejemplos de dichas misiones son: estudios sobre el cambio climático, estudio de objetos cercanos a la tierra, biología o astronomía.

1.2. Clasificación de satélites

Los satélites se pueden clasificar según múltiples parámetros: la altura de su órbita (LEO: *Low Earth Orbit*, GEO: *Geostationary Orbit*, MEO: *Medium Earth Orbit*), el tipo de función que realizan (meteorológico, posicionamiento, investigación, comunicaciones…), tamaño y masa, entre otros.

Según su masa, se clasifican en[3]:

- Grandes satélites: >1000 kg
- Satélites medianos: 500 a 1000 kg
- Satélites pequeños: <500 kg
    - Minisatélites: 100 a 500 kg
    - Microsatélites: 10 a 100 kg
    - Nanosatélites: 1 a 10 kg

- Picosatélites: 100 g a 1kg
- Femtosatélites: 10 g a 100 g
- Attosatélites: 1g a 10 g
- Zeptosatélites: 0,1g a 1 g

La clasificación que define un CubeSat incluye su peso y su tamaño. Generalmente se encuentran en el grupo de nanosatélites y tienen unas medidas muy específicas.

Pueden tener diferentes tamaños, los cuales se basan en el estándar “unidad”, el cual está referido como 1U. Un CubeSat de 1U es un cubo de 10 cm con una masa aproximada de 1 a 1.33kg. Existen otras medidas muy populares, como los de 1.5U, 2U, 3U y 6U y se desarrollan otros tamaños basados en el estándar “unidad”.

Uno de los requerimientos del presente proyecto es que el sistema se pueda adaptar a un CubeSat de 1U.

1.3. Sistemas comunes en los CubeSat

Para conseguir llevar a cabo la misión o las misiones propuestas en el desarrollo de un satélite, el mismo debe poseer los sistemas adecuados que se lo permitan. Estos sistemas auxiliares (o subsistemas) pueden variar entre diferentes misiones, pero los más comunes son[4]:

1.3.1. ESTRUCTURA

Se define como estructura primaria o chasis aquella que está diseñada para transmitir cargas desde la interfaz del lanzamiento y despliegue hacia el CubeSat y que sirve de soporte para los sistemas contenidos en él. Las estructuras típicas en los CubeSat son del tipo “exoesqueleto” y suelen ser metálicas. La estructura suele servir también como radiador térmico, para controlar la temperatura de los componentes electrónicos.

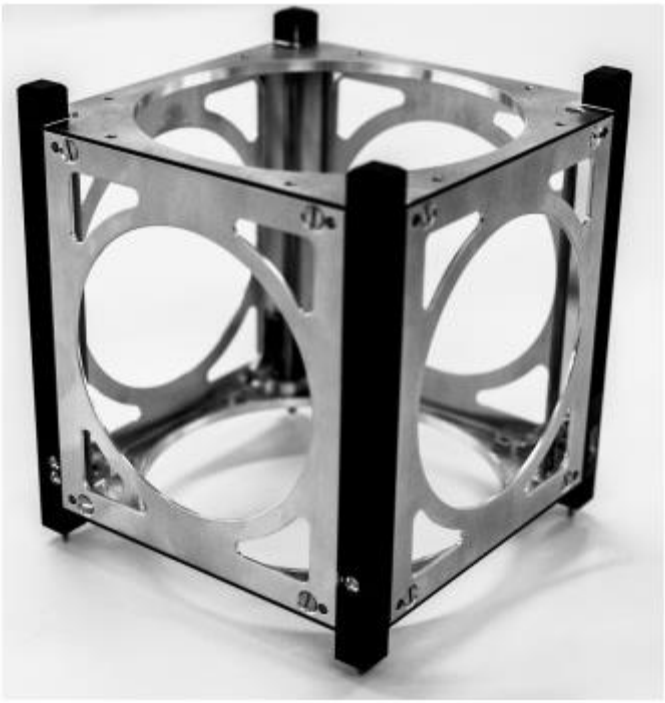


Figura 1.1 Estructura Primaria de un CubeSat. Fuente: Clyde Space

1.3.2. COMUNICACIONES

El sistema de comunicaciones permite transmitir datos y telemetría a y desde tierra y entre dos satélites (ISL: *Inter Satellite Link*). Se usa un enlace de radio, el cual puede estar situado en diferentes bandas del espectro (VHF: *Very High Frequency*, UHF*: Ultra High Frequency*, banda L, banda K…). En misiones en el espacio profundo se hace casi imprescindible utilizar antenas direccionales. Esto implica que el vehículo espacial debe poseer la capacidad de apuntar con mucha precisión al destino donde quiera realizar la transmisión. En el caso de los CubeSat, como suelen operar en LEO, no suele ser necesaria una antena direccional. Se suelen utilizar antenas monopolo o de tipo *patch* en las bandas VHF y UHF. También se han realizado con éxito misiones de comunicación mediante láser, como el proyecto OCSD (*Optical Communications and Sensor Demonstration*)[5]

1.3.3. TRANSMISIÓN DE ÓRDENES Y MANEJO DE DATOS

Los pequeños satélites tienen el reto de integrar en un espacio muy reducido aplicaciones complejas de ciencia y tecnología. Además, dichos sistemas deben ser fiables y tener un buen rendimiento. En los CubeSat, normalmente, se suele encontrar un compromiso en la complejidad de los sistemas y la fiabilidad de los componentes, priorizando el precio y la facilidad de desarrollo y utilizando software de código abierto. Así se consigue una entrada en el desarrollo de sistemas espaciales.

Se suelen utilizar componentes comerciales (COTS: *Commercial Off The Shelf*). Se suelen usar factores de forma comunes como el CompactPCI (véase figura 1.2) Y el PC/104. También se suelen usar Microcontroladores y FPGAs (*Field Programmable Gate Array*). Se han usado procesadores comunes como ARM, PIC o ATMEL.

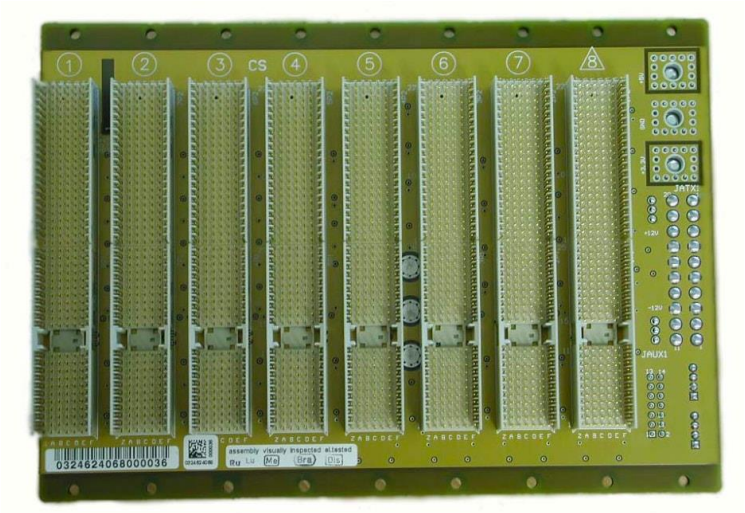


Figura 1.2 Panel CompactPCI de 8 slots. Fuente: Comtel Electronics

1.3.4. POTENCIA ELÉCTRICA

Potencia eléctrica (EPS: *Electrical Power System*). Incluye generación, acumulación y distribución de potencia eléctrica. La generación eléctrica puede realizarse mediante células fotovoltaicas o generadores eléctricos termonucleares (como radioisótopos). La acumulación suele realizarse en baterías, normalmente recargables. La distribución de la potencia eléctrica (PMAD: *Power Management and Distribution*) permite el control de la potencia eléctrica a las cargas de los diferentes sistemas. Generalmente se usa hardware hecho a medida para satisfacer las necesidades

específicas de la misión. El objetivo es conseguir una alta potencia específica (o ratio potencia-masa [Wh/kg]) para minimizar el impacto en la masa total.

1.3.5. PROPULSIÓN

Para vehículos espaciales de reducido tamaño, los sistemas de propulsión presentan retos particularmente complejos. Actualmente ya se han lanzado varios sistemas de propulsión para pequeños satélites con cierto éxito. Se usan para realizar maniobras en órbita y movimientos de gran precisión. Existen sistemas de propulsión química (*Hydrazine, Green propellants, Cold Gas, Solid propellant rockets*), de propulsión eléctrica (*Electrosprays, Ion engines, Pulsed Plasma, Vacuum Arc Thrusters, Hall Effect Thrusters, Radio Frequency Thrusters*), e incluso sistemas sin propelente (*Solar Sails*).

1.3.6. GUIADO, NAVEGACIÓN Y CONTROL (GNC)

Guiado, navegación y control (GNC: *Guidance, Navigation and Control*). Este subsistema incluye los componentes necesarios para la determinación de la posición y los componentes necesarios para el sistema de determinación y control de la actitud.

1.3.6.1. Adquisición de datos

1.3.6.1.1. Star trackers

Un *Star Tracker* es un sistema que tiene la capacidad de comparar una imagen digital capturada mediante un sensor CCD o CMOS con un catálogo estelar (Spratling y Mortari[6]). Este sistema provee una estimación precisa de la orientación del satélite sin necesidad de ningún sistema externo o de radio ayuda. Es la versión espacial de un sextante. Actualmente existe una gran variedad de *Star Trackers* comerciales implementables en pequeños satélites.

En el proyecto espacial de la ESEIAAT está contemplado el desarrollo y uso de un *Star Tracker* para la determinación de la actitud el nanosatélite.

1.3.6.1.2. Magnetómetros

Los magnetómetros permiten medir el campo magnético local. Esta medición puede proporcionar estimaciones de actitud y posición orbital. La gran mayoría de CubeSats usan magnetómetros comerciales.

1.3.6.1.3. Giróscopos

Los giróscopos proporcionan medición de la velocidad angular. Existen dos tipos: de fibra óptica (FOG: *Fiber Optic Gyros*) y tipo MEMS (*Microelectromechanical system*). Los de fibra óptica tienen un rendimiento superior a los MEMS, pero también tienen un precio y una masa mayores.

Tienen la característica de que tienen una desviación constante con el tiempo. Esta característica los hace inviables como único sensor de actitud. Necesitan que se les actualice la posición cada cierto tiempo.

1.3.6.1.4. IMU (Unidades de Medición Inercial)

Las Unidades de Medición Inercial (en inglés: *Inertial Measurement Unit*) son un conjunto de sensores incorporados en una sola unidad. Contienen un magnetómetro, un giróscopo y un acelerómetro en 3 ejes. Se usan en el cálculo de la actitud del satélite y proveen una gran precisión.

1.3.6.1.5. Sensores solares

Los sensores se usan para conseguir una estimación de la posición del sol en la estructura del satélite, la cual puede ser usada para calcular la actitud. Pueden ser también usados para realizar direccionamiento de paneles solares. Tienen una resolución aproximada de 0.1º.

1.3.6.1.6. Sensores de horizonte

Son sensores que detectan radiación infrarroja. En función de la radiación esperada, sea en el horizonte o entre los polos y el ecuador, pueden calcular la actitud respecto a la tierra. Por eso también son llamados Sensores de Tierra (*Earth Sensors*). Pueden ser usados también en otros planetas. Pueden llegar a tener una resolución de 0.25º.

1.3.6.1.7. Gps

Para satélites que se encuentran en LEO, los receptores GPS (Ground Positioning System) son el principal método para adquirir la posición en órbita. En nanosatélites se suelen usar sistemas comerciales, incluso algunos comunes usados en smartphones y similares. Proporcionan información de posición con una precisión de 10m.

1.3.6.2. Actuadores

1.3.6.2.1. Magnetorquers

Los magnetorquers son una tecnología ampliamente usada en vehículos espaciales de pequeño tamaño. Proveen torques de control perpendiculares a las líneas de campo del campo magnético externo local (el campo magnético de la tierra). Proveen torques de baja magnitud y la velocidad del cambio de actitud es muy baja. Debido a su facilidad de montaje y funcionamiento, son muy usados solos o en combinación con ruedas de inercia para reducir el exceso de momento y evitar que la rueda llegue a su velocidad de saturación. Tienen el inconveniente que sólo pueden actuar en 2 ejes a la vez, siempre en el plano perpendicular al campo magnético.

1.3.6.2.2. Propulsores

Los sistemas de propulsión mencionados en el apartado 1.3.4 pueden ser asimismo utilizados para el guiado, navegación y control.

1.3.6.2.3. Reaction Wheels

Son el objeto de estudio de este proyecto. Proporcionan capacidad de apuntar el satélite con gran precisión. Se considerarán en más detalle en los siguientes apartados.

1.4. Reaction Wheels

En aplicaciones espaciales es altamente deseable eliminar todo tipo de contactos mecánicos, sean cojinetes, engranajes, escobillas de motores, etc. Por eso se utilizan, desde hace ya muchos años, motores tipo brushless, los cuales no poseen escobillas y consisten de una armadura que gira sobre un eje magnético.

Una Reaction Wheel opera a través del principio de conservación del momento angular. Posee un volante de inercia el cual tiene la capacidad de acumular energía rotacional. Cambios en la aceleración angular del volante de inercia causan una aceleración del resto del satélite en la dirección opuesta. Tienen la capacidad de rotar el satélite únicamente alrededor del eje de su centro de masas. No proveen fuerza de translación, por lo que no permiten mover el satélite de un sitio a otro.

Para conseguir un control en los tres ejes, se deben montar por lo menos 3 Reaction Wheel en 3 direcciones diferentes. Es común montar una cuarta Reaction Wheel para aportar redundancia al sistema de control de actitud. Hay diferentes tipologías. En la figura 1.3 podemos observar una tipología de 3 Reaction Wheel montadas en los 3 ejes, mientras que en la figura 1.4 vemos una tipología de 4 Reaction Wheel montadas en configuración de tetraedro.

Figura 1.3 Reaction Wheel de 3 ejes. Fuente: Astrofein

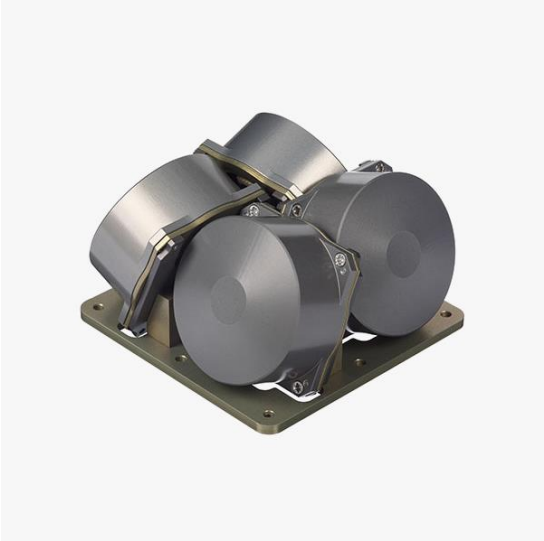


Figura 1.4 Reaction Wheel de 4 ejes. Fuente: Nanoavionics

Se controlan los cambios de velocidad electrónicamente mediante un computador o microcontrolador. Debido a que el volante de inercia posee sólo una pequeña parte de la masa total del satélite, cambios en la velocidad de la Reaction Wheel tienen como consecuencia pequeños cambios en el ángulo del satélite. Esto permite ajustes muy precisos en la actitud del satélite.

Con el tiempo, la rueda puede llegar a acumular suficiente momento de inercia como para llegar a su velocidad máxima permitida. Este fenómeno se llama saturación e impide que se pueda continuar utilizándola. Para contrarrestar este fenómeno se debe diseñar un sistema que permita

desaturar la rueda. Se suele hacer con magnetorquers o con propulsores de diferentes tipos. Esta operación de desaturación se llama *moment dumping*.

Para caracterizar una Reaction Wheel y diseñarla de manera adecuada se deben tener en cuenta todos los factores externos que puedan tener un efecto en la actitud del satélite. En el caso de un CubeSat los dos factores a tener en cuenta son la radiación solar y el drag aerodinámico.

La radiación solar causa una perturbación denominada presión de radiación. Es un efecto causado por la exposición de cualquier superficie a la radiación electromagnética. Depende de la densidad de flujo de la radiación y de la cantidad de dicha radiación que haya sido reflejada o absorbida.

El drag aerodinámico es la resistencia que ejerce la atmósfera al avance del satélite en movimiento. En LEO, la densidad de la atmósfera es enormemente pequeña, pero sigue teniendo un efecto sobre la trayectoria y orientación del satélite.

1.5. Objetivo y alcance del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un driver para un motor brushless específico para una Reaction Wheel. Para comprobar la viabilidad del driver, se construirá una Reaction Wheel en un eje.

Figura 1.5 Motor brushless utilizado

Se ha determinado que el motor a utilizar es un motor de bajo coste adquirido online (ver figura 1.5) del que no se posee ningún datasheet. El volante de inercia serán varios discos de disco duro de 2,5”. También se ha determinado que el driver de medio puente a utilizar será el chip L6230Q y el microcontrolador será un STM32F302R8, ambos componentes del fabricante ST Microelectronics. El sistema debe tener la capacidad de sensar orientación magnética y cambios de orientación en su eje de rotación, por lo que también se dotará de una IMU ICM-20948.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS VOLANTES DE INERCIA

2.1. Especificaciones e hipótesis

En este apartado se listarán las especificaciones que van a determinar el diseño de la Reaction Wheel. Debido a que el CubeSat en el que se pretende montar la Reaction Wheel no está completamente definido, debemos aproximar el resto de características.

- Las dimensiones del CubeSat son 10 x 10 x 10 cm[7]
- El microcontrolador a usar será un STM32F302R8
- El Half Bridge Driver a usar será un L6230Q
- Se usará una IMU ICM-20948. Incorpora 3 magnetómetros, giróscopos y acelerómetros, uno para cada eje.
- La rueda de inercia serán varios discos de disco duro.
- El motor a usar será un motor de bajo coste adquirido en una tienda online.
- El peso del CubeSat será de 1 kg. Este valor es arbitrario y se ha usado para ofrecer una continuidad en los cálculos realizados en el proyecto antecesor a éste.
- La velocidad máxima del motor se ha observado experimentalmente que es de unas 8000rpm.
- La velocidad rotacional máxima a la que puede llegar nuestro satélite será de 2 Hz (120RPM)[7]. Esta asunción se realiza porque los dispensadores de CubeSat se diseñan específicamente con este fin.

2.2. Conceptos de inercia y reacción

La Reaction Wheel debe ser capaz de dos funciones principales: estabilizar el CubeSat después del lanzamiento y realizar ajustes de actitud muy precisos.

Para la primera función, debemos determinar el momento de inercia angular del CubeSat. Para ello, asumiremos que es un cubo macizo de 1 kg con una densidad uniforme y con el centro de masas situado en el centro geométrico del CubeSat.[1]

Esto está determinado por la ecuación:

$$I_{cubesat} = \frac{1}{6} m s^2 \tag{1}$$

Siendo m la masa del cubo y s la distancia de su lado.

$$I_{cubesat} = \frac{1}{6} 1 \cdot 0{,}1^2 = 1{,}17 \cdot 10^{-3} kg \cdot m^2 \tag{2}$$

Por otro lado, para determinar el momento de inercia del disco, sabemos que cada uno de los discos del disco duro tienen un radio exterior de 32,5mm y un diámetro interior de 10mm. Su peso es de 12 gramos. Hemos puesto 3 discos juntos, por lo que el peso total es de 36 gramos.

La ecuación que lo determina es:

$$I_{disco} = \frac{1}{2} m \cdot ({r_1}^2 + {r_2}^2) \tag{3}$$

Siendo m la masa del disco, r_1 el radio interior y r_2 el radio exterior.

$$I_{disco} = \frac{1}{2} 0{,}036 \cdot (0{,}0325^2 + 0{,}010^2) = 2{,}08125 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2 \tag{4}$$

Una vez calculados los momentos de inercia tanto de la rueda como del satélite, podemos calcular la velocidad angular máxima que puede contrarrestar nuestra Reaction Wheel, sabiendo que:

$$I_{disco} \cdot \omega_{motor} = I_{cubesat} \cdot \omega_{cubesat} \tag{5}$$

Siendo ω_{motor} la velocidad angular máxima del motor y $\omega_{cubesat}$ la velocidad angular máxima del CubeSat.

$$\omega_{cubesat} = \frac{2{,}08125 \cdot 10^{-5} \cdot 8000}{1{,}17 \cdot 10^{-3}} = 142{,}3 \text{ RPM} \tag{6}$$

Por lo tanto, hemos determinado que nuestra Reaction Wheel tiene la capacidad de contrarrestar una velocidad angular del CubeSat de 142,3 RPM. Este valor se halla por encima de las 120RPM deseadas.

El poseer mucho momento de inercia es positivo ya que nos aporta mucho margen antes de saturar la Reaction Wheel.

2.3. Motores brushless

Los motores brushless son una familia de motores que no emplean escobillas para realizar el cambio de polaridad en el motor. Esto reduce el rozamiento, aumenta el rendimiento, hace que desprenda menos calor y menos ruido, tienen una mayor relación velocidad-par motor, una mayor respuesta dinámica y un mayor rango de velocidad.

El cambio de polaridad, en lugar de ser mecánico, se realiza electrónicamente. Para ello se hace imprescindible un controlador electrónico (ESC: *Electronic Speed Controller*). El controlador electrónico, además, necesita obtener información de la posición del rotor. Dicha información se puede obtener mediante sensores (sensored) o mediante un efecto llamado BEMF (*Back Electromotive Force*) (sensorless).

Estas características lo hacen el motor ideal para una aplicación espacial como la nuestra, en la que se requiere una gran durabilidad y fiabilidad. Por este motivo desde ya hace muchos años (principios de los años 60) se emplean este tipo de motores en aplicaciones espaciales, incluidas las misiones Apolo[8].

2.3.1. SENSORED VS SENSORLESS

Como se ha mencionado, la señal de control del motor debe estar muy bien sincronizada con la posición del rotor. Si se pierde el sincronismo, se pierde por completo el control del motor, pudiendo causar comportamientos erráticos, sobrecorrientes en los devanados del motor y hasta el fallo total del motor.

Para conocer la posición del rotor se usan sensores de posición, los cuales pueden ser de dos tipos:

- Sensores de efecto hall: Son un tipo de sensor que está embebido en un circuito integrado y tiene la capacidad de detectar un campo magnético. Tienen muchas aplicaciones, como detectores de proximidad, de velocidad, de corriente y de posición. Es el método más común para detectar un campo magnético[9]. En un motor brushless se suelen colocar 3

sensores hall separados entre ellos en un ángulo determinado (suelen ser 60 o 120 grados de separación) y montados en el mismo soporte en el que está montado el motor, lo más cerca posible de la armadura. De esta manera, los sensores hall detectan el campo magnético de los imanes permanentes en la armadura del rotor, y generan una señal a medida que el rotor va girando. La superposición de los 3 sensores permite una estimación bastante buena de la posición del rotor.

- Encoder: Son otro tipo de sensores que están formados por un disco codificado y un detector, que puede ser mecánico, óptico, magnético o de resistencia (el más común es el óptico) y que puede proporcionar información de posición absoluta o incremental. A diferencia de los sensores hall, éstos poseen una parte fija y otra móvil, y su lectura no depende del campo magnético de la armadura del motor. Los motores brushless suelen llevar encoders de cuadratura, los cuales proporcionan información absoluta de posición y sentido de giro.

Por otro lado, los motores sensorless no poseen ningún sensor de posición dedicado y, en lugar de eso, utilizan un efecto llamado Back Electromotive Force (BEMF). Este efecto se produce por la fuerza electromotriz inversa causada por el giro del motor en el devanado. Esta fuerza electromotriz puede ser detectada por el mismo controlador que está generando la señal de control de motor, y así conocer el instante preciso por el que cada polo pasa por cada uno de los devanados. Esto es posible gracias a que en todo momento siempre se encuentran únicamente 2 de los 3 devanados activos, por lo que, en el devanado inactivo, se puede leer la oscilación en el voltaje. El inconveniente de este tipo de control es que a un régimen de bajas RPM (Revoluciones Por Minuto) la fuerza electromotriz inversa es demasiado pequeña para ser detectada, por lo que el motor debe operarse en ciclo abierto en ese régimen.

Para nuestra aplicación resulta imprescindible poder operar el motor en todo el rango de RPM. No es aceptable que el motor tenga una zona muerta en la que no se puede controlar la velocidad, ya que al empezar a girar desde parado es muy probable que se requiera un régimen de revoluciones que se encuentre dentro de la zona muerta.

Por lo tanto, y para no tener una zona muerta de RPM, se ha seleccionado un motor sensored con sensores tipo hall.

2.3.2. BLDC VS PMSM

Dentro de los motores brushless encontramos dos subtipos clasificados según la forma de onda de la señal que los controla. Estos dos subtipos son llamados BLDC (Brushless DC) y PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor). En realidad, ambos tipos son sin escobillas (brushless), de corriente contínua (DC) y motores síncronos de imanes permanentes, pero a efectos prácticos se han acabado diferenciando mediante estas dos nomenclaturas.

Los motores tipo BLDC se deben controlar mediante una onda trapezoidal (figura 2.1) mientras que los de tipo PMSM se deben controlar mediante una onda senoidal.

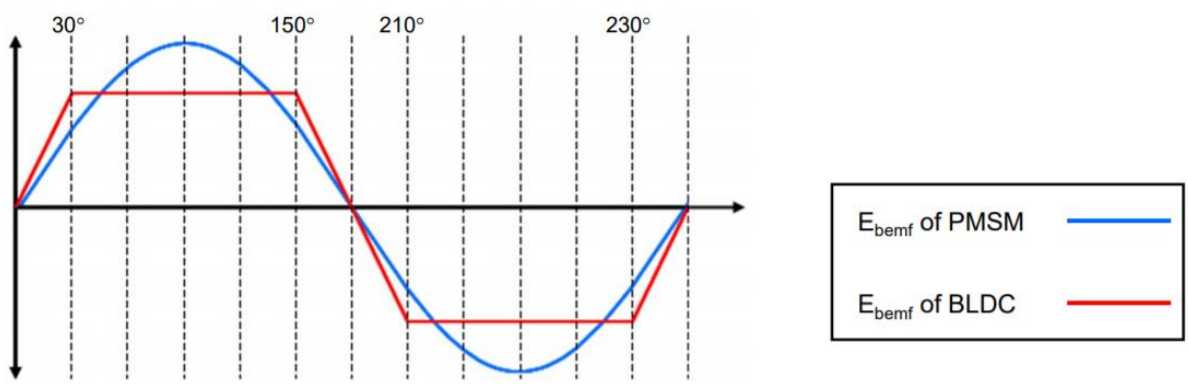


Figura 2.1 Forma de onda en PMSM y BLDC

Lo que determina el tipo de onda del motor no es otra cosa que la manera como se han diseñado los devanados del estátor. Es, por lo tanto, parte intrínseca de la construcción del motor. A pesar de ello es posible controlar motores BLDC mediante señales senoidales y motores PMSM mediante señales cuadradas, teniendo en cuenta que el control no será óptimo y el motor no trabajará en las condiciones de diseño. [10]

Características de los motores BLDC:

- Son más sencillos de controlar. Se suele utilizar el método 6-Step control
- Tienen fluctuaciones de torque en las conmutaciones
- Son más baratos
- Tienen peor rendimiento

Características de los motores PMSM:

- El control es más complejo (necesitan control PWM (*Pulse Width Modulation)* senoidal trifásico)
- No tienen fluctuaciones de torque
- Mayor eficiencia y torque
- Precio más caro

3. DESARROLLO Y EXPERIMENTACIÓN

3.1. Especificaciones del diseño

Para el diseño de la Reaction Wheel se han determinado una serie de especificaciones, muchas de ellas determinadas por el estándar CubeSat, otras fijadas con el objetivo de mantener el diseño a un bajo coste y otras determinadas por la disponibilidad de materiales. También se ha intentado mantener una continuidad y una coherencia con el trabajo predecesor y a la vez permitir una evolución en trabajos posteriores.

3.1.1. ESPECIFICACIONES MECÁNICAS

A nivel mecánico se han seguido las siguientes premisas:

- Se deben usar discos de disco duro como volante de inercia
- Debe tener el mínimo grosor posible para ocupar el mínimo espacio dentro del CubeSat (z=<2cm).
- El tamaño de la PCB debe ser el adecuado para poder encajarlo dentro del CubeSat.
- Estará fijada mediante tornillos a uno de los lados del CubeSat
- Se usará el diseño del CubeSat utilizado por el proyecto predecesor.
- Todas las conexiones se realizarán mediante *headers* de separación 2,54mm en una de las esquinas, con conexión en la dirección del eje z (perpendicular a la PCB)

3.1.2. ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS

A nivel eléctrico se han seguido las siguientes especificaciones:

- Todo el conjunto debe poder ser alimentado mediante una batería de litio de 3s (Vnominal= 11,1V). Debe poder aceptar todo el rango voltajes de la batería desde 100% cargada hasta un 0%. (12,6-9V)
- Debe tener interfaces i2c y UART, para realizar comunicaciones con un controlador externo

- Dichas interfaces deben poseer una conexión de alimentación a 3,3V para poder alimentar el microcontrolador sin necesidad de conectar la alimentación general de 11,1V.

3.1.3. FUNCIONALIDADES

La Reaction Wheel debe tener las siguientes funcionalidades:

- Debe poder trabajar en todo el rango de RPM del motor (no tener zona muerta).
- Debe poseer magnetómetro y giróscopo en al menos un eje. La IMU propuesta posee ambos dispositivos.
- Debe poderse orientar automáticamente y mantener dicha orientación en el tiempo.
- Debe ser capaz de responder ante comandos transmitidos mediante i2c. Dichos comandos pueden ser consignas de velocidad, de cambio de ángulo o de orientación magnética.
- Debe tener suficiente capacidad de almacenaje de momento angular como para corregir una velocidad angular de 120 RPM (desviación en el momento del lanzamiento).
- Debe tener una precisión suficiente para realizar comunicación óptica entre 2 satélites. A falta de datos concretos, se establece un valor de 180º de rotación en 2 segundos

3.1.4. ELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS (SOLUCIÓN ELEGIDA)

Se ha optado una solución integrada en la que se diseñará una PCB sobre la cual se situará el motor y las partes móviles. Todo ello llevará un encapsulamiento para evitar rozamientos accidentales de las partes móviles con otros componentes en el interior del CubeSat.

Con el objetivo de mantener un perfil bajo (z<2cm) se ha optado por no usar ningún módulo ni kit prediseñado, por lo que todos los componentes (microcontrolador, IMU, driver…) elegidos son circuitos integrados básicos de muy pequeño tamaño. Esto añade ciertos retos en el diseño de la PCB, ya que aumenta substancialmente el número de componentes y por consiguiente el número de posibles puntos de fallo. A su vez, aumenta las dificultades en el proceso de soldadura, ya que la mayoría de componentes son SMD (todos excepto un condensador).

Para el diseño de la PCB se han elegido los siguientes elementos principales:

- Microcontrolador STM32F302R8. Es el microcontrolador usado en la placa de desarrollo que se ha usado para hacer pruebas (figura 3.1). Tiene suficiente potencia de procesamiento

como para controlar el motor mediante FOC y a la vez poder leer los datos de la IMU. En el apartado 3.3 (Desarrollo de la PCB) se explica con detalle las funcionalidades de este microprocesador.

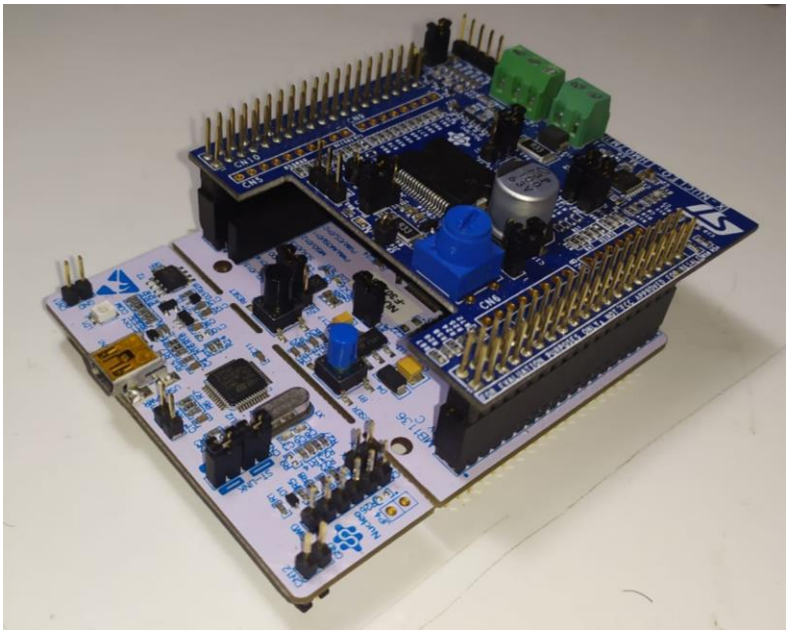


Figura 3.1 Kit de desarrollo P-NUCLEO-IHM001

- IMU CS-20948. Es la evolución de la famosa IMU MPU-6050. Tiene más precisión giroscópica que la 6050, por lo que la hace ideal para esta aplicación. Tiene un nivel lógico de 1.8V, mientras que el microcontrolador usa el nivel lógico de 3.3V, por lo que requiere de un traductor de nivel o *level translator*.
- Level Translator TXB 0104RUTR. Es un traductor de nivel tipo no inversor de 4 bits. Al ser de tipo push-pull[11] es ideal para la conversión de señales de SPI (Serial Peripheal Interface). Este conversor de señal es necesario para la conversión del nivel lógico del microcontrolador (3.3V) al de la IMU (1.8V). La comunicación se realiza mediante SPI.
- Driver de medio puente L6230Q. Es el mismo que el usado en el kit de desarrollo. Es un driver muy completo con protección por sobrecorriente y sobretensión, conmutaciones cruzadas y permite diferentes tipos de sensado del motor.

A parte de estos componentes, se han elegido 2 LDOs (*Low Dropout Regulator*)[12] de 3,3 y 1,8V, y componentes para los circuitos de condicionamiento de señales para la medición de la corriente en el motor, la señal de BEMF, los sensores hall y un divisor de voltaje para leer el voltaje del bus.

No se conoce el fabricante del motor elegido. Es el mostrado en la figura 1.5. Su número de referencia es BML3E5CRN. Se conocen las características básicas:

- Voltaje nominal: 11V
- Velocidad máxima: 8000rpm
- Máxima corriente: 1.5A.
- Sensores hall con señal no acondicionada (analógica).

Todo el diseño se hará alrededor de estos elementos principales.

3.2. Caracterización del motor

Como se ha visto previamente, para poder realizar el control de un motor brushless, se deben conocer una serie de características del mismo, y realizar el control acorde con las mismas.

3.2.1. FORMA DE ONDA

Lo primero que se debe conocer es el tipo de motor: BLDC o PMSM.

Como hemos explicado antes, esto está fijado por la forma de onda determinada en el devanado del estator. Para conocer dicha forma de onda debemos observar mediante un osciloscopio la onda generada entre dos fases al hacer girar el motor. Para ello, conectamos el pin GND (*Ground*) de la sonda en una de las fases (es indiferente cual) y el polo de la sonda en otra de ellas. Al hacer girar el motor con la mano (lo más rápido que se pueda) o con un taladro eléctrico, podremos observar en la pantalla del osciloscopio una forma de onda. Si no la observamos, habrá que sintonizar el osciloscopio a una frecuencia baja y a una amplitud baja (500mV) e ir probando hasta que se vea con claridad. Si la onda tiene forma senoidal significa que es un motor tipo PMSM. Si tiene forma trapezoidal, es un motor BLDC. Como vemos en la imagen 3.2 la forma de onda de nuestro motor es de tipo senoidal.

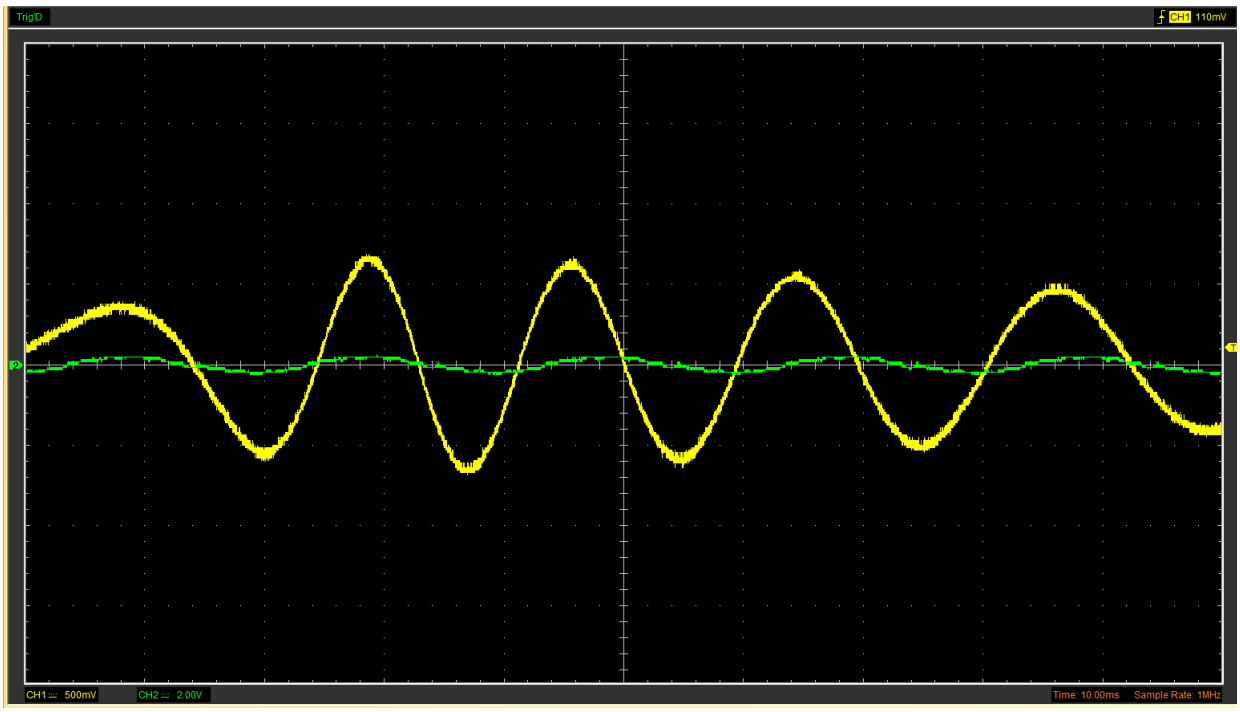


Figura 3.2 BEMF del motor

3.2.2. NÚMERO DE POLOS

El segundo paso es conocer el número de polos del motor. Este número representa la cantidad de polos magnéticos en la armadura con imanes permanentes. Se mide en pares de polos. Este paso también es muy sencillo:

1. Se alimenta uno de los devanados del motor poniendo una tensión muy baja (aprox. 0.5V) entre 2 de las fases.
2. El motor automáticamente se nos colocará en una posición determinada (se alinea el polo más cercano al devanado que estamos excitando)
3. Empezamos a girar el motor manualmente, el cual nos irá presentando resistencia al avance a intervalos iguales.
4. Damos una vuelta completa al motor mientras contamos la cantidad de veces que encontramos resistencia al avance.
5. Este número de intervalos es el número de pares de polos.

En nuestro caso, nuestro motor posee 6 pares de polos (12 polos).

3.2.3. OTROS PARÁMETROS

Si tenemos un kit de evaluación de motores de ST Microelectronics podemos hacer uso de una herramienta muy útil que nos proporciona el fabricante llamada *Motor Profiler*. Esta herramienta automatiza el proceso de caracterización del motor, a la vez que nos permite comprobar su funcionamiento dándole consignas de velocidad. Esta herramienta mide automáticamente la resistencia, inductancia, constante B-EMF (Back Electromotive Force), inercia, fricción y velocidad máxima.

3.3. Desarrollo de la PCB

El desarrollo de una placa de circuito impreso ha resultado imprescindible para nuestra aplicación, ya que debíamos conseguir un factor de forma y unas funcionalidades que no podíamos obtener mediante ninguna electrónica integrada que ya existiera en el mercado. La PCB que se ha desarrollado está ampliamente basada en el kit de desarrollo compuesto por la placa NUCLEO-F302R8 y el *shield* X-NUCLEO-IHM07M1. Se han usado los mismos componentes centrales (microprocesador y driver) y se han añadido otros adicionales, como la IMU.

El motor elegido posee un tipo de conector desconocido para el que no se ha encontrado ningún cable compatible, por lo que la solución elegida ha sido desoldar dicho conector y desarrollar una segunda PCB auxiliar (figura 3.3), que irá soldada al motor por un lado y a la PCB principal por el otro. Dicha PCB permitirá, por un lado, la conexión eléctrica entre el motor y la PCB principal. Por otro lado, también será un componente estructural ya que unirá mecánicamente las dos partes mediante soldaduras. Esta PCB se ha denominado “Castellated Connector”. Hace uso de una técnica de desarrollo de PCB en que en el borde de la placa se hallan unas vías cortadas por la mitad que permiten realizar una soldadura tipo SMD (*Surface Mounted Device*) con otra PCB. En la imagen podemos ver una aplicación típica de la técnica *castellated holes*.

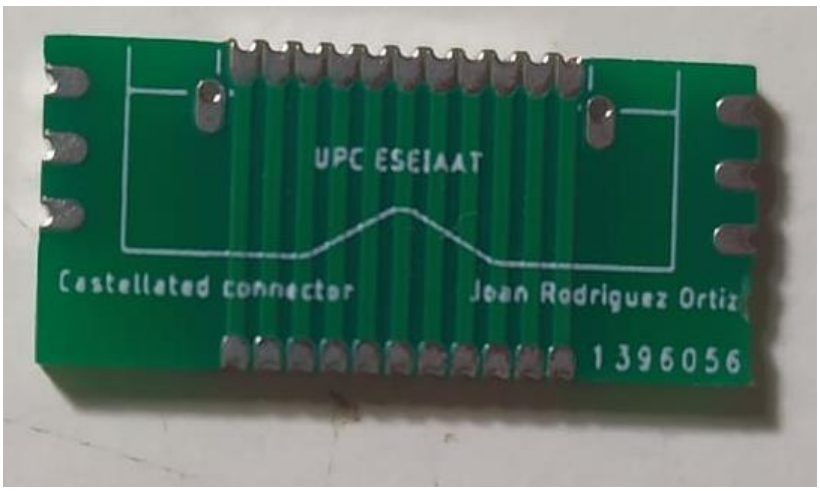


Figura 3.3 Placa de agujeros almenados *Castellated Connector*

3.3.1. REQUERIMIENTOS

Una vez determinadas las especificaciones del sistema en el que va a ir instalada la PCB, se tienen que determinar los requerimientos específicos de la misma. Los requerimientos son los siguientes:

- Se debe usar la interfaz Serial Wire para cargar el programa en el microcontrolador.
- El microcontrolador debe poder ser debugueado, además, mediante UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*).
- El sistema debe admitir tanto control sensored como sensorless.
- El tamaño de la PCB debe ser un cuadrado de 76mm de lado.
- Los componentes deben ser lo más pequeños posible siempre que puedan ser soldados a mano.
- El motor irá montado en el centro de la placa. La misma tendrá una ranura en la que encajará el motor.
- Se deberá desarrollar una placa auxiliar que servirá como interfaz entre la placa principal y el motor.

3.3.2. ELECCIÓN DE COMPONENTES Y COMPATIBILIDADES

Todos los circuitos integrados deben poseer condensadores de desacople para evitar interferencias, como el de la figura 3.4. Debido a que un estudio de interferencias electromagnéticas es inviable, se ha optado por poner un valor estándar de 0,1 uF para todos los componentes que lo requieran. Los condensadores de desacople se deberán instalar lo más cerca posible del componente, entre la alimentación del mismo y GND.

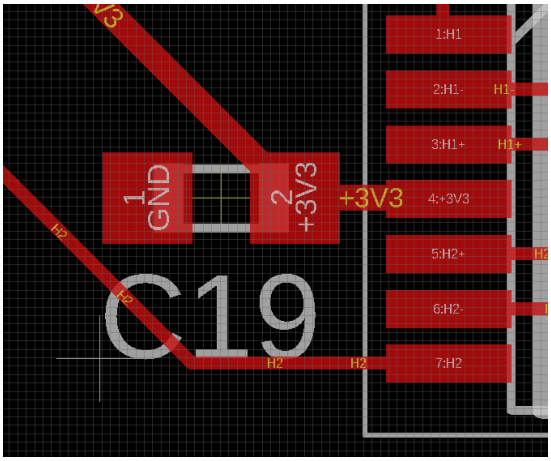


Figura 3.4 Condensador de desacople

El microcontrolador elegido (STM32F302R8) provee muchas funcionalidades, de las cuales sólo se van a usar las siguientes: SW interface, UART, I2C(*Inter-Circuit Communication*), SPI, timers y GPIOS (*General Purpose Input-Outputs*). En el esquemático del anexo se pueden ver todos los pines elegidos. De los pines del microcontrolador llegan conexiones a la mayor parte de los componentes de la PCB. Se alimenta a 3.3V, provenientes de la LDO *ZLDO1117G18TA* de Diodes INC. Se conecta por SPI al level translator *TXB0104* de Texas Instruments. Tiene salidas I2C (los mismos pines también también tienen compatibilidad UART) y SW (*Serial Wire*) hacia los headers. Hay una gran cantidad de pines GPIO que se usan para el control del motor y que van al driver *L6230Q*.

El Level Translator *TXB0104* está alimentado a 3.3V por el pin VCCB y a 1.8V por el pin VCCA. Con esto conseguimos "traducir" el nivel lógico para SPI del microcontrolador a la IMU, para que así se puedan comunicar sin correr el riesgo de dañar ningún componente.

Para el acondicionamiento de las señales de corriente y de los sensores hall se han utilizado los OPAMPS (*Operational Amplifier) TXV994IPT*. Estos amplificadores operacionales son ideales para nuestra aplicación ya que trabajan en el rango de voltaje necesario (2.5 a 5.5V) y tienen un voltaje de salida mínimo muy bajo (Vol=150mV max). Ésta última característica es muy relevante pues en el circuito de acondicionamiento de los sensores hall se debe controlar un mosfet. Dicho mosfet tiene una tensión mínima de gate (Vgate). Si tuviésemos un Vol más alto podría llegar a la

tensión Vgate, por lo que siempre tendríamos el mosfet excitado, aún cuando la tensión porporcionada por el opamp sea la tensión mínima (V-).

El resto de componentes: resistencias, condensadores, diodos, mosfets… se han elegido teniendo en cuenta la calidad y fiabilidad aportada por la reputación del fabricante (Yageo, Wurth Electrotik, Panasonic, Nexperia…), los valores nominales y las tolerancias necesarias.

3.3.3. REALIZACIÓN DEL ESQUEMÁTICO

El esquemático se ha realizado siguiendo el diagrama de bloques de la figura 3.5.

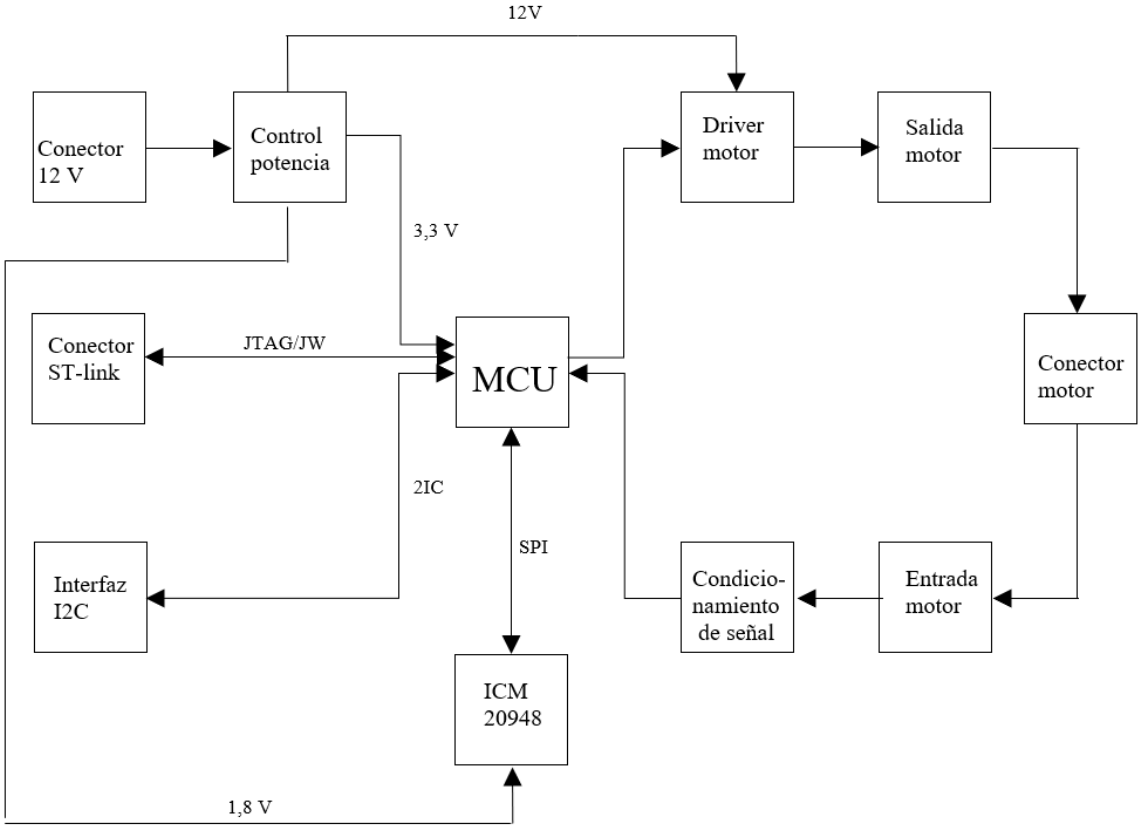


Figura 3.5 Diagrama funcional de la PCB

El fabricante de cada componente suele proporcionar en su datasheet un esquemático recomendado, el cual aporta una guía bastante fiable sobre la que realizar el esquemático.

Por ejemplo, en el datasheet del LDO ZLDO1117K33TC tenemos varios circuitos con aplicaciones típicas para el LDO. En la figura 3.6 podemos ver uno de estos circuitos. En él podemos observar la elección del valor de los condensadores que nos recomienda el fabricante y si nos fijamos en el esquema que hemos realizado nosotros en la figura 3.7, podemos ver que

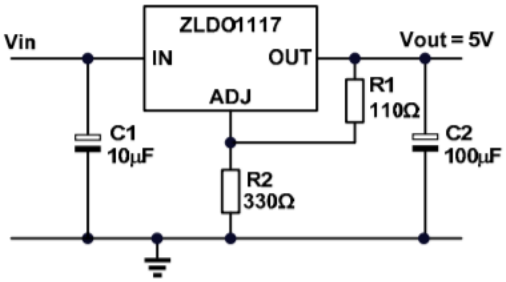


Figura 3.6 Circuito típico de un ZLDO1117

hemos usado los mismos valores. Por otro lado, se han usado condensadores cerámicos multicapa (MLCC) en lugar de los de tántalo que se nos indica en el circuito de ejemplo. El fabricante también especifica en el datasheet que efectivamente se pueden utilizar este tipo de condensadores.

El circuito que hemos realizado nosotros no lleva las resistencias R1 y R2 ya que hemos seleccionado un LDO con una salida fija de 3.3V que no precisa resistencais de ajuste.

Se han ido tomando decisiones de este tipo a lo largo de todo el esquemático realizado, siguiendo siempre las especificaciones del fabricante y basándonos en mayor o menor medida en los circuitos de ejemplo proporcionados.

Figura 3.7 Circuito del LDO diseñado

3.3.3.1. Conexiones del microcontrolador

Para la elección de los pines del microcontrolador, se ha optado por usar los mismos pines que se usan en la placa de evaluación IHM07M1 para controlar el driver. Esta solución permite que la placa fabricada sea compatible con el software de control de motores *ST Motor Control Workbench*, lo cual facilita muchísimo el proceso de generar código para el control del motor. Como podemos ver en la figura 3.8 los nombres de las etiquetas utilizados son los mismos que los utilizados en la placa de evaluación (figura 3.9): CURR_FDBCK, EN, BEMF, IN, etc., y usan los mismos pines del microcontrolador.

A parte de todos los pines usados para el driver, también se usan pines para la conexión i2c, SPI, SerialWire y para la alimentación y la masa.

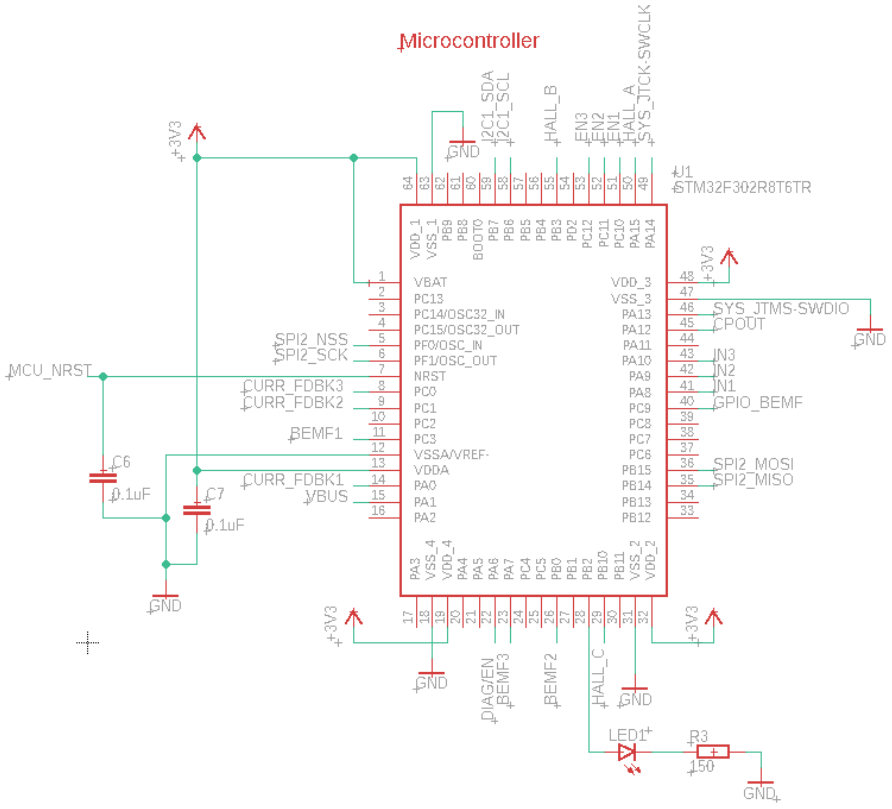


Figura 3.8 Circuito del microcontrolador diseñado

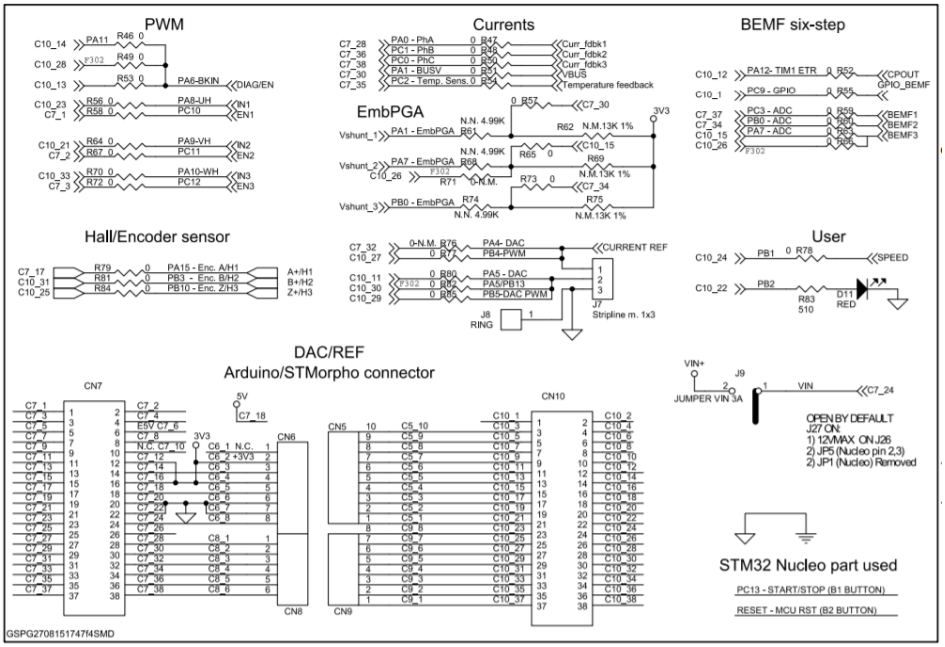


Figura 3.9 Esquemático extraído del datasheet.

3.3.3.2. Circuito de acondicionamiento de los sensores hall

Los sensores hall del motor son analógicos. Proveen un voltaje de salida proporcional al campo magnético al que son expuestos, como se muestra en la figura 3.10.[13]

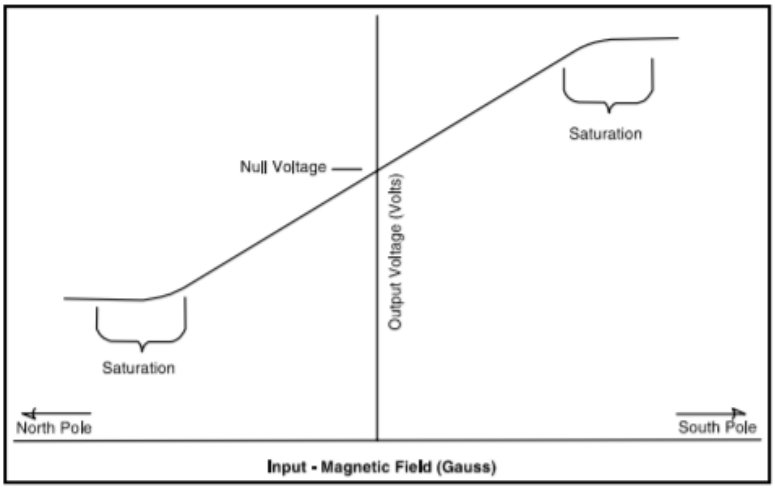


Figura 3.10 Señal de salida de un sensor hall. Fuente: Honeywell

En un motor, esto significa que sacan una señal senoidal que está en fase con la rotación del motor, como la que nos muestra la figura 3.11. Esta señal podría ser leída directamente por el microcontrolador, ya que tiene capacidad para leer señales analógicas, pero se ha decidido no hacerlo así. El microcontrolador ya está muy sobrecargado de trabajo pues tiene que leer otras señales analógicas y realizar muchos procesos para el control del motor. Si el microcontrolador tuviese que procesar también estas señales analógicas no tendría potencia de procesamiento suficiente y sería muy difícil programarlo y optimizar los procesos para que funcionase correctamente. Por este motivo se ha optado por acondicionar dicha señal y transformarla en digital directamente en el hardware.

En realidad el sensor Hall no provee solo una señal senoidal sino dos idénticas pero de signo opuesto, tomando como cero de referencia el valor de GND que se haya aplicado en el sensor.

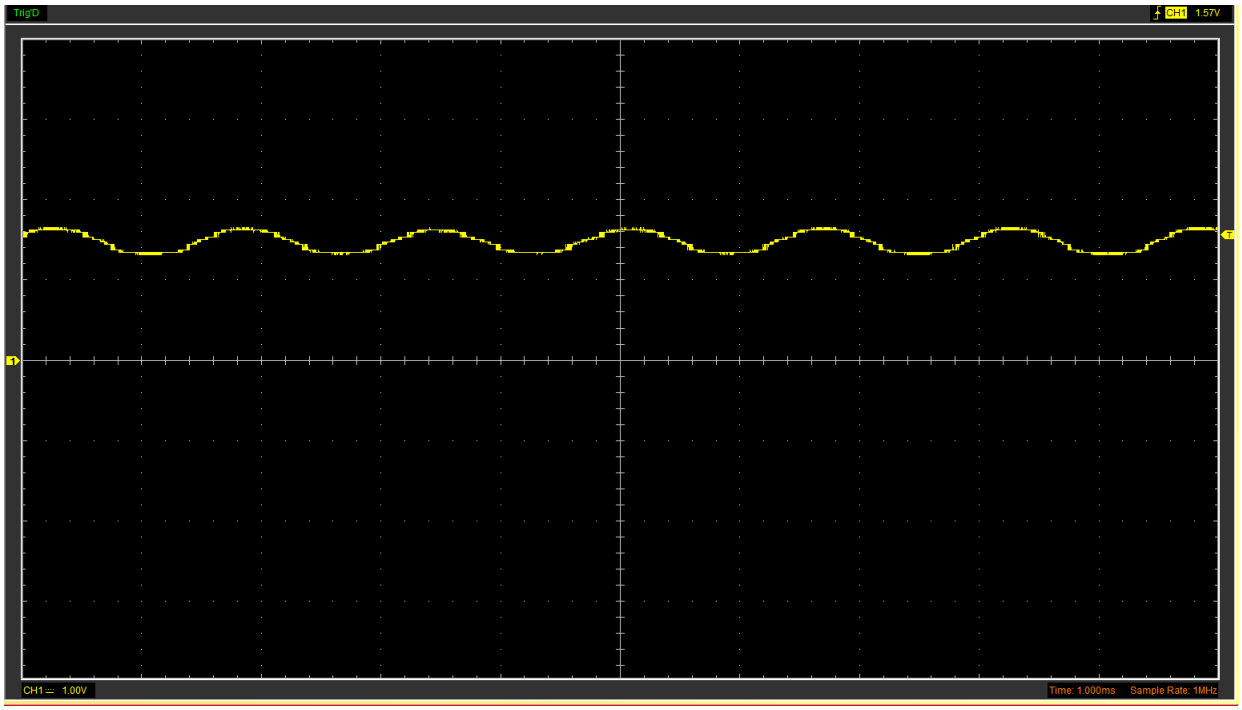


Figura 3.11 Señal de salida de uno de los sensores hall

El circuito de acondicionamiento de la señal se muestra en la figura 3.12. Este circuito está compuesto por 3 etapas: amplificación, Schmitt Trigger y salida.

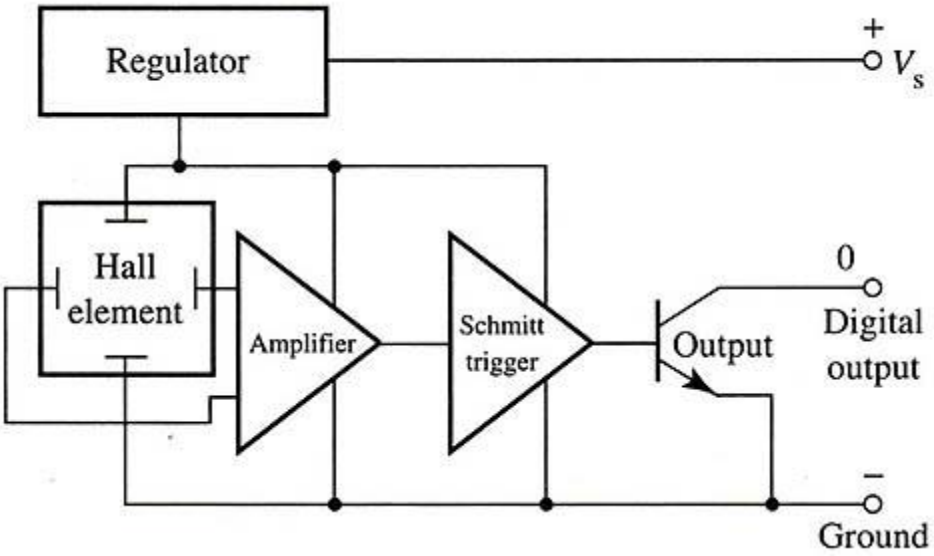


Figura 3.12 Acondicionamiento de sensores Hall. Fuente: Honeywell

FASE 1: AMPLIFICACIÓN

Como podemos observar este circuito basa su operación en amplificadores operacionales. En el primero de ellos, en la fase de amplificación, el voltaje se amplifica con una ganancia muy alta. A la salida del sensor hall tenemos un voltaje que varía entre 0 y ±0,2V. Esta salida (que en realidad son 2 salidas de signo opuesto) la llevamos directamente un amplificador operacional. El amplificador operacional trabajará en la región de saturación, por lo que la salida del amplificador nos dará una señal enormemente cercana a una señal cuadrada, la cual tendrá un valor superior V+ equivalente al voltaje de alimentación del amplificador (en un opamp ideal), que en nuestro caso es VCC=3.3V y un valor inferior V- equivalente al voltaje inferior del amplificador, que en nuestro caso es GND=0V. El período de esta señal cuadrada depende del cambio de polo magnético que ve el sensor y de la velocidad angular del motor. Nuestro motor tiene 6 pares de polos, por lo que podemos establecer la siguiente relación:

$$T_{hall} = 6 \cdot T_{motor} \tag{7}$$

Siendo:

$$T_{motor} = \frac{v_{rpm}}{60} \tag{8}$$

Por tanto:

$$T_{hall} = \frac{v_{rpm}}{10} \tag{9}$$

Siendo T_{hall} el período de la señal, T_{motor} el período del motor y v_{rpm} la velocidad del motor en revoluciones por minuto.

En la figura 3.13 podemos ver cómo se ha realizado el esquemático de esta parte del circuito.

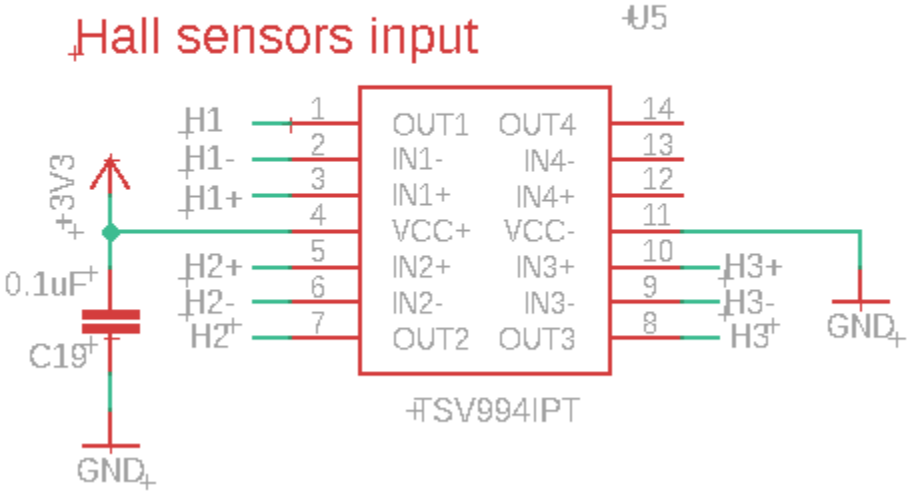


Figura 3.13 Fase de amplificación

FASE 2: SCHMITT TRIGGER

Un Trigger Schmitt es un tipo especial de circuito comparador, el cual usa la histéresis para prevenir el ruido que podría tapar la señal original y que causaría falsos cambios de estado si los niveles de referencia y entrada son parecidos, como podemos ver en la figura 3.14.

Consiste en un amplificador operacional realimentado positivamente para conseguir una saturación y su salida sea siempre uno de dos valores de alimentación del amplificador. Hay diferentes tipos de disparadores Schmitt, nosotros hemos usado el tipo no inversor no simétrico En la figura 3.15 podemos ver el esquema que hemos usado en nuestro circuito.

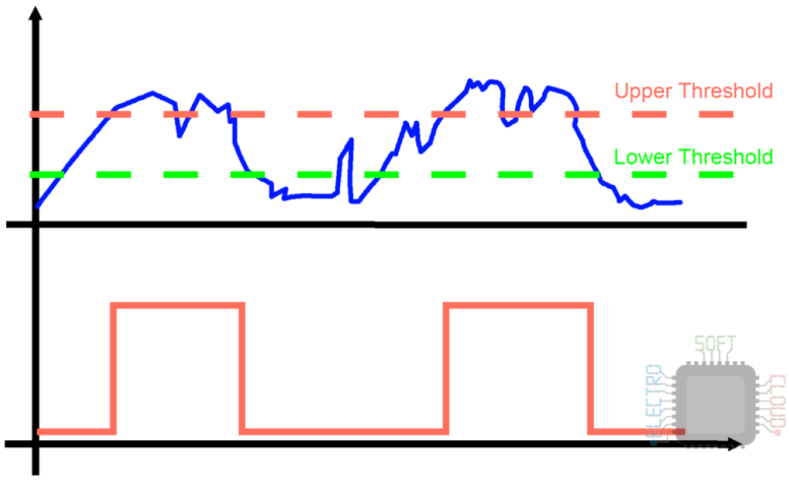


Figura 3.14 Efecto de un Trigger Schmitt. Fuente: Electro Soft Cloud

En nuestro caso hemos usado como valor de referencia Vref=1.8V, ya que era un valor de tensión proporcionado por el LDO que tenemos disponible en la PCB y es un valor adecuado para esta aplicación. Los valores de saturación del amplificador operacional son $V_{-} = 0V$ y $V_{+} = 3.3V$. También hemos fijado el valor de R1=75kΩ.

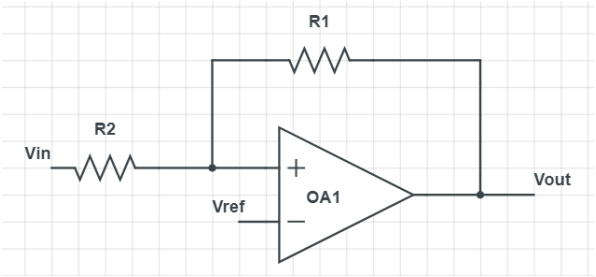


Figura 3.15 Trigger Schmitt simplificado

Nuestro objetivo es aplicar una histéresis en que el valor del umbral superior sea $V_{HT} = 2V$ y el del umbral inferior sea $V_{LT} = 1.6V$

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{V_{+} - V_{-}}{V_{HT} - V_{LT}}} = \frac{75}{\frac{3.3 - 0}{2 - 1.6}} = 9.09\text{k}\Omega \tag{10}$$

El valor estándar más cercano a 9.09kΩ es 9.1kΩ. Ya tenemos todas las variables escogidas, por lo que el esquemático final quedará como en la figura 3.16. Podemos observar que se ha substituido el símbolo del triángulo girado típico de un opamp por uno que representa el circuito integrado TSV994IPT, el cual incorpora 4 opamps en un mismo integrado. También podemos ver que después las 3 salidas del opamp que son usadas: OUT1, OUT2 y OUT3 tenemos 3 mosfets, los cuales forman parte de la siguiente fase del acondicionamiento

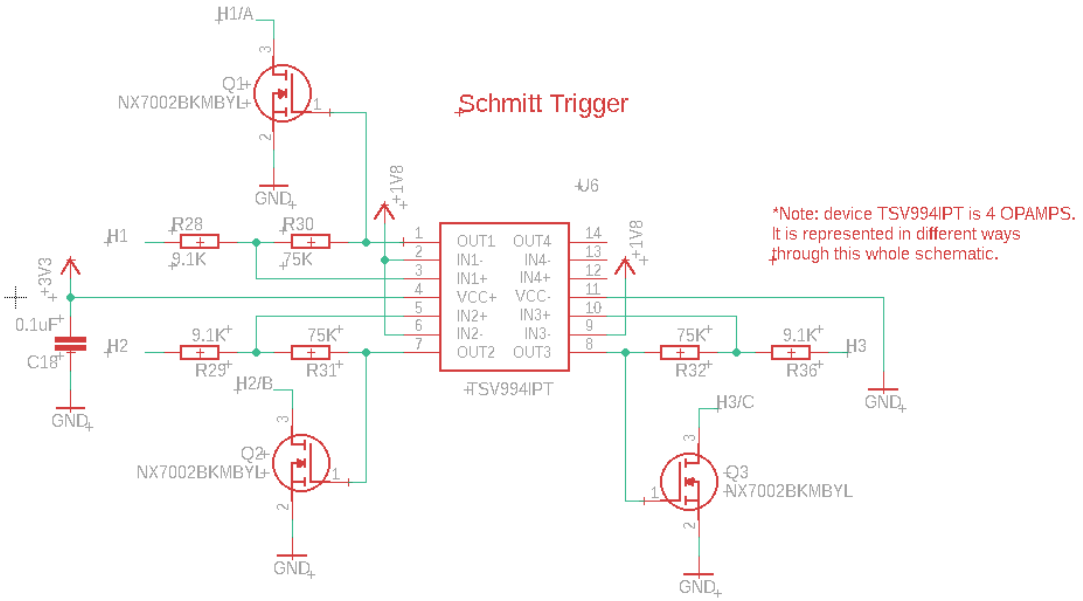


Figura 3.16 Trigger Schmitt diseñado

3.3.3.2.1. FASE 3: SALIDA

En esta fase tenemos una malla con una resistencia pull up conectada al microcontrolador. Esta malla estará siempre a nivel alto (3.3V) hasta que un mosfet “hunda” la corriente y tengamos un nivel bajo en dicha malla (cercano a 0V). Este mosfet está conducido mediante el pin 1 (GATE) por la salida del opamp, lo que significa que cuando tengamos una salida de nivel alto del opamp desde la fase 2, tendremos una entrada de nivel bajo en el microcontrolador. En la imagen 3.13 de la fase anterior podemos ver los mosfet y en la imagen 3.17 vemos el circuito de pull up, con unos condensadores de desacople y unas resistencias en serie para evitar cortocircuitos.

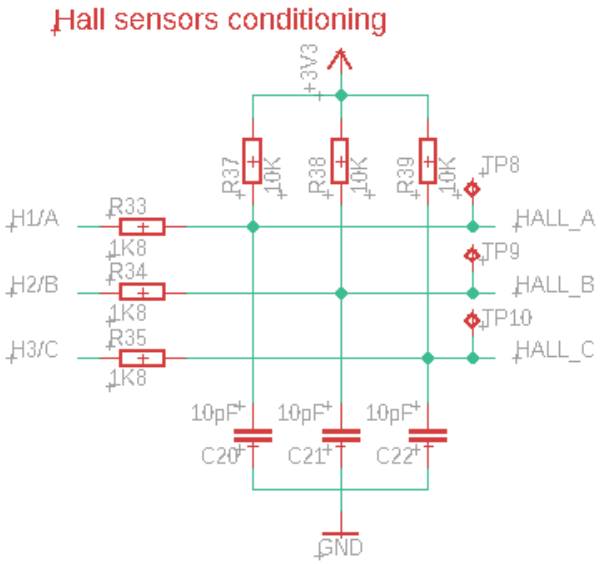


Figura 3.17 Fase de salida

3.3.4. LAYOUT DE LA PLACA

Para el layout de la placa de circuito impreso se han tenido en cuenta varios aspectos clave del diseño, los cuales veremos a continuación. En la figura 3.18 podemos ver una captura de la pantalla del diseño de las pistas.

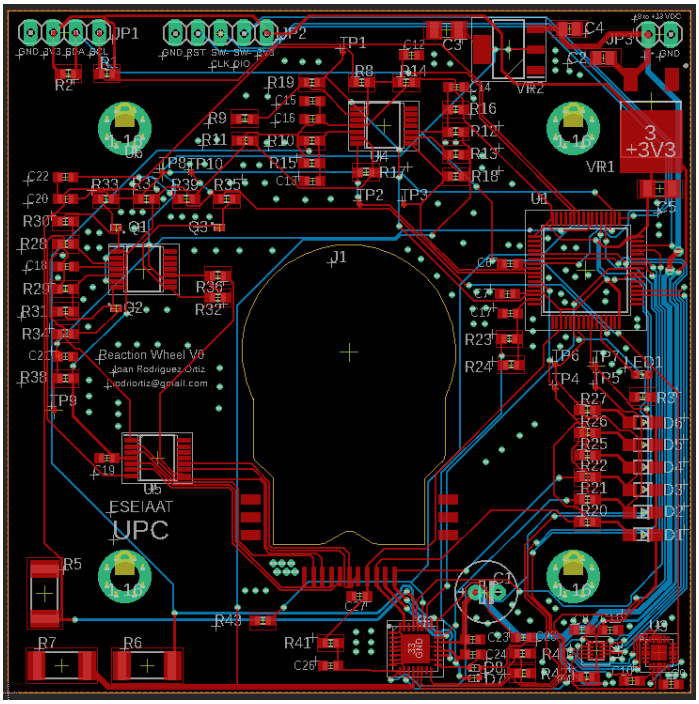


Figura 3.18 Layout de las pistas de la placa

3.3.4.1. Aspectos mecánicos

Los aspectos mecánicos determinan la superficie disponible para colocar los componentes.

1. Dimensiones de la placa. Las dimensiones se añaden en la capa *20-Dimension*. La dimensión exterior es de 76mmx76mm, por lo que se ha dibujado un cuadrado de ese tamaño.
2. En el centro del cuadrado se situará el centro del eje del motor, el cual también irá incrustado en la placa, por lo que se tiene que hacer un hueco para poder insertarlo. Se ha dibujado dicho hueco con la forma de la PCB del motor en la misma capa: *20-Dimension*.
3. Agujeros de los tornillos. En lugar de hacer agujeros simples, se han hecho vías de gran tamaño y se les ha puesto vías pequeñas alrededor para que tengan más resistencia mecánica. El diámetro del agujero se ha ajustado para un tornillo M3.
4. Posición de los conectores (headers). Se han colocado todos en un mismo lado de la PCB. Se han puesto suficientemente alejados del centro para que no interfieran con la rueda de inercia.

3.3.4.2. Tamaño de las pistas

La elección correcta del tamaño de las pistas es un aspecto crítico en el diseño de la PCB. Hay 2 aspectos clave en la elección del tamaño de pista: la corriente máxima admisible y la caída de tensión máxima admisible.

En nuestra aplicación, el aspecto de la caída de tensión no es relevante, ya que ninguna de las pistas tiene una longitud especialmente grande (menos aún las pistas de potencia), por lo que este aspecto lo obviaremos.

En cambio, sí se debe tener en cuenta la corriente máxima admisible de cada pista.

Hay 3 tipos de pista: Pista de señal, pista de alimentación y pista de potencia. Los cálculos se realizan teniendo en cuenta el peso del cobre de la pcb (generalmente el fabricante de la pcb da el valor del peso por pie cuadrado [Oz/ft²] del cobre en lugar del espesor del mismo), la corriente máxima que deberá pasar por la pista, el aumento de temperatura máximo admisible y el valor de temperatura ambiente.

Se han usado los estándares de la IPC-2221[14] con los siguientes datos:

- Espesor: 1oz
- Aumento de temperatura: 10ºC
- Temperatura ambiente: 25ºC
- Corrientes máximas admisibles:
    - Pista de señal: 100mA
    - Pista de alimentación: 500mA
    - Pista de potencia:1.5A
- Constantes definidas por la IPC para pistas externas:
    - K1=0.0647
    - K2=0.4281
    - K3=0.6732

Las ecuaciones a utilizar son las siguientes:

$$A = \frac{I}{(k_1 \cdot \Delta T^{k_2})}^{\frac{1}{k3}} \tag{11}$$

$$D = \frac{A}{H \cdot 1.378} \tag{12}$$

Siendo:

A= Área de la pista en milésimas de pulgada cuadradas [mil²]

I= Intensidad en Amperios [A]

T=Temperatura en grados centígrados [ºC]

D= Ancho de la pista en milésimas de pulgada [mil]

H= Grosor en Onzas por pie cuadrado [Oz/ft²]

Podemos simplificar ambas ecuaciones de la manera:

$$D = \frac{\frac{I}{(k_1 \cdot \Delta T^{k_2})}^{\frac{1}{k3}}}{H \cdot 1.378} \tag{13}$$

Para la pista de señal:

$$D = \frac{\left(\frac{0.1}{(0.0647 \cdot 10^{0.4281})}\right)^{\frac{1}{0.6732}}}{1 \cdot 1.378} = 0.3204\ mil \tag{14}$$

Para pista de alimentación:

$$D = \frac{\left(\frac{0.5}{(0.0647 \cdot 10^{0.4281})}\right)^{\frac{1}{0.6732}}}{1 \cdot 1.378} = 3.49\ mil \tag{15}$$

Para pista de potencia:

$$D = \frac{\left(\frac{1.5}{(0.0647 \cdot 10^{0.4281})}\right)^{\frac{1}{0.6732}}}{1 \cdot 1.378} = 17.89\ mil \tag{16}$$

Debemos recordar que estos son los VALORES MÍNIMOS ADMISIBLES de tamaño de pista. Se ha añadido un margen de seguridad a estos valores ya que en la PCB no tenemos problemas de espacio. Por eso, se han decidido los siguientes tamaños:

- Pista de señal: 6 mil (este es el tamaño mínimo de pista que el fabricante acepta)
- Pista de alimentación: 12 mil
- Pista de potencia: 24 mil

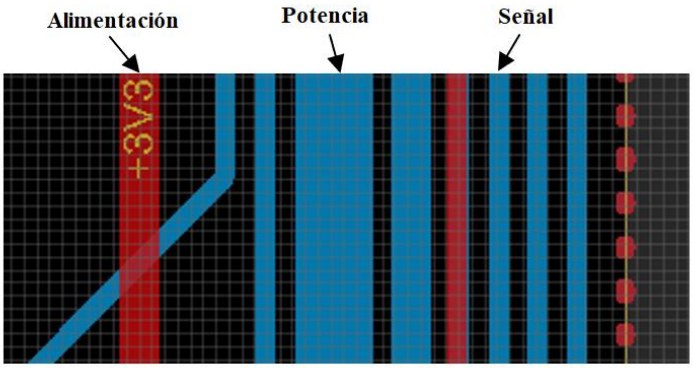


Figura 3.19 Vista de tamaños de pista

3.3.4.3. Colocación de los componentes

Esta es una de las partes de las que más libertad se dispone. Todos los componentes están seleccionados y las partes mecánicas críticas ya están definidas, por lo que tenemos toda una superficie en la que colocar los componentes de la PCB. Los criterios a seguir en la colocación de los componentes son, por orden de prioridad:

1. Que ningún componente interfiera mecánicamente con otro: Que no se superpongan o estén demasiado cerca unos de otros.
2. Que ningún componente interfiera eléctrica o magnéticamente con otro: Especialmente con la IMU, se ha colocado en el punto más alejado posible del motor, para que los campos magnéticos del motor interfieran lo mínimo posible con el magnetómetro de la IMU.
3. Que haya suficiente espaciado entre componentes para poder colocar las pistas.
4. Que resulte viable realizar las soldaduras.
5. Que las litografías de la capa del silkscreen se puedan ver correctamente.
6. Que se minimice el tamaño de las pistas
7. Que se minimice la cantidad de vias necesarias
8. Que los componentes estén bien ordenados y, a ser posible, todos tengan la misma orientación

3.3.4.4. Enrutado de pistas

El enrutado de pistas es la parte más visual de todo el proceso ya que es la que puede aportar un aspecto más pulcro al diseño de la PCB. En PCBs muy pobladas, con un 80-90% de la superficie ocupada por componentes, la dificultad del enrutado de pistas aumenta exponencialmente, pues se suelen necesitar múltiples capas de pista (4-16 capas). En nuestro caso, la superficie ocupada es de 1234.5mm², siendo la superficie total de la placa de 5776mm², por lo que el porcentaje de ocupación es de un 21.3%. Por ello, Solamente han sido necesarias 2 capas: la superior y la inferior.

El proceso de enrutado que se ha seguido ha sido el siguiente:

1. Se configuran las normas de diseño en el programa de diseño según las especificaciones del fabricante que queremos que nos fabrique la PCB. En la imagen 3.20 podemos ver un ejemplo de configuración de normas de distancias.

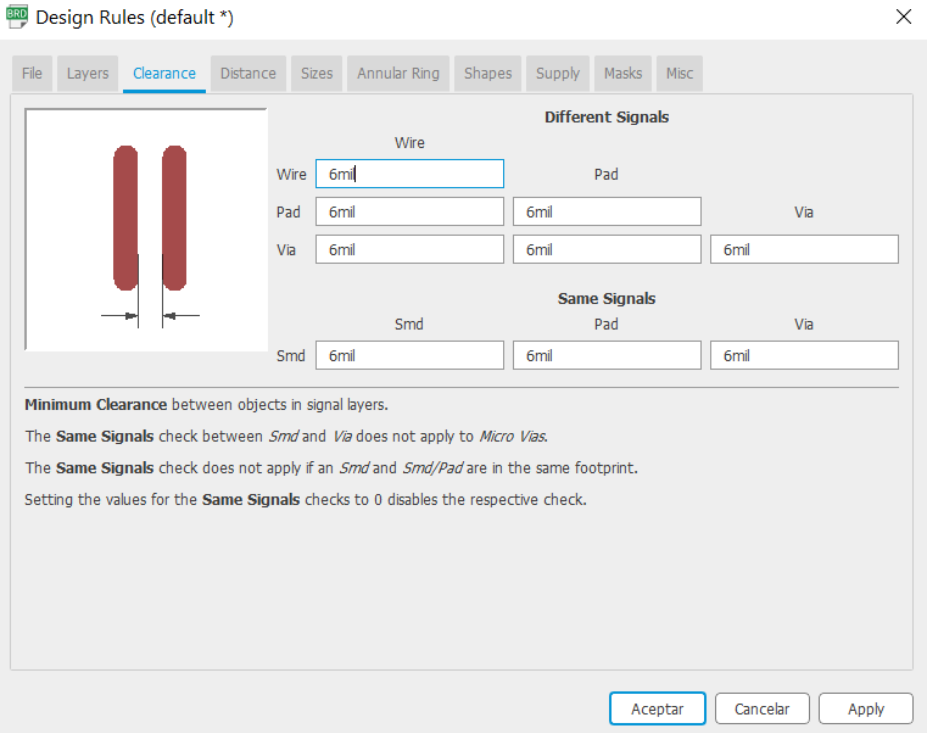


Figura 3.20 Configuración de las normas de diseño

2. Obviamos todas las pistas que tengan la etiqueta GND. Ya nos encargaremos de esto más tarde.
3. Se enrutan primero las pistas de potencia y alimentación, configurándolas para que tengan el tamaño determinado. Se intenta hacerlas pasar por zonas donde vayan a interferir menos con las pistas de señal.
4. Se enrutan las pistas de señal, empezando por las más cortas.
5. Si hay alguna pista que no se puede enrutar, se eliminan las pistas que lo impiden y se vuelve a empezar buscando otra ruta que lo permita.
6. Cuando estén todas las pistas enrutadas excepto las de GND, dibujamos un polígono del tamaño de la PCB en la capa superior y otra en la capa inferior y les ponemos la etiqueta GND. Esta operación se denomina “copper pouring” y tiene el objetivo de rellenar todas las zonas libres de pistas con un plano de tierra conectado a GND. A este plano de tierra es donde se van a conectar todos los pines GND.
7. Si se encuentra algún pin GND que no se puede conectar, se eliminan las pistas que lo impiden y se busca una ruta alternativa que permita conectar el plano de tierra.

3.3.4.5. PCB AUXILIAR: CASTELLATED HOLES CONNECTOR

Para conectar el motor con la PCB principal, se ha tomado la decisión de realizar una PCB auxiliar que utiliza una técnica no muy conocida llamada "*castellated holes*" o agujeros almenados. Como se ha explicado en la introducción del apartado 3.3, esta técnica hace uso de una técnica de desarrollo de PCB en que en el borde de la PCB se hallan unas vías cortadas por la mitad que permiten realizar una soldadura tipo SMD con otra PCB.

Este tipo de PCBs es especial y suelen ser más caras. Además, los fabricantes suelen aplicar unas normas mucho más restrictivas de lo normal en el espaciado entre agujeros, y el diseño de las mismas no es fácil ya que los programas de diseño de PCBs no suelen incorporar ninguna funcionalidad para realizar este tipo de agujeros. Por ello, ha sido esta PCB la que ha determinado el fabricante adecuado, ya que la mayoría tenían unas normas demasiado restrictivas y no daban margen para la conexión con el motor.

La distancia entre pads del motor es de 1mm.

3.3.5. FABRICACIÓN

El fabricante utilizado en este proyecto ha sido SEEDSTUDIO. Se ha elegido este fabricante porque, como hemos comentado en el apartado anterior, ha sido el único que nos permitía tener un espaciado de 1mm entre agujeros almenados. La lista completa de todas las normas y tolerancias que da el fabricante se encuentra en su página web[15]. Las principales que hemos tenido en cuenta para este proyecto son:

- Mínimo grosor de pista: 6mil
- Mínimo espaciado entre pistas: 6 mil
- Distancia mínima entre vias: 12 mil
- Distancia mínima entre vias y pistas: 12 mil
- Diámetro mínimo de agujeros almenados: 0.5mm
- Distancia mínima entre circuitos y el borde: 0.3mm

Teniendo en cuenta estas características en el diseño, una vez realizado el mismo se deben generar unos archivos llamados "Gerber Files" o simplemente *Gerbers*, que proporcionan toda la información de la placa al fabricante. Se generan varios archivos de los cuales cada uno

corresponde a una capa en el diseño. Se debe indicar claramente a qué capa corresponde cada archivo para que el fabricante lo pueda entender. Una vez generados los archivos, el fabricante revisa que el diseño siga las especificaciones requeridas y, si todo está en orden, lo fabrica.

Una vez tenemos la PCB, debemos soldar todos los componentes necesarios encima. La explicación de las técnicas de soldadura utilizadas queda fuera del alcance de este proyecto. Solo cabe mencionar que se ha utilizado una estación de soldadura Mlink H5, propiedad del proyectista

3.4. Programación del microcontrolador

Este microcontrolador, un STM32F302R8, es un microcontrolador de 32 bits basado en una CPU Arm Cortex-M4, con 32 Kb de memoria flash y 16 Kb de memoria SRAM. Puede operar a 72MHz y posee 51 puertos I/O (puertos de entrada-salida). Tiene múltiples interfaces de comunicación, timers, y puede ser debugueado mediante SWD o JTAG. Está fabricado por ST Microelectronics.

Hay múltiples entornos de desarrollo de software compatibles con STM. En este proyecto se ha optado por utilizar el más nuevo proporcionado por ST: CubeIDE. Se ha optado por este entorno de programación ya que es gratuito e integra en una misma aplicación todas las funcionalidades necesarias para desarrollar un programa para STM desde cero. Es compatible con virtualmente todas las aplicaciones y herramientas proporcionadas por ST, si bien no está exento de algunos bugs.

3.4.1. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

En CubeIDE se carga un proyecto a través de un archivo con extensión *.project*. Este archivo se encuentra dentro de la carpeta del proyecto, la cual contiene a su vez todos los archivos necesarios para el programa: drivers, librerías, headers, archivos de debugueo, etc. Una gran cantidad de archivos son necesarios SIEMPRE para el más sencillo de los programas.

Para el usuario novato (y también para el experto) es inviable escribir manualmente todo ese código, la mayor parte del cual son archivos de configuración y procesos internos del microcontrolador. Por ello, ST provee una herramienta integrada en el IDE llamada CubeMX. Esta herramienta permite configurar todos los parámetros del microcontrolador mediante una interfaz gráfica. La figura 3.21 nos muestra una captura de pantalla de dicha interfaz. Nos permite

seleccionar el microcontrolador, seleccionar la función de cada uno de los pines, configurar el *clock* de la CPU, activar o desactivar *timers*, *watchdogs*, conectividades como I2C o SPI, e infinidad de parámetros más.

Una vez configurados los parámetros según nuestras necesidades, apretando un botón se genera todo ese código necesario. Así, ya tenemos un programa "en blanco", sobre el que empezar a escribir las funciones que queremos. CubeIDE permite escribir en C y en C++. Además, el IDE integra un API (*Application Programming Interface*) con funciones desarrolladas por ST llamado HAL (*Hardware Abstraction Layer*), el cual proporciona funciones de alto nivel que son compiladas muy eficientemente.

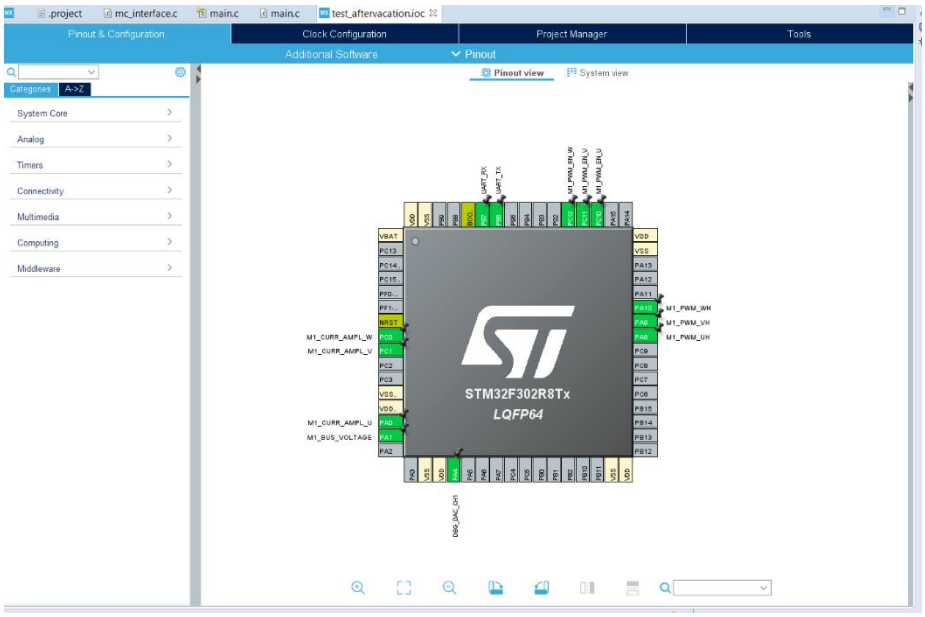


Figura 3.21 Captura de pantalla de CubeMX integrado en CubeIDE

3.4.2. MOTOR CONTROL WORKBENCH

Motor Control Workbench (figura 3.22) es una herramienta de software de ST Microelectronics desarrollada específicamente para simplificar el proceso de desarrollo del software de control de motores. Se ingresan de manera gráfica los parámetros del sistema y genera un código de control de motor. También provee un API con funciones básicas para controlar el motor en un alto nivel.

Se ha utilizado esta herramienta para testear el sistema y para simplificar el control del motor.

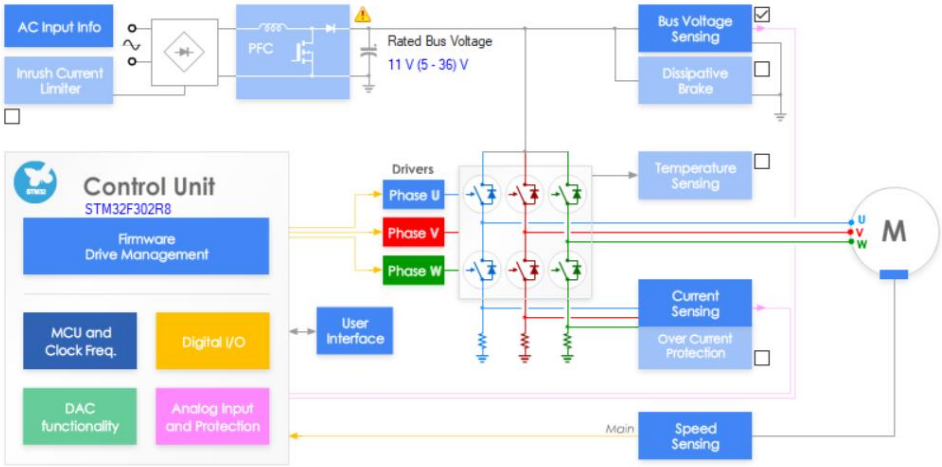


Figura 3.22 Captura de pantalla de Motor Control Workbench

3.4.3. PROGRAMACIÓN DE LA IMU

Para la programación de la IMU ICM-20948 se ha utilizado una librería de CoryCline[16] llamada ICM20948.

Dicha librería se comunica via SPI con los registros de la IMU según datasheet y realiza unas cuantas instrucciones básicas para leer los datos de acelerómetro, giróscopo y magnetómetro.

3.5. Diseño mecánico

Se ha tenido que diseñar un sistema de fijación de los discos de inercia al eje del motor. También se ha diseñado un encapsulamiento no estanco, el cual protege la rueda de inercia de contactos accidentales con otros componentes de dentro del CubeSat y a la vez previene que se desprendan piezas de la rueda en caso de fallo y destrucción de la misma.

El diseño se ha realizado en SolidWorks y se ha imprimido en plástico PLA utilizando una impresora 3d.

El diseño de la fijación es bastante simple. Está compuesto de dos piezas llamadas *fijación inferior* y *fijación superior*. La figura 3.23 nos muestra un explosionado de todo el diseño.

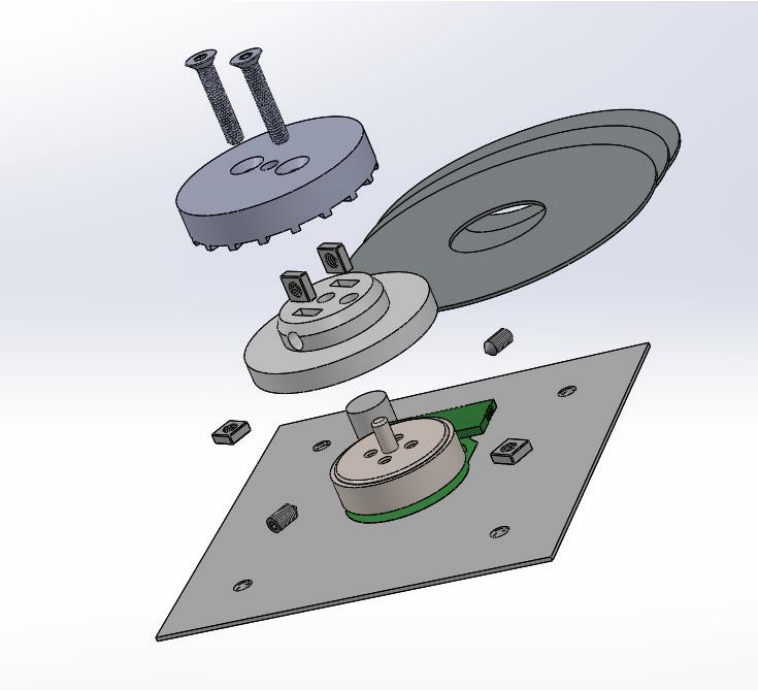


Figura 3.23 Explosionado del sistema

Como se puede apreciar en la vista de sección de la figura 3.24, 2 tornillos prisioneros opuestos enroscados en tuercas cuadradas sujetan la *fijación inferior* al eje del motor.

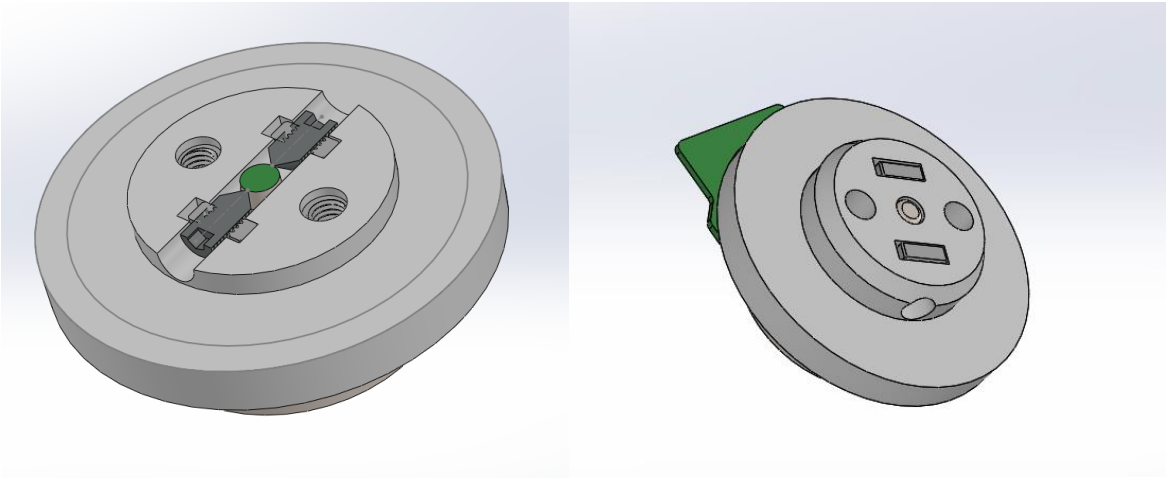


Figura 3.24 Vistas de *fijación inferior*

Encima de la *fijación inferior* se colocan los 3 discos de inercia y encima de ellos se coloca la *fijación superior*, la cual va unida a la *fijación inferior* mediante 2 tornillos avellanados que se

fijan a 2 tuercas cuadradas colocadas en unas ranuras debajo de la *fijación inferior*. En la figura 3.25 podemos ver las 2 piezas y los tornillos que las unen.

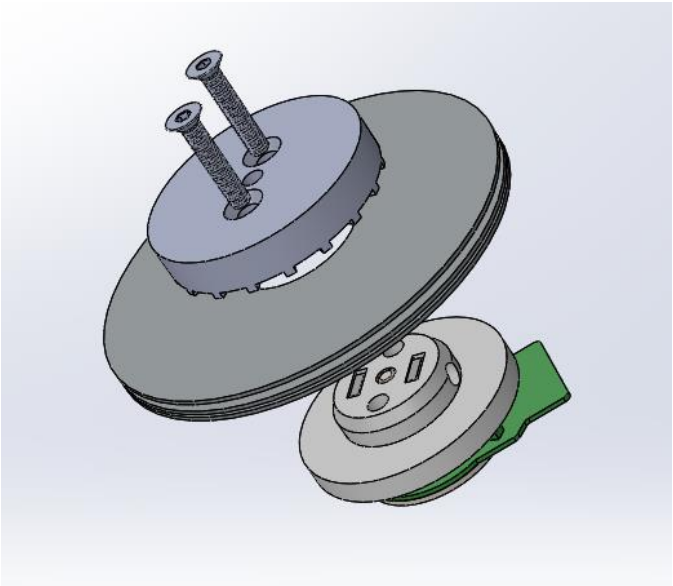


Figura 3.25 *Fijación superior*

Todo el sistema va encapsulado por una cúpula que se une a la PCB mediante 4 tuercas cuadradas. La figura 3.26 nos muestra el aspecto del sistema con la cúpula incorporada.

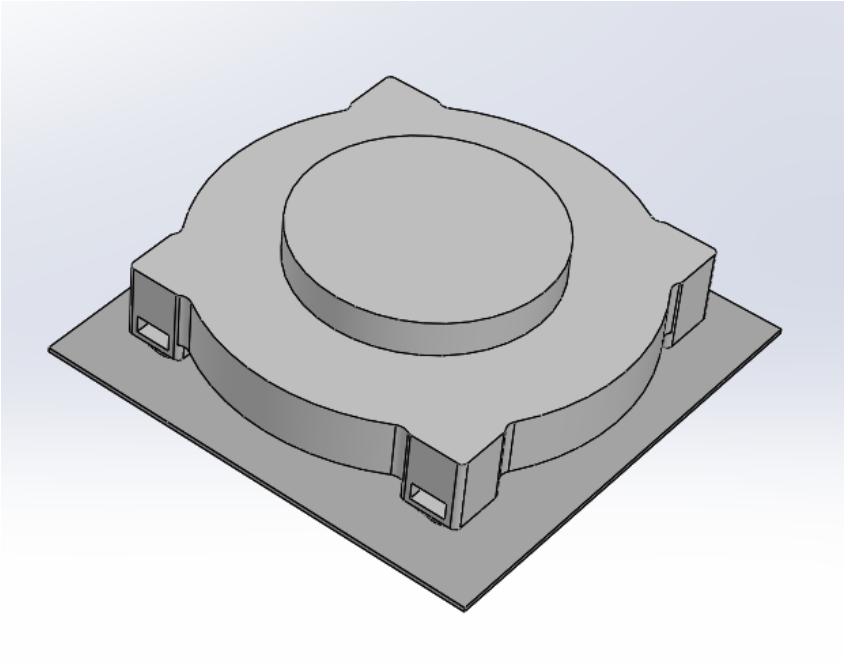


Figura 3.26 Encapsulado

Las imágenes en la figura 3.27 nos muestran el aspecto final del sistema una vez construido.

Figura 3.27 Reaction Wheel Assembly

3.6. Pruebas y tests

Las primeras pruebas que se deben hacer del sistema son de funcionamiento. Básicamente, se deben probar 2 sistemas separados: el funcionamiento del motor y el funcionamiento de la IMU. Una vez se haya comprobado el funcionamiento correcto de los dos sistemas por separado, se puede hacer una prueba de funcionamiento del sistema como un conjunto.

3.6.1. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR

La electrónica se ha diseñado para que el motor pueda funcionar de 2 maneras distintas: mediante funcionamiento tipo *sensorless* y mediante tipo *sensored*. El software Motor Control Workbench utilizado para generar el código de control del motor posee también una interfaz de control mediante UART desde la cual se le pueden proporcionar comandos básicos al motor. Esta interfaz la podemos ver en la figura 3.28.

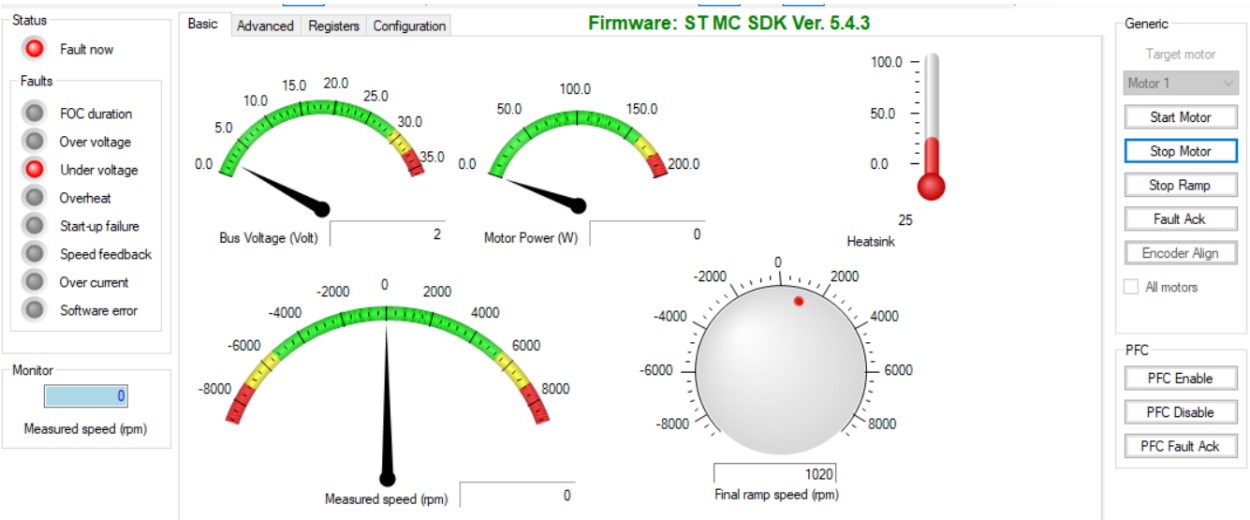


Figura 3.28 Panel de control

Haciendo pruebas con esta interfaz se han detectado 2 problemas:

3.6.1.1. Fallo de sincronismo del motor

Haciendo funcionar el motor en modo *sensorless*, en los cambios de sentido de giro, en el startup o en cambios de velocidad bruscos, el motor pierde el sincronismo y se detiene bruscamente. Para solucionarlo se han implementado dos soluciones:

- Limitar la rampa de aceleración del motor. El motor pierde el sincronismo porque el PID que controla la salida de señal del motor no está bien sintonizado. Forzando el sistema a generar cambios de manera más lenta podemos suavizar el comportamiento del PID y acercar su comportamiento a la respuesta del motor.
- Afinar los parámetros del motor. Los valores de los parámetros del motor han estado tomados con otro motor parecido, pero no el que estamos usando. Para tomar los valores del motor se deben soldar cables en las patillas (pads) de su PCB. En este proceso se corre el riesgo de dañar las patillas, por lo que para hacer pruebas y tomar valores se ha usado un motor que no es el que se montó en la Reaction Wheel. Los valores son muy parecidos, pero no iguales, especialmente los de rozamiento e inercia, por lo que es muy posible que modificándolos se consiga una respuesta más fiable.

3.6.1.2. Fallo del motor en modo sensored

No se ha conseguido que el motor funcione en modo *sensored*. Las posibles causas son las siguientes:

- Fallo en el circuito de acondicionamiento de los sensores. El circuito de acondicionamiento de los sensores es un poco complejo y, pese a que se hicieron pruebas antes de desarrollar la versión final, los componentes exactos utilizados en la PCB no fueron probados con anterioridad. Por ello, se debe analizar las señales que obtenemos de ellos mediante un osciloscopio y comprobar que son las esperadas.

  La figura X nos muestra la señal de 2 de los sensores hall después del condicionamiento (es decir, la señal tal y como se alimenta al microprocesador). En ella podemos ver que obtenemos dos señales cuadradas con amplitud 3.3V solapadas. Estas señales parecen ser, en principio, las esperadas.

- Fallo de software. El software autogenerado es enormemente complejo y buscar un fallo del que no se sabe la causa resulta imposible. Por ello, antes de investigar la causa en el software se deben descartar las demás opciones.
- Sensores no están bien alineados. Esta es la hipótesis que ha cobrado más fuerza. Como podemos ver en la imagen 3.29, los sensores están separados entre ellos 40.81 grados. Este valor difiere mucho del estándar en el que se suelen colocar los sensores hall. La aplicación Motor Control Workbench sólo nos deja seleccionar entre 60 y 120 grados. Es teóricamente posible usar sensores separados por distancias no estándar, pero de momento no ha sido posible adaptar el software a estas medidas.

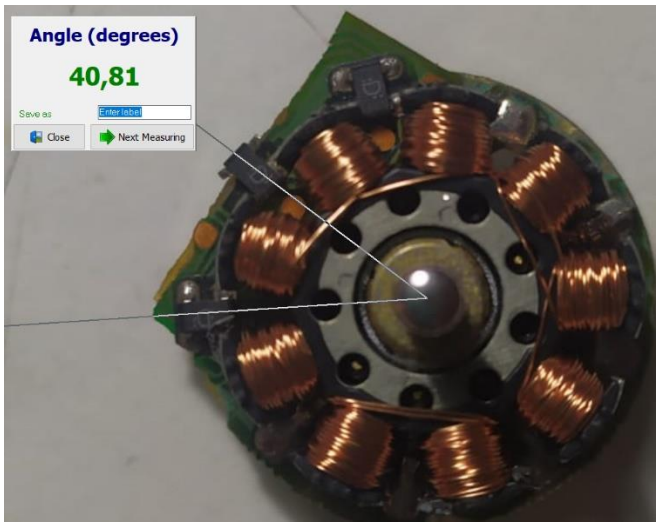


Figura 3.29 Medición del ángulo de los sensores hall

4. PRESUPUESTO Y VALORACIÓN ECONÓMICA

En este apartado se detallan los costes asociados a la elaboración del proyecto, así como los costes asociados a la fabricación y el ensamblaje del sistema desarrollado.

4.1. Mano de obra

Tipo de mano de obra	**Cantidad [horas]**	**Coste unitario [€/h]**	**Coste total [€]**
Ingenieril	300	15.00	4500
Supervisión	20	30.00	600
Técnica	150	10	1500
Subtotal			6600

4.2. Material amortizable

Concepto	**Adquisición [€]**	**Vida útil [años]**	**Utilización [días]**	**Coste total [€]**
Ordenador portátil	899	4	223	137.31
Fuente de alimentación	120	8	25	0.91
Estación de soldadura	150	8	5	0.95
Osciloscopio electrónico	450	8	7	1.08
Licencia SolidWorks 2018	120	1	7	2.3
Impresora 3d Ender 3 pro	226	3	1	0.21
Licencia Office 2013 Home&Student	140	1	35	13.45
Subtotal				156,21

4.3. Bill of Materials PCB

Descripción	Ref. Schematic	Cantidad	Precio [€]	Coste total[€]
L6230Q DMOS 3-Ph Motor 8 to 52V 2.8A Driver	IC1	2	3,90 €	7,80 €
STM32F302R8T6TR (MCU) Microcontrolador ARM (MCU) 16-BITS	U1	2	4,20 €	8,40 €
TSV994IPT Amplificador operacional- Op Amp Rail to Rail 20MHz	U4, U5, U6	6	1,05 €	6,30 €
ZLDO1117K33TC Regulador de voltaje LDO LDO Regulator IC 3.3V/1A	VR1	2	0,50 €	1,01 €
ICM-20948 IMU medida inercial World's Lowest Power 9-Axis MEMS MotionTracking Device	U3	2	5,32 €	10,64 €
NX7002BKMBYL MOSFET MOSFET 60V N-CHANNEL	Q1, Q2, Q3	12	0,18 €	2,14 €
TXB0104RUTR Traslación - Niveles de voltaje 4B Bidir Vltg-Level Translator	U2	3	0,92 €	2,75 €
UMA1E101MDD1TE Condensadores electrolíticos de aluminio (con terminales radiales) 100uF 25V 20% General Purpose	C1	4	0,28 €	1,12 €
EMK212ABJ106MG-T Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) 0805 16VDC 10uF 20% X5R	C2, C4	6	0,17 €	1,03 €
JMK316ABJ107ML-T Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) 100uF 6.3V X5R 20% 1206 Gen Purp	C3, C5	6	0,58 €	3,46 €
885012206020 Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) WCAP-CSGP 0.1uF 0603 10% 10V MLCC	C6, C7, C8, C9, C10,	30	0,04 €	1,20 €

885012206089 Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) WCAP-CSGP 0.01uF 0603 10% 50V MLCC	C25, C26	6	0,04 €	0,24 €
BAT54J,115 Diodos y rectificadores Schottky DIODE SW TAPE-7	D1, D2, D3, D4, D5, D	15	0,06 €	0,83 €
1N4148X-TP Diodos: de propósito general, potencia y conmutación	D7, D8	6	0,13 €	0,76 €
150060RS75000 SMD LED estándar 0603 Red	LED1	4	0,13 €	0,52 €
885012206082 Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) WCAP-CSGP 680pF 0603 10% 50V MLCC	C12, C13, C14	10	0,04 €	0,40 €
CM105X5R475M10AT Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) 4.7uF 20% 10V	C15, C17	6	0,12 €	0,70 €
885012006017 Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) WCAP-CSGP 10pF 0603 5% 16V MLCC	C20, C21, C22	10	0,06 €	0,64 €
CRCW060310K0JNEBC SMD Resistores de película gruesa - SMD 1/10Watt 10Kohms 5% Commercial Use	R1, R2, R37, R38, R39	30	0,03 €	0,81 €
CR0603-JW-151ELF Resistores de película gruesa - SMD 0603 150 OHMS 5% 1/10WATT	R3	4	0,09 €	0,36 €
AC0603FR-1075KL Resistores de película gruesa - SMD 75K ohm 1% 1/10W AEC-Q200	R4, R30, R31, R32	14	0,02 €	0,28 €
ERJ-3EKF6800V Resistores de película gruesa - SMD 0603 680ohms 1% AEC-Q200	R8, R10, R12	10	0,06 €	0,60 €
RC0603JR-072K2L Resistores de película gruesa - SMD 2.2K OHM 5%	R9, R11, R13, R14, R1	30	0,01 €	0,42 €

ERJ-3EKF9101V Resistores de película gruesa - SMD 0603 9.1Kohms 1% AEC-Q200	R20, R21, R22, R25, R	30	0,05 €	1,47 €
CR0603-FX-1693ELF Resistores de película gruesa - SMD 169K 1% 1/10W	R23	4	0,09 €	0,36 €
ERJ-3RBD1801V Resistores de película gruesa - SMD 0603 Resistor 0.5% 50ppm 1.8KOhm	R33, R34, R35	10	0,05 €	0,47 €
CR0603-FX-3902ELF Resistores de película gruesa - SMD 39K ohm 1%	R40, R42, R43	15	0,01 €	0,15 €
ZLDO1117G18TA Reguladores de voltaje LDO LDO Regulator IC 1.8V/1A	VR2	2	0,42 €	0,85 €
CC0603KRX7R7BB224 Condensadores de cerámica multicapa (MLCC- SMD/SMT) 220nF 16V X7R 10%	C24	4	0,09 €	0,36 €
ERJ-1TRQFR33U Resistores de detección de corriente - SMD 2512 0.33ohm 1% Curr Sense AEC-Q200	R5, R6, R7	6	0,55 €	3,29 €
Subtotal				59.36

4.4. Material para la implementación del sistema

Concepto	**Cantidad [uds]**	**Precio por unidad[€]**	**Precio total[€]**
Motores	15	0.706	10.59
Plástico impresión 3d	0.12	20	2.4
Tornillos cabeza avellanada philllips M3x10	2	0.15	0.3
Tornillos cabeza avellanada philllips M3x16	4	0.15	0.6
Tornillos prisioneros allen M3x4	2	0.23	0.46
Tuercas cuadradas	8	0.09	0.72
Fabricación PCB Seedstudio Fusion	1	46	46
Subtotal			61.07

4.5. Total

Concepto	**Precio total[€]**
Mano de obra	6600
Material amortizable	156.21
Bill of materials PCB	59.36
Material para la implementación del sistema	61.07
Total	6876.64

5. ESQUEMÁTICOS

Esta sección contiene una renderización de la PCB y el esquemático de la misma dividido en 5 hojas.

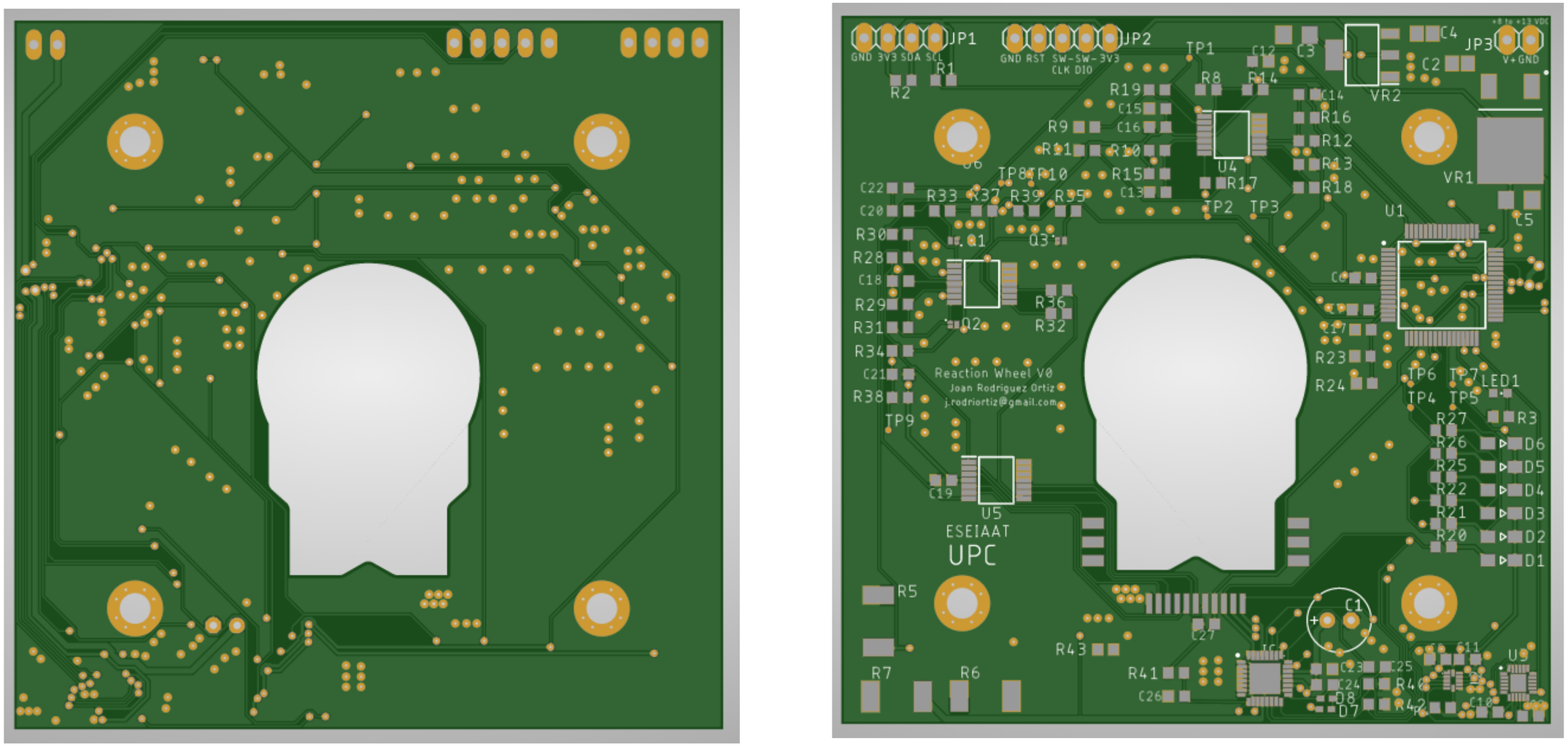


Figura 5.1:Renderización de la PCB

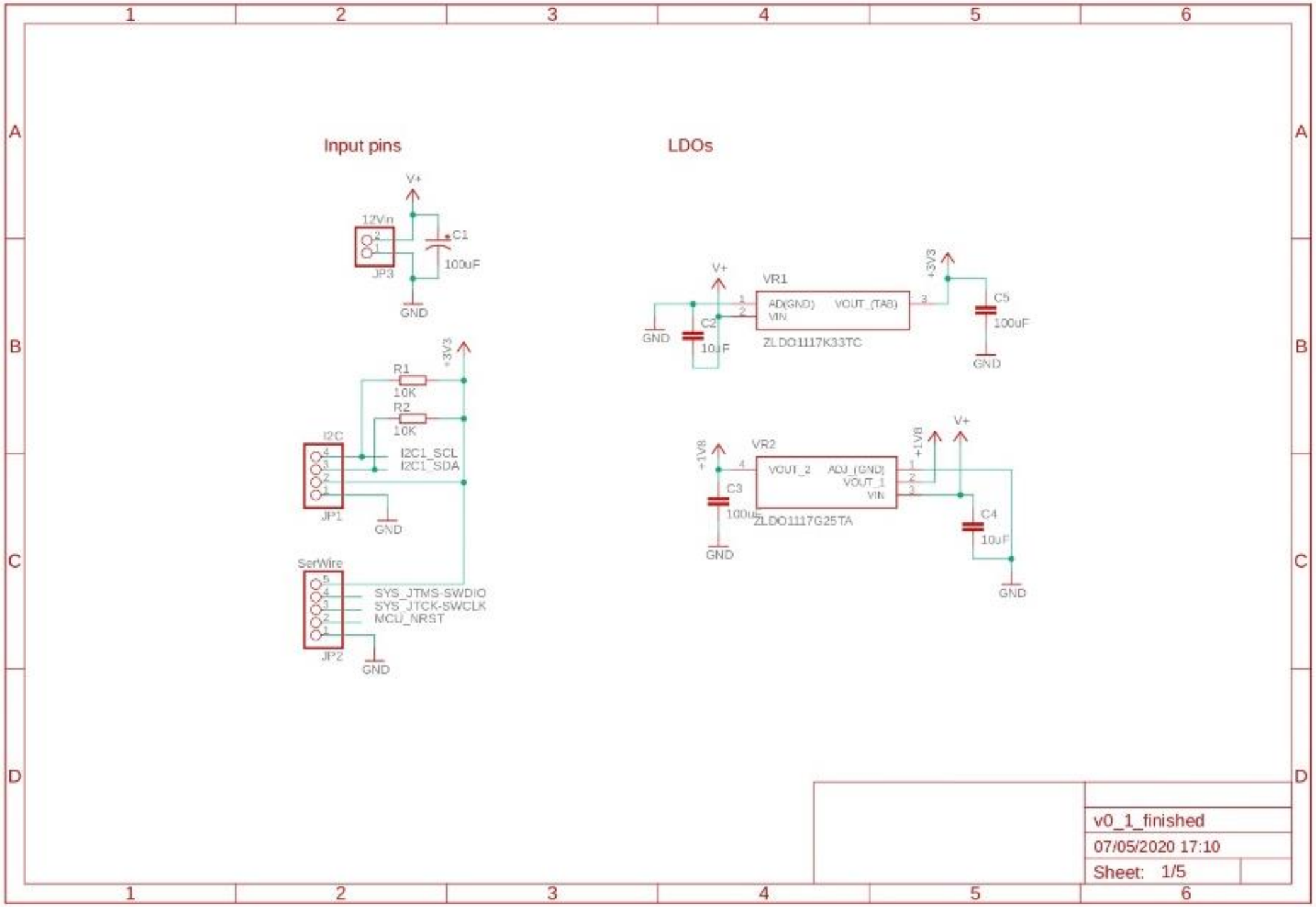


Figura 5.2: Esquemático. Hoja 1

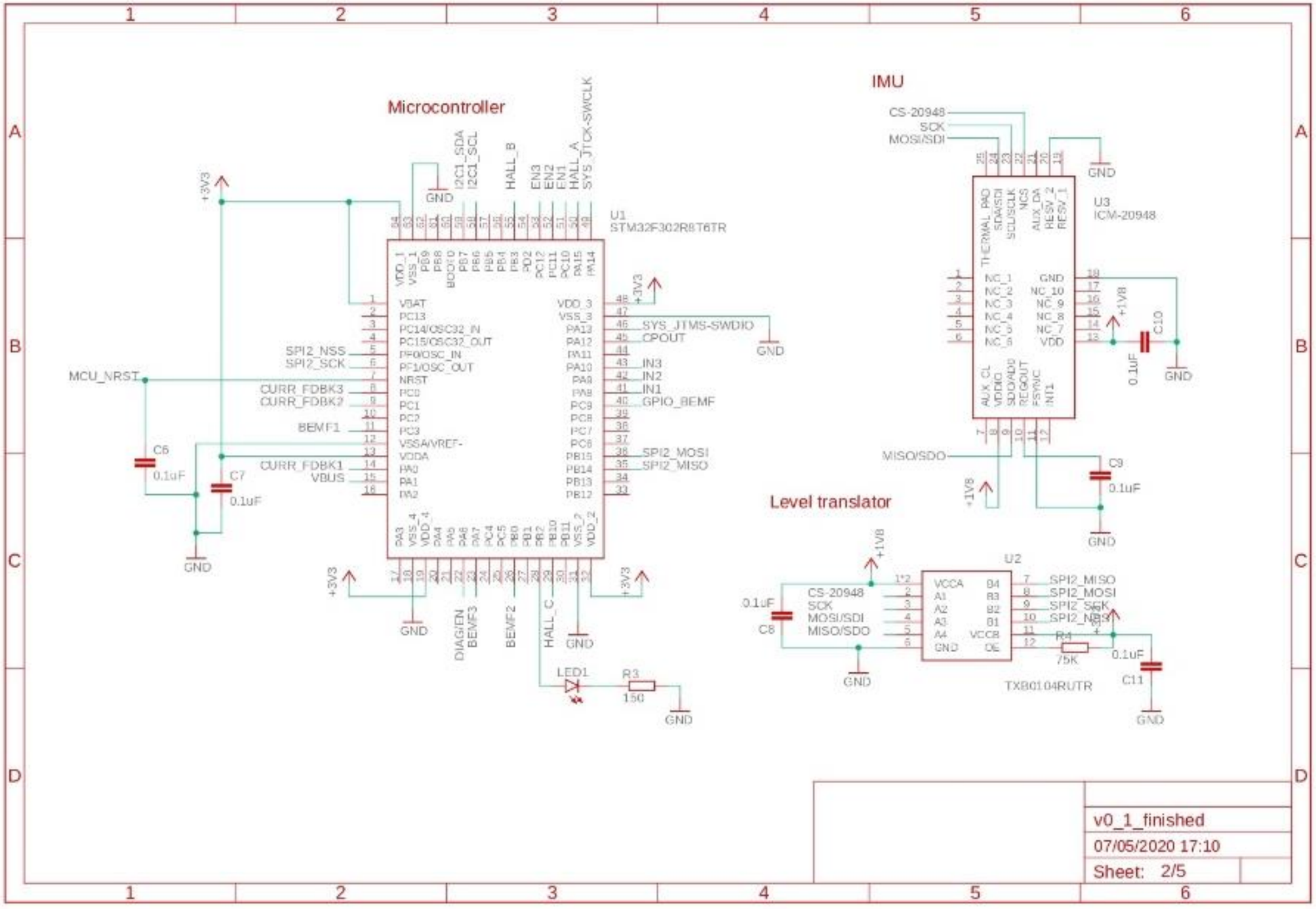


Figura 5.3: Esquemático. Hoja 2

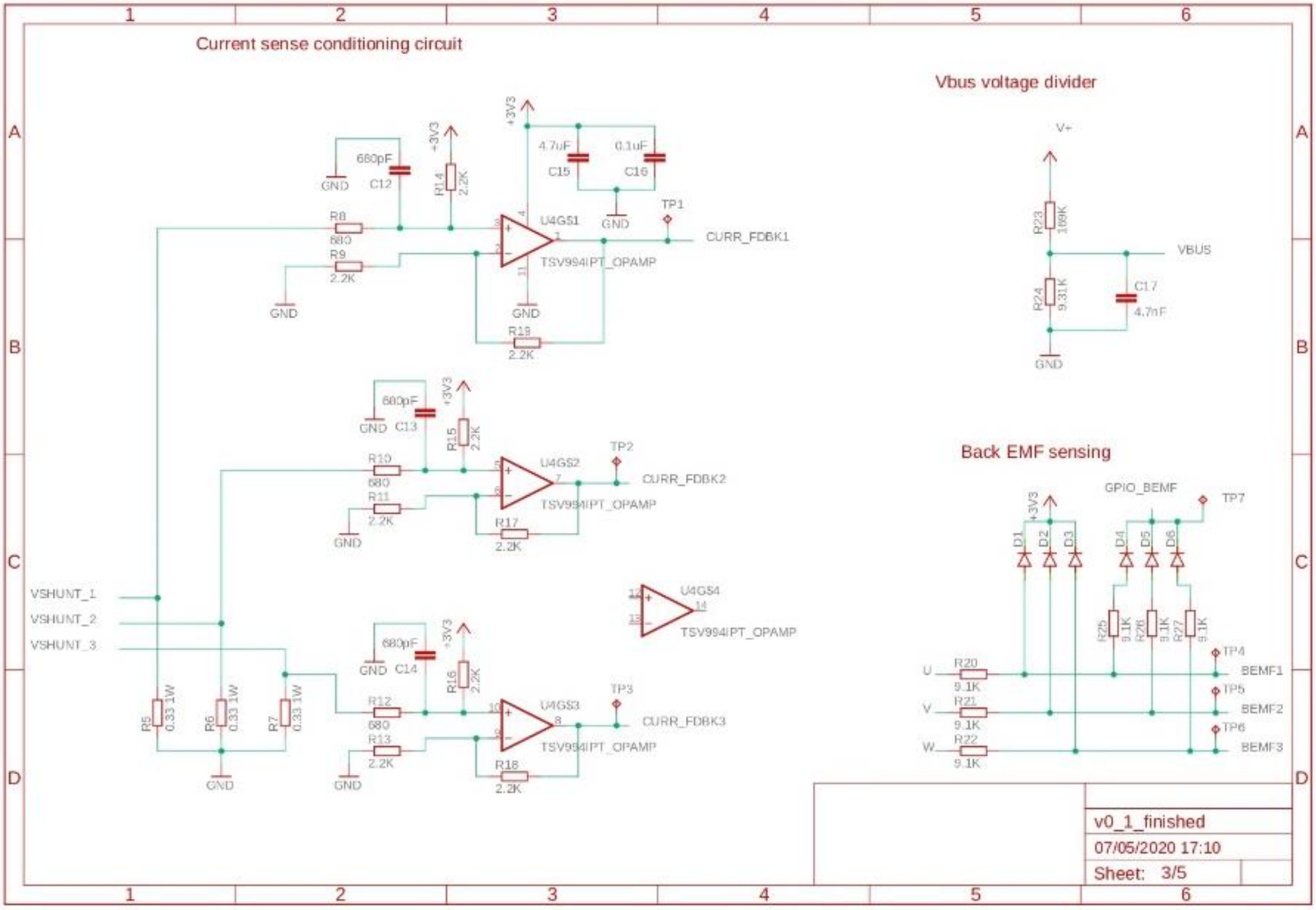


Figura 5.4: Esquemático. Hoja 3

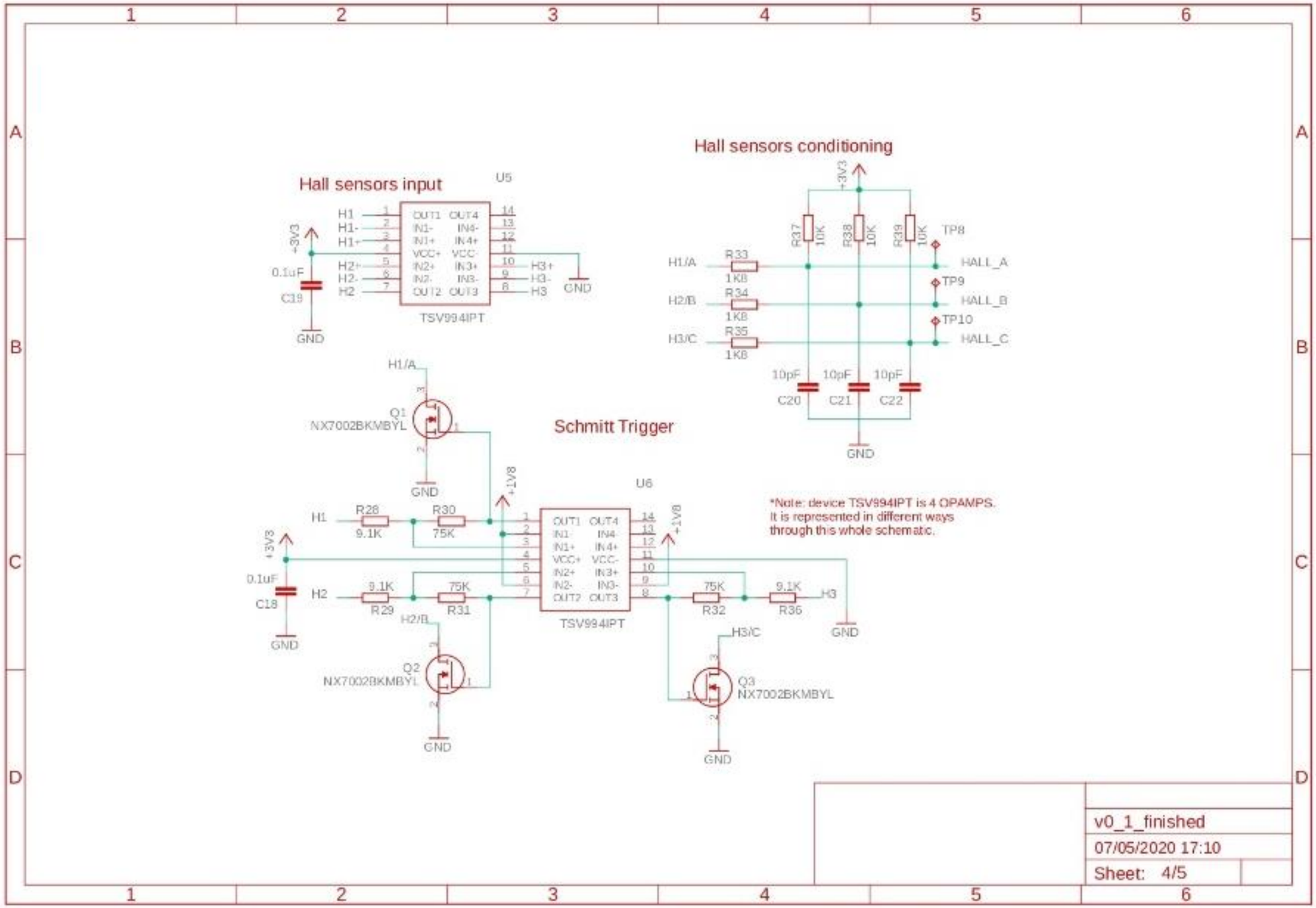
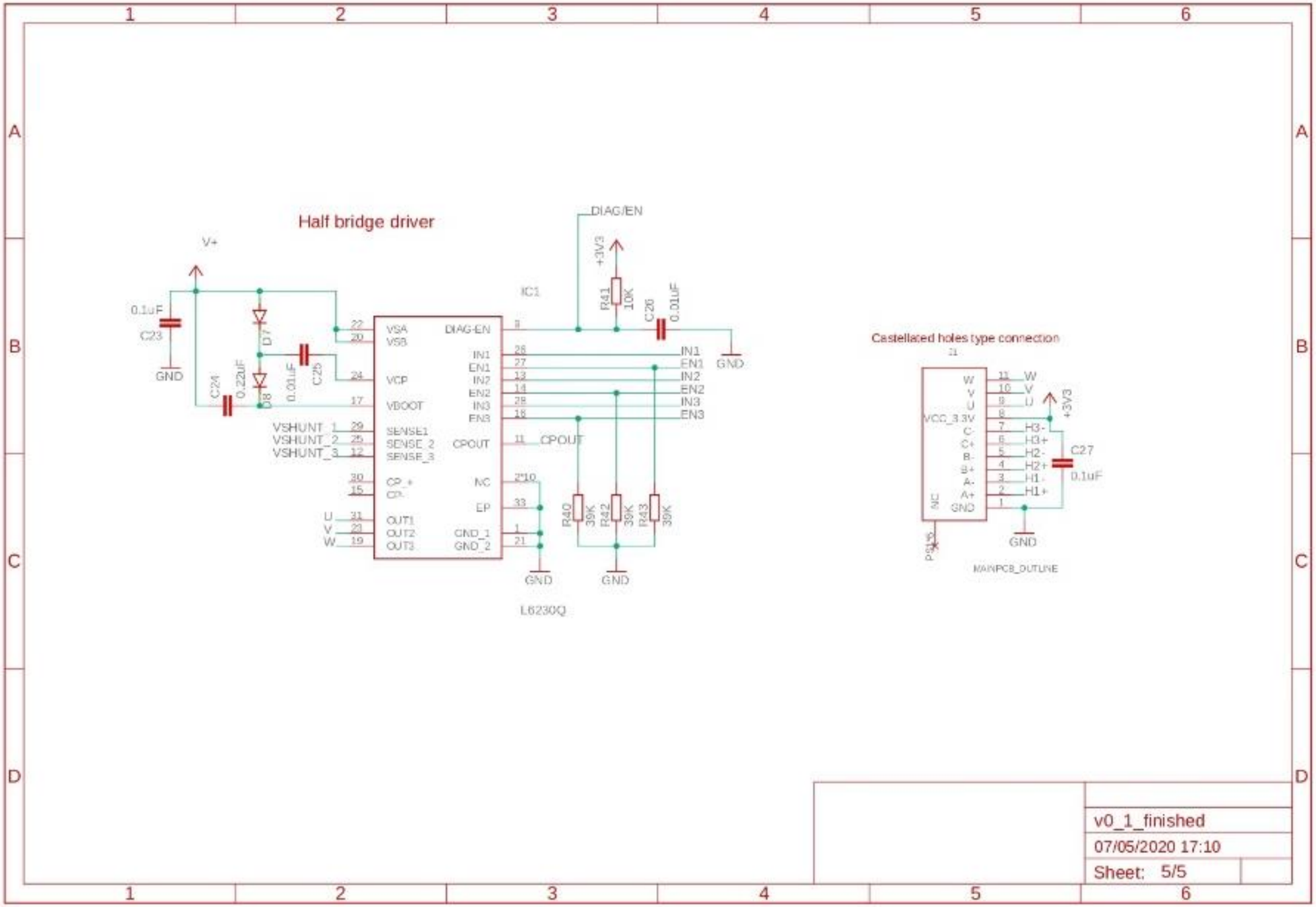


Figura 5.5: Esquemático. Hoja 4

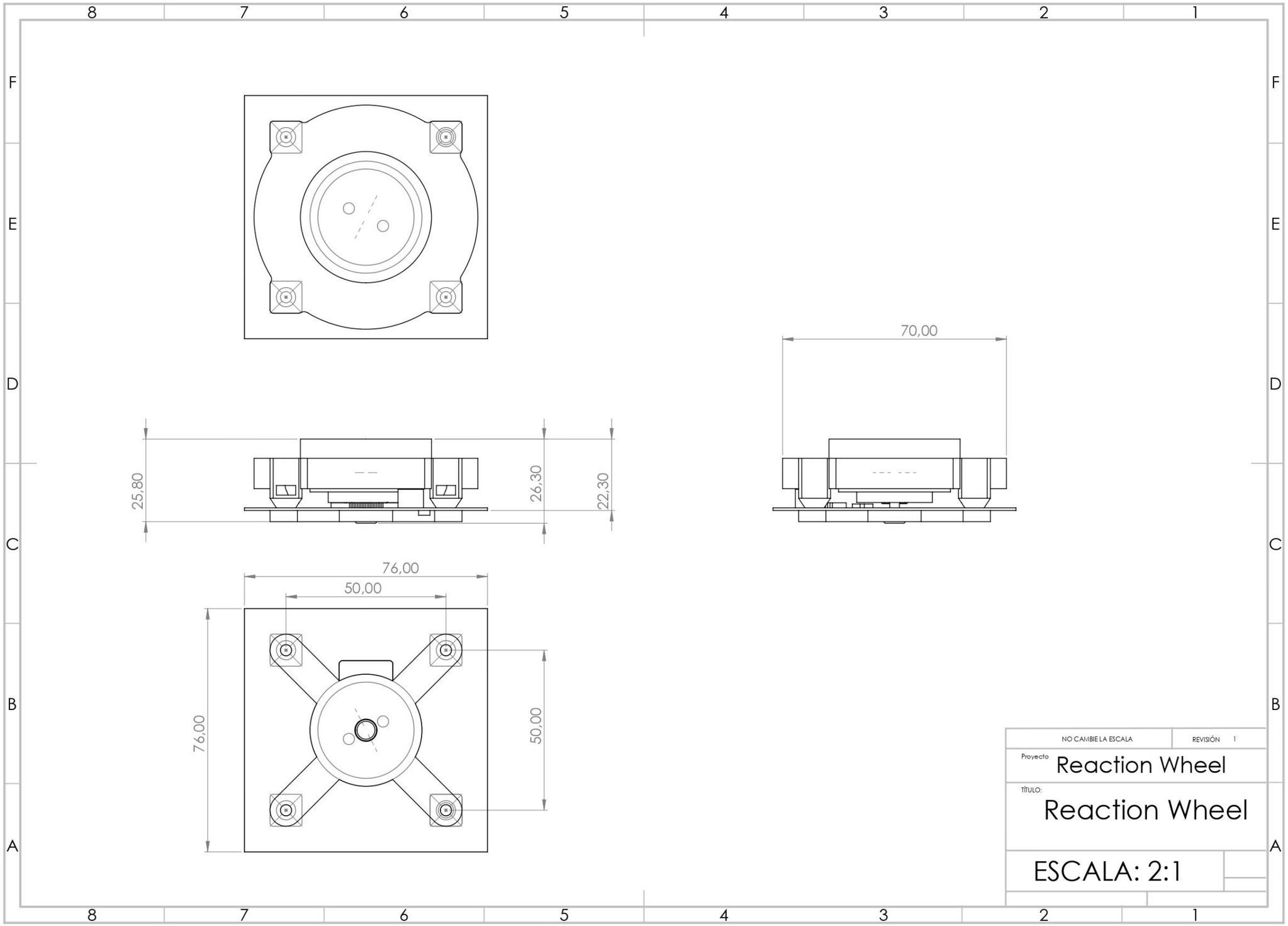


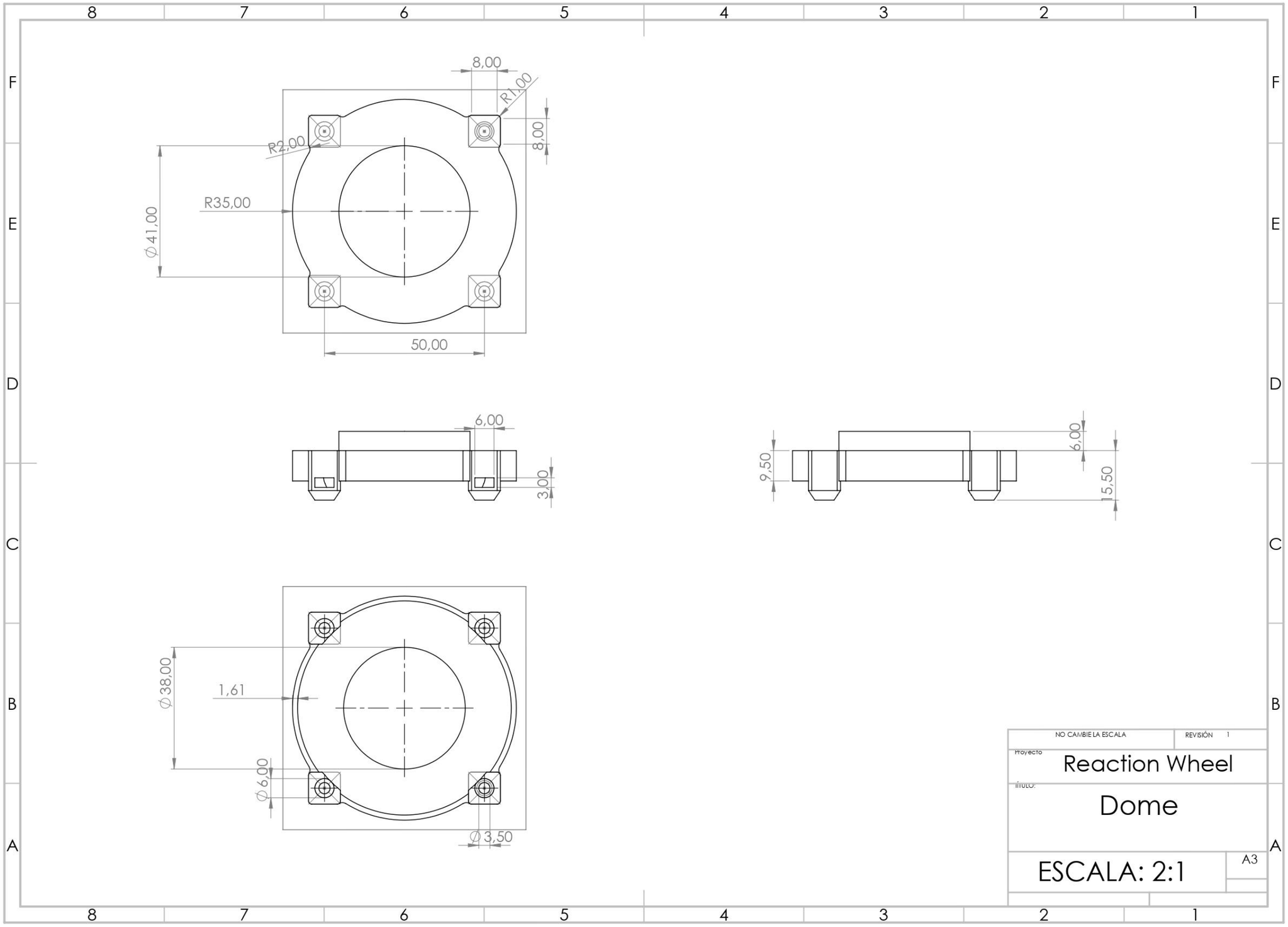
	v0_1_finished
	07/05/2020 17:10
	Sheet: 5/5

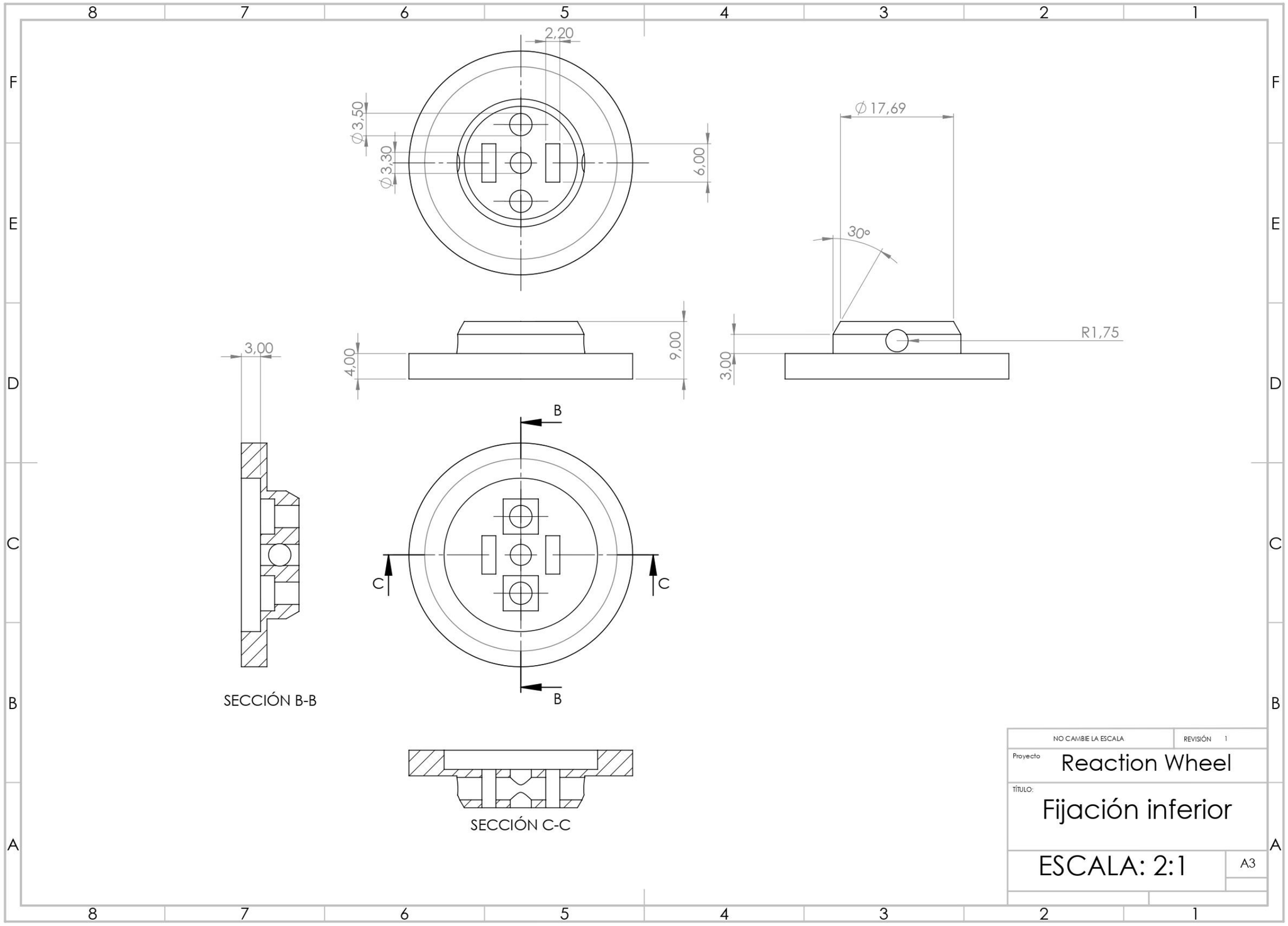
Figura 5.6: Esquemático. Hoja 5

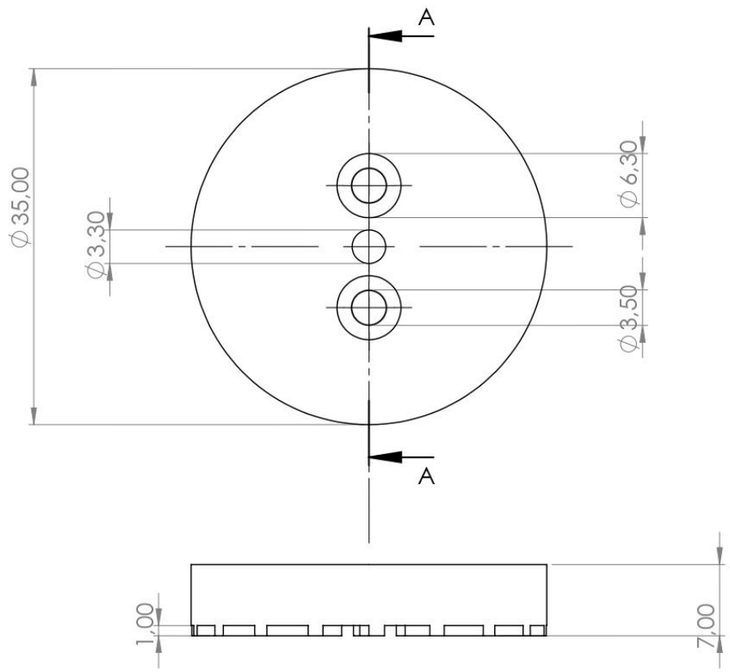
6. PLANOS

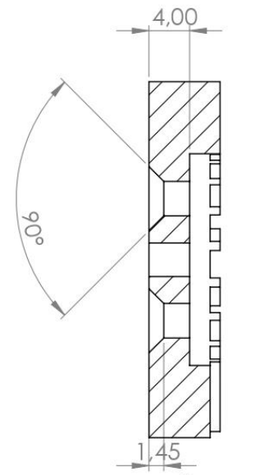
Esta sección contiene los planos de las piezas impresas en 3D y del ensamblaje de la Reaction Wheel con todas las piezas montadas.


70,00
25,80
26,30
22,30
76,00
50,00
76,00
50,00
NO CAMBIE LA ESCALA
REVISIÓN 1
Proyecto
Reaction Wheel
TÍTULO:
Reaction Wheel
ESCALA: 2:1

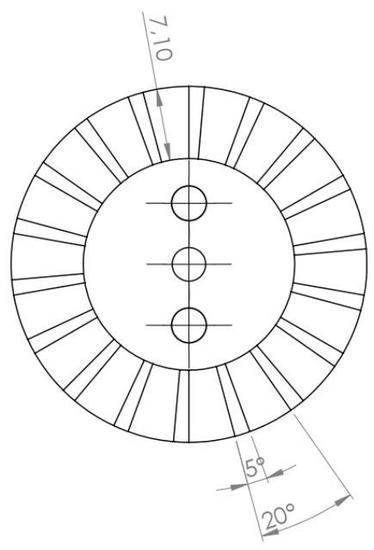

8,00
R1,00
R2,00
8,00
R35,00
Ø41,00
50,00
6,00
3,00
9,50
6,00
15,50
Ø38,00
1,61
Ø6,00
Ø3,50
NO CAMBIE LA ESCALA
REVISIÓN 1
Proyecto
Reaction Wheel
TÍTULO:
Dome
ESCALA: 2:1
A3


2,20
⌀3,50
⌀3,30
6,00
⌀17,69
30°
R1,75
3,00
4,00
9,00
3,00
B
C
C
B
SECCIÓN B-B
SECCIÓN C-C
NO CAMBIE LA ESCALA
REVISIÓN 1
Proyecto
Reaction Wheel
TÍTULO:
Fijación inferior
ESCALA: 2:1
A3





SECCIÓN A-A



NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN 1
Proyecto Reaction Wheel	
TÍTULO: Fijación superior	
ESCALA: 2:1	A3

7. CONCLUSIONES Y PLANIFICACIÓN DEL TRABAJO FUTURO PROPUESTO

El sistema propuesto de control de actitud permite el desarrollo de satélites de bajo coste para fines académicos. El coste de los materiales requeridos para la fabricación del sistema apenas supera los 120€. Teniendo en cuenta que la universidad cuenta con los equipos necesarios, así como la mano de obra, es una solución muy viable.

Se ha demostrado que el driver desarrollado es ideal para esta aplicación ya que funciona correctamente con el modelo de motor.

El estudio de viabilidad del motor elegido, todo y que parecía prometedor, finalmente no ha dado los resultados esperados, ya que, debido a que no ha sido posible encontrar las características técnicas del mismo, no se ha conseguido controlarlo usando los sensores hall que tiene integrados, es decir, en modo sensored.

El control tipo sensorless no es el ideal ya que el motor no puede trabajar en el rango de la zona muerta de RPM.

Se debe seguir trabajando en la adquisición de datos de la IMU. Consideramos que la IMU elegida sí es válida para esta aplicación.

De las citadas conclusiones extraemos que se debe encontrar un motor que encaje mejor con las características que necesitamos. A la hora de elegir el motor se debe tener en consideración el entorno en el que va a trabajar: en el vacío a muy baja temperatura y durante largo tiempo. La elección del motor es crítica y se debe tomar adecuadamente.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] D. Carmona Serrat, “Study and design of an attitude control system for an optical link between CubeSats,” Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.

[2] “State of the Art of Small Spacecraft Technology | NASA.” https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa (accessed Sep. 18, 2020).

[3] “What is a CubeSat? Nanosatellite? PocketQube? | Nanosats Database.” https://www.nanosats.eu/cubesat (accessed Sep. 18, 2020).

[4] N. CubeSat Launch Initiative, “CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers.”

[5] T. T. : N. HQ, “Optical Communications and Sensor Demonstration (OCSD),” 2015, Accessed: Sep. 28, 2020. [Online]. Available: http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/small_spacecraft/ocsd_project.html.

[6] B. B. Spratling and D. Mortari, “A survey on star identification algorithms,” *Algorithms*, vol. 2, no. 1. pp. 93–107, Mar. 2009, doi: 10.3390/a2010093.

[7] W. Lan, “CubeSat Design Specification Rev. 13 The CubeSat Program, Cal Poly SLO CubeSat Design Specification (CDS) REV 13 Document Classification X Public Domain ITAR Controlled Internal Only.”

[8] “NASA Technical Reports Server (NTRS).” https://ntrs.nasa.gov/citations/19750007247 (accessed Sep. 23, 2020).

[9] “Hall Effect Sensors.” https://www.electronicshub.org/hall-effect-sensors/ (accessed Sep. 18, 2020).

[10] S. Derammelaere, … M. H.-… and S. (ICEMS, and undefined 2016, “A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies,” *ieeexplore.ieee.org*, Accessed: Sep. 25, 2020. [Online]. Available: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7837471/.

[11] S. Rao and A. Fuller, “Low Voltage Translation for SPI, UART, RGMII, JTAG Interfaces,” 2018. Accessed: Sep. 25, 2020. [Online]. Available: www.ti.com.

[12] “Introduction to Low Dropout (LDO) Linear Voltage Regulators.” https://www.design-reuse.com/articles/42191/low-dropout-ldo-linear-voltage-regulators.html (accessed

Sep. 25, 2020).

[13] “MICRO SWITCH Sensing and Control HALL EFFECT SENSING AND APPLICATION.”

[14] “IPC-2221 Table of Contents,” 1998.

[15] “Fusion PCB Specification – Feedback & Ideas for seeed.” http://support.seeedstudio.com/knowledgebase/articles/447362-fusion-pcb-specification (accessed Sep. 25, 2020).

[16] “GitHub - CoryCline/ICM20948: STM32 HAL Driver for ICM20948 IMU.” https://github.com/CoryCline/ICM20948 (accessed Sep. 20, 2020).