

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño de PCB para carga útil de un CubeSat

Autor: Jesús de la Victoria Pardo Pérez

Tutores: Fernando Muñoz Chavero

José María Hinojo Montero

Jorge Jiménez Sánchez

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Diseño de PCB para carga útil de un CubeSat

Autor:

Jesús de la Victoria Pardo Pérez

Tutores:

Fernando Muñoz Chavero

Catedrático de Universidad

José María Hinojo Montero

Investigador Postdoctoral

Jorge Jiménez Sánchez

Investigador Predoctoral

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo de Fin de Grado: Diseño de PCB para carga útil de un CubeSat

Autor: Jesús de la Victoria Pardo Pérez

Tutor: Fernando Muñoz Chavero
José María Hinojo Montero
Jorge Jiménez Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

En estas paradójicas primeras líneas del trabajo pero últimas de la carrera, no quiero perder la oportunidad de agradecer a mis padres por la formación personal e inquebrantable apoyo que he recibido siempre y en todo momento por su parte. A pesar de haber sido unos años duros, suyo es el éxito conseguido y venidero.

A mis abuelos, que seguro estarán orgullosos de los objetivos que cumplen sus nietos y las personas en las que se han convertido.

A mi pareja, quien ha hecho de mi sufrimiento el suyo propio y nunca me ha dejado hundirme cuando las cosas no salen como uno desea.

A mis amigos, que han sido mis ánimos y acompañamiento durante estos años universitarios en los que me han hecho sentir un sevillano más.

Agradecer por supuesto a mis tutores, a Fernando por ofrecerme la oportunidad de enfrentarme a este interesante proyecto, a José por toda la formación y aprendizaje recibido y, en especial agradecer a Jorge por la continua ayuda y absoluta disposición durante todo este proceso.

Por último, agradecer a todas aquellas personas que han aportado sus conocimientos y valores personales durante esta formación, años intensos pero llenos de aprendizaje. Años, que por supuesto me han hecho estar más seguro aún de la persona que quiero ser y de cómo quiero afrontar mi vida.

Jesús de la Victoria Pardo Pérez

Sevilla, 2024

Resumen

La industria de las comunicaciones espaciales está experimentando un resurgir y se ha convertido en un sector altamente atractivo para ofrecer servicios de alta complejidad. Estas comunicaciones se están llevando a cabo mediante el despliegue de grandes constelaciones compuestas, en su mayoría, por pequeños satélites.

Dentro de la categoría de los nanosatélites se encuentran los conocidos como CubeSats. Estos dispositivos se despliegan en órbita baja terrestre (LEO), lo que les permite una baja latencia y, debido a su reducido tamaño, los costos de lanzamiento son más asequibles.

Este trabajo, tiene como motivación implementar una versión preliminar de la carga útil para medir Single Event Effects (SEE) que se va a utilizar en el CubeSat de la Misión Alpha. El proyecto Misión Alpha se presenta como una novedosa iniciativa dentro del emergente sector del 'Newspace' en Andalucía, combinando el ingenio de organizaciones tanto privadas como públicas en la región para dar origen al primer satélite genuinamente andaluz, denominado Alpha3.

Para llevar a cabo el objetivo principal del trabajo, deberemos integrar la carga útil en un PCB que permita el análisis de cómo las partículas cargadas pueden afectar el funcionamiento de los dispositivos electrónicos, especialmente las memorias. Para ello será clave la integración en la carga útil de una memoria SRAM, que se utilizará para el almacenamiento de estados y determinar cuando se producen los eventos SEE.

En primer lugar, se realizará un estudio preliminar tanto de las normativas, como de las especificaciones que debe cumplir esta carga de pago para ser implementada en el CubeSat. A continuación, se realizará la elección de componentes que formarán parte de la placa de circuitos impresos (PCB) y, posteriormente, se realizará el diseño completo de dicha PCB, mediante un proceso iterativo que permita la conexión de todos los elementos seleccionados.

Tras esto, procederemos a verificar la validez de los resultados obtenidos, y así poder proveer de información y servir como base a futuras implementaciones de la Misión Alpha.

Abstract

Space communications industry is experiencing a resurgence and has become a highly attractive sector for offering high-complexity services. These communications are being carried out through the deployment of large constellations, mostly composed of small satellites.

Within the category of nanosatellites are the well-known CubeSats. These devices are deployed in low Earth orbit (LEO), which allows for low latency and, due to their small size, more affordable launch costs.

The motivation for this work is to implement a preliminary version of the payload for measuring Single Event Effects (SEE) to be used in the CubeSat of the Alpha Mission. The Alpha Mission project is presented as an innovative initiative within the emerging 'Newspace' sector in Andalusia, combining the ingenuity of both private and public organizations in the region to give rise to the first genuinely Andalusian satellite, named Alpha3.

To achieve the main objective of this work, we will integrate the payload into a PCB that allows the analysis of how charged particles can affect the functioning of electronic devices, especially memories. The integration of an SRAM memory in the payload will be crucial, as it will be used to store states and determine when SEE events occur.

First, a preliminary study will be conducted on both the regulations and the specifications that this payload must meet to be implemented in the CubeSat. Next, the components that will form part of the printed circuit board (PCB) will be selected, and then the complete design of the PCB will be carried out through an iterative process that allows the connection of all the selected elements.

After this, we will proceed to verify the validity of the obtained results, thus providing information and serving as a basis for future implementations of the Alpha Mission.

Agradecimientos	I
Resumen	III
Abstract	V
Índice	VII
Índice de figuras	IX
Índice de tablas	XI
1 Introducción	1
1.1 <i>Aplicaciones y misiones de los CubeSat</i>	3
1.1.1 Observación de la Tierra	3
1.1.2 Investigación Científica	3
1.1.3 Demostración de Tecnología	3
1.1.4 Educación y Formación	3
1.1.5 Comunicaciones	3
1.1.6 Exploración Lunar y Planetaria	3
1.1.7 Investigación Biológica y Bioquímica	4
1.1.8 Monitorización de Desastres Naturales	4
1.2 <i>Motivación del trabajo</i>	4
1.3 <i>Objetivos</i>	5
2 Especificaciones de los CubeSat	7
2.1 <i>Diseño y características de los CubeSat</i>	7
2.1.1 Forma cúbica y dimensiones estandarizadas	7
2.1.2 Facilidad de integración	7
2.1.3 Lanzamiento como carga secundaria	8
2.1.4 Adaptabilidad y flexibilidad	8
2.1.5 Limitaciones de espacio y energía	8
2.1.6 Estructuras de cubierta	8
2.1.7 Estructura modular	8
2.2 <i>Restricciones mecánicas</i>	9
2.2.1 Tolerancias de fabricación precisas	9
2.2.2 Sistemas de fijación y montaje	9
2.2.3 Estructura robusta	9
2.2.4 Despliegue de paneles solares y antenas	10
2.2.5 Capacidad para adaptarse a dispensadores de carga útil	10
2.2.6 Protección de los componentes sensibles	10
2.3 <i>Restricciones de temperatura</i>	10
2.3.1 Desafíos de la temperatura	11
2.3.2 Cómo debemos abordar estos retos	11
2.4 <i>Restricciones de tamaño</i>	12
2.4.1 Dimensiones estandarizadas	12
2.4.2 Tamaño de la placa base	12

2.4.3	Espesor de la placa	12
2.4.4	Alojamiento de componentes	12
2.4.5	Espacio para conexiones	12
2.5	<i>Restricciones respecto a las vibraciones</i>	12
2.6	<i>Certificaciones y normas</i>	14
3	Definición de la Carga Útil	17
3.1	<i>Descripción de la arquitectura del sistema</i>	17
3.2	<i>Selección de componentes</i>	19
3.2.1	Microcontrolador – STM32L496	19
3.2.2	Controller area network (CAN) - SN65HVD230	21
3.2.3	Static RAM (SRAM) - CY62157EV30	22
3.2.4	Sensor de Temperatura - LM75	23
4	Diseño del PCB	25
4.1	<i>Consideraciones iniciales</i>	25
4.2	<i>Librería de componentes</i>	28
4.2.1	Librería de símbolos	29
4.2.2	Librería de huellas	30
4.3	<i>Diseño de esquemáticos</i>	32
4.3.1	Esquemático “Top”	33
4.3.2	Esquemático del microcontrolador (01_mcu)	34
4.3.3	Esquemático del conector JTAG (02_jtag)	35
4.3.4	Esquemático del sensor de temperatura (03_temp)	36
4.3.5	Esquemático de la Static RAM (04_sram)	36
4.3.6	Esquemático de los transceptores CAN (05_can1-2)	37
4.3.7	Esquemático de los conectores (06_connectors)	37
4.3.8	Esquemático de la unidad de potencia (07_power)	38
4.4	<i>Bill of Materials (BOM)</i>	39
4.5	<i>Especificaciones de diseño del PCB</i>	40
4.6	<i>Definición del Stack-up del PCB</i>	41
4.7	<i>Reglas de diseño</i>	44
4.8	<i>Floorplanning</i>	47
4.9	<i>Rutado</i>	50
4.10	<i>Verificación del diseño</i>	55
4.11	<i>Generación de outputs en Altium Designer</i>	55
5	Conclusiones	57
5.1	<i>Líneas Futuras</i>	58
Anexo A	Implementación física en Altium Designer	61
A.1	<i>Creación del Proyecto en Altium Designer</i>	61
A.1.1	Creación del Microcontrolador	61
A.1.2	Creación de la SRAM, CAN, Sensor de Temperatura y conector.	64
A.2	<i>Floorplanning</i>	66
A.3	<i>Rutado</i>	67
Referencias		71
Glosario		73

Índice de figuras

Figura 1. Satélite Sputnik, primer satélite de fabricación humana en orbitar la Tierra [5]	2
Figura 2. CubeSats siendo introducidos en el sistema de despliegue	4
Figura 3. Configuraciones de tamaños de los CubeSats	8
Figura 4. Comparación entre un CubeSat de 1U y uno de 3U	9
Figura 5. Momento del despliegue de un CubeSat	10
Figura 6. Test de temperatura a un CubeSat	11
Figura 7. Aproximación de un sistema vibratorio	13
Figura 8. Flujo de pruebas/test de vibraciones que se realizan a un CubeSat	14
Figura 9. Diagrama de bloques de la estructura del sistema	18
Figura 10. Placa con los componentes montados	19
Figura 11. Microcontrolador de la familia STM32	20
Figura 12. Transceptor CAN integrado SN65HVD230	21
Figura 13. Ejemplo de una Static RAM	23
Figura 14. Sensor de temperatura LM75 de interfaz I ² C	23
Figura 15. Esquema inicial del PCB	28
Figura 16. Librería de símbolos	29
Figura 17. Librería de huellas	30
Figura 18. Capas de una huella	31
Figura 19. Leyenda de colores de las capas de una huella	32
Figura 20. Nomenclaturas escogidas para los esquemáticos	32
Figura 21. Sincronización de puertos	33
Figura 22. Representación del esquemático "00_top"	34
Figura 23. Esquemático (01_mcu) del microcontrolador	35
Figura 24. Esquemático (02_jtag) del conector JTAG	35
Figura 25. Bill of Materials	39
Figura 26. Dimensiones exteriores de la placa [16]	40
Figura 27. Disposición de los 104 pines de los conectores	41
Figura 28. Dimensiones de los recortes de la placa [16]	41

Figura 29. Vista lateral del “stacking” [16]	42
Figura 30. Configuración del “stack-up” escogida [17]	42
Figura 31. Vista interna del funcionamiento de las vías	43
Figura 32. Detalle de las capas de una placa	44
Figura 33. Diseño del PCB [28]	44
Figura 34. Ejemplos de tamaños utilizados comúnmente en SMD	45
Figura 35. Reducción de ruido mediante señal diferencial [24]	46
Figura 36. Esquemático, huella y 3D del regulador de voltaje	46
Figura 37. Huella PCB de la placa	47
Figura 38. Propuesta inicial del floorplanning	48
Figura 39. Floorplanning tras consideraciones	49
Figura 40. Conexiones y componentes del plano top	51
Figura 41. Conexiones en el plano bottom	52
Figura 42. Vista 3D de las conexiones y componentes del plano top	54
Figura 43. Vista 3D de las conexiones en el plano bottom	54
Figura 44. Prototipo de PCB flexible	58
Figura 45. Prototipo del CubeSat M-ARGO	59
Figura 46. Esquemático del microcontrolador, LQFP144	62
Figura 47. PCB del microcontrolador, LQFP144	63
Figura 48. Representación 3D del microcontrolador, LQFP144	63
Figura 49. Esquemáticos de los componentes principales	64
Figura 50. Huellas de los componentes principales	65
Figura 51. Representación 3D de los componentes principales	65
Figura 52. Integración de los componentes en el PCB	66
Figura 53. Posicionamiento definitivo de los componentes	67
Figura 54. Ejemplo de enrutamiento de pista	68
Figura 55. Implementación de vías y cambios de plano	68
Figura 56. Plano que unifica la tensión de entrada	69

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación según el tamaño de los satélites [2]	2
Tabla 2. Excel de soporte para escoger los puertos en el Núcleo	27
Tabla 3. Dimensiones del PCB [16]	40
Tabla 4. Longitudes y respectivos retrasos de señal de las conexiones de la SRAM	53

1 INTRODUCCIÓN

La exploración espacial es un salto natural en nuestra necesidad de aprender. Si no lo hacemos, estaremos atrapados aquí en la Tierra.

STEPHEN HAWKING

En el vasto panorama de la exploración espacial, una innovadora categoría de satélites, denominados CubeSats, ha emergido como un vehículo de cambio y descubrimiento. Estos satélites, son considerados diminutas maravillas tecnológicas que han revolucionado la forma en que imaginamos la investigación y la experimentación en el espacio. Con unas dimensiones sorprendentemente reducidas, estos pequeños satélites ofrecen una plataforma accesible y asequible para instituciones académicas, investigadores independientes y empresas emergentes que desean explorar las fronteras del espacio.

El término "CubeSat" deriva de su forma característica, que recuerda un cubo en miniatura. A pesar de su tamaño compacto, estos diminutos exploradores espaciales han desatado una revolución en la manera en que concebimos los viajes espaciales y la investigación en órbita. Su diseño estandarizado y su capacidad para viajar como cargas secundarias en lanzamientos principales los han convertido en un medio valioso para abordar una variedad de objetivos científicos, tecnológicos y educativos.

En las últimas décadas del siglo pasado se pudo apreciar un importante auge en la electrónica de comunicaciones, más específicamente en la optimización de la microelectrónica para procesadores de abordo, células solares, tecnologías de propulsión, dispositivos de alta frecuencia y sistemas de cálculos orbitales. Debido a esto, muchos sectores comenzaron a reducir el tamaño de sus productos.

Esto, repercutió de manera significativa en el ámbito aeroespacial y, aunque el concepto de pequeño satélite no sea algo revolucionario, gracias a estos avances se dieron los primeros pasos que motivaron la idea de buscar un modelo de satélite de un volumen aún menor.

Los CubeSats tienen sus raíces a finales del siglo XX, cuando surgieron como una innovadora respuesta a los altos costos y barreras de acceso asociados con la investigación espacial tradicional. La idea de desarrollar satélites pequeños y asequibles con estructuras modulares comenzó a ganar atención en el mundo académico y científico. Toda la historia de estos pequeños satélites se puede diferenciar en las siguientes etapas.

A finales de los 90, el diseño referencial del CubeSat fue propuesto en 1999 por los profesores Jordi Puig-Suari de la Universidad Politécnica de California y Bob Twiggs de la Universidad de Stanford, quienes inspirados por la necesidad de hacer que la exploración espacial fuera más accesible, plantearon los primeros pasos sobre dichas especificaciones en los CubeSats [3].

Tamaño del Satélite	Peso	Rango de Costo (Aprox.)
Picosatélite	< 1 kg	10,000 - 100,000 €
Nanosatélite	1 kg - 10 kg	100,000 – 1 millón de €
Microsatélite	10 kg - 100 kg	1 - 10 millones de €
Minisatélite	100 kg - 500 kg	10- 50 millones de €
Satélite Pequeño	500 kg - 1 tonelada	50 - 100 millones de €
Satélite Mediano	1 tonelada - 10 toneladas	100 - 500 millones de €
Satélite Grande	> 10 toneladas	Varía significativamente según la misión y complejidad

Tabla 1. Clasificación según el tamaño de los satélites [2]

Pocos años después, principios de los años 2000, el concepto de CubeSat ganó tracción y fue adoptado por instituciones académicas, organizaciones sin fines de lucro y la comunidad espacial en general. Se establecieron estándares para los tamaños de los CubeSats, como 1U (unidad) para un cubo de 10x10x10 cm. En 2003, el CubeSat XI-V, desarrollado por la Universidad de Tokio, se convirtió en el primer CubeSat en ser lanzado con éxito al espacio. Esta misión marcó un hito importante al demostrar la viabilidad de estos planteamientos.

A medida que avanzaba la década, se realizaron más lanzamientos exitosos de CubeSats de diferentes universidades e instituciones de todo el mundo. Estos satélites se utilizaron para una variedad de propósitos, desde experimentos científicos hasta pruebas de tecnología.

Todo esto, junto al avance de las tecnologías de fabricación y lanzamiento, propició que la popularidad de los CubeSats continuara creciendo. Organizaciones comerciales y gubernamentales comenzaron a adoptar estas ideas para una amplia gama de misiones. En 2013, la NASA lanzó su programa CubeSat Launch Initiative, que proporciona oportunidades para que CubeSats sean lanzados como cargas secundarias en cohetes espaciales más grandes.



Figura 1. Satélite Sputnik, primer satélite de fabricación humana en orbitar la Tierra [5]

La comunidad CubeSat se expandió aún más con el tiempo, abarcando desde proyectos educativos hasta investigaciones científicas y aplicaciones comerciales. Los CubeSats demostraron su utilidad en observación de la Tierra, comunicaciones, investigación espacial y más.

Es por ello que la historia de los CubeSats es un ejemplo inspirador de cómo la innovación puede democratizar el acceso al espacio y permitir que una amplia gama de personas e instituciones participe en la exploración y la investigación espacial. A medida que la tecnología continúa avanzando, es probable que los CubeSats sigan desempeñando un papel importante en la evolución de la exploración espacial.

1.1 Aplicaciones y misiones de los CubeSat

Este tipo de nanosatélites ha demostrado su versatilidad en una amplia variedad de aplicaciones y misiones en la exploración espacial y la investigación científica [6]. A continuación, se presentan algunas de las aplicaciones y misiones más destacadas de los CubeSats:

1.1.1 Observación de la Tierra

Los CubeSats se utilizan para monitorear la Tierra desde el espacio, realizando seguimiento de cambios climáticos, estudios de vegetación, análisis de la capa de ozono y detección de cambios en el medio ambiente. Pueden capturar imágenes de alta resolución y datos que contribuyen a la comprensión de los fenómenos terrestres.

1.1.2 Investigación Científica

También han participado en investigaciones científicas en diversas disciplinas. Pueden estudiar la radiación cósmica, la formación de auroras, la atmósfera superior y fenómenos espaciales como las tormentas solares. Estos nanosatélites permiten recopilar datos valiosos en regiones del espacio que son difíciles de alcanzar con satélites más grandes.

1.1.3 Demostración de Tecnología

Estos nanosatélites son ideales para probar y validar nuevas tecnologías espaciales de manera económica y rápida. Han demostrado tecnologías de propulsión, sistemas de comunicación avanzados, sistemas de control de actitud y más. Estas demostraciones pueden allanar el camino para futuras misiones más ambiciosas.

1.1.4 Educación y Formación

Los CubeSats brindan una plataforma educativa única para estudiantes y profesionales emergentes en el campo de la exploración espacial. Las universidades y las instituciones educativas pueden construir y operar CubeSats como parte de programas académicos, proporcionando una experiencia práctica y valiosa en diseño, construcción y operación de satélites.

1.1.5 Comunicaciones

Algunos CubeSats se han desplegado como constelaciones para mejorar la conectividad y las comunicaciones. Pueden proporcionar servicios de comunicación de datos, seguimiento y telemetría en áreas donde la cobertura es limitada, lo que resulta especialmente útil en regiones remotas.

1.1.6 Exploración Lunar y Planetaria

Destacar también que han sido utilizados como acompañantes en misiones hacia la Luna y otros planetas. Han desempeñado un papel en la observación, el mapeo y la recopilación de datos en destinos extraterrestres. Incluso han sido desplegados desde naves madre para investigar cuerpos celestes en el sistema solar.



Figura 2. CubeSats siendo introducidos en el sistema de despliegue

1.1.7 Investigación Biológica y Bioquímica

Los CubeSats han sido utilizados para realizar experimentos biológicos y bioquímicos en el espacio, estudiando cómo los organismos y materiales se comportan en microgravedad. Estas misiones ayudan a comprender mejor los efectos de la vida en el espacio y pueden tener implicaciones para futuras misiones tripuladas.

1.1.8 Monitorización de Desastres Naturales

Destacar ya por último, que este tipo de satélites ha demostrado su utilidad en el seguimiento y respuesta a desastres naturales como terremotos, huracanes e inundaciones. Pueden proporcionar imágenes y datos en tiempo real que ayudan en la toma de decisiones y la planificación de acciones de socorro.

1.2 Motivación del trabajo

El surgimiento de la idea para llevar a cabo este estudio recae sobre la necesidad de diseñar y producir una versión preliminar de la carga útil de un nanosatélite que nos permita medir SEE en la Misión Alpha. La motivación detrás de la Misión Alpha no solo radica en la exploración de nuevas fronteras en el espacio, sino también en el impulso del desarrollo tecnológico y socioeconómico de Andalucía. Además de su relevancia científica, el proyecto busca destacar la capacidad de la región para liderar iniciativas innovadoras en la industria espacial, aprovechando la experiencia local y promoviendo la colaboración entre diferentes sectores. [1]

Este pequeño satélite estará formado por diversas placas de circuitos integrados, cada una de las cuales cumple una misión. En nuestro caso, el principal motor de este estudio, será el análisis de cómo afectan las partículas cargadas y la radiación a los dispositivos electrónicos. Para llevar a cabo esto, diseñaremos una PCB que deberá implementar una SRAM, componente clave para la medición y almacenamiento de los datos que obtengamos cuando el nanosatélite se sitúe bajo los efectos de la radiación espacial.

De forma integral, el trabajo se basa en el comentado estudio preliminar de la carga útil que se utilizará en el CubeSat, el cual incluye la implementación y diseño de circuitos integrados y sistemas de control. Este aspecto del proyecto no solo contribuye al avance del conocimiento en el ámbito de la ingeniería espacial, sino que también proporciona una oportunidad única para explorar aplicaciones prácticas de la electrónica en el espacio.

1.3 Objetivos

La finalidad principal de este trabajo es realizar un estudio preliminar exhaustivo bajo las normativas de **implementación de tarjetas impresas** en aplicaciones aeroespaciales y **diseñar una versión preliminar** para la misión Alpha de la carga útil de un CubeSat con el propósito de medir Single Event Effects (SEE).

En primer lugar, se llevará a cabo un análisis detallado de la normativa vigente relacionada con el diseño y la fabricación de la carga útil de los CubeSats. Esto implicará la investigación de normas internacionales reconocidas, como las de la European Cooperation for Space Standardization (ECSS), la AS9100 o el IPC, así como otras regulaciones relevantes en el ámbito espacial. Se evaluarán los requisitos técnicos específicos que deben cumplir las tarjetas impresas PCBs destinadas a aplicaciones aeroespaciales.

A continuación, se realizará un estudio de requisitos de la carga útil propuesta. Una vez determinado los requisitos, se realizará la elección de los componentes que formarán parte de la PCB de la carga útil del CubeSat.

Posteriormente, se estudiará y diseñará la carga útil que se integrará en el Printed Circuit Board (PCB) para su uso adecuado y efectivo en las aplicaciones comentadas. Esto implicará la definición de los requisitos de la PCB de la carga útil, el diseño preliminar, la implementación del esquemático, la configuración de las reglas de diseño, la selección del stack-up de la PCB, el floorplaning de los componentes y el rutado completo de la PCB.

Finalmente, se realizará una verificación de los resultados obtenidos, dando así por concluida la validez de dicho estudio preliminar y, de esta forma, poder ofrecer unos datos e información de base a futuras implementaciones de la Misión Alpha.

2 ESPECIFICACIONES DE LOS CUBESAT

*Los satélites hacen que el mundo sea más pequeño,
pero también más grande, conectando a personas y
lugares lejanos.*

YURI GAGARIN

Diseñar un CubeSat implica tener en cuenta una serie de especificaciones detalladas para garantizar su compatibilidad con el lanzamiento, así como una exitosa operación en el desarrollo de su respectiva misión. Estas especificaciones abarcan una amplia gama de aspectos técnicos, operativos y ambientales. Un enfoque detallado en la definición de estas especificaciones ayuda a lograr un diseño óptimo y el cumplimiento de los objetivos de la misión.

2.1 Diseño y características de los CubeSat

Los CubeSats son conocidos por su diseño distintivo y altamente modular, que ha sido fundamental para su éxito en la exploración espacial. Este diseño se basa en la idea de crear una plataforma estandarizada que permita la rápida construcción, integración y lanzamiento de pequeños satélites. A continuación, se exploran en detalle las características clave del diseño de los CubeSats:

2.1.1 Forma cúbica y dimensiones estandarizadas

Los CubeSats pueden tener varios tamaños, pero se caracterizan por su forma cúbica y todos se basan en la unidad estándar de CubeSat, que es una estructura en forma de cubo de 10x10x10 centímetros con una masa de aproximadamente de entre 1 y 1,33 kg [4]. Esta unidad es conocida como 1U. Por ejemplo, un CubeSat de 1U, tiene dimensiones de 10x10x10 cm, mientras que un CubeSat de 3U tendría 10x10x30 cm.

Esta forma y tamaño estándar son esenciales para garantizar la compatibilidad con los cohetes lanzadores y los dispensadores de carga útil. Los CubeSats deben cumplir rigurosamente con estas dimensiones para asegurar una correcta integración y despliegue.

2.1.2 Facilidad de integración

Debido a su diseño estandarizado y modular, los CubeSats permiten una integración más rápida y sencilla de componentes y sistemas. Esto reduce los tiempos de desarrollo y los costos asociados con la construcción de satélites tradicionales.

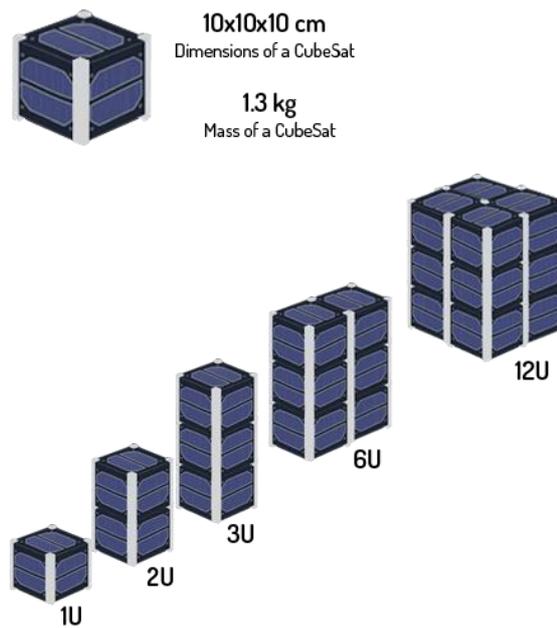


Figura 3. Configuraciones de tamaños de los CubeSats

2.1.3 Lanzamiento como carga secundaria

Una de las ventajas clave de los CubeSats es su capacidad para ser lanzados como cargas secundarias en cohetes espaciales más grandes. Esto permite aprovechar los lanzamientos principales para colocar varios CubeSats en órbita simultáneamente, reduciendo los costos de lanzamiento y maximizando la eficiencia de cada misión espacial.

2.1.4 Adaptabilidad y flexibilidad

El diseño modular permite la adaptabilidad de los CubeSats para diferentes tipos de misiones. Los científicos y diseñadores pueden personalizar o ajustar la carga útil y los sistemas según los objetivos específicos de la misión.

2.1.5 Limitaciones de espacio y energía

Si bien el diseño compacto es beneficioso en términos de accesibilidad y lanzamiento, también presenta desafíos en términos de espacio para componentes y sistemas, así como limitaciones de energía para operaciones a largo plazo.

2.1.6 Estructuras de cubierta

Además de los CubeSats de forma cúbica estándar, se han desarrollado variantes con formas alternativas, como esferas y prisma hexagonales. Estas estructuras de cubierta innovadoras amplían las posibilidades de diseño y la capacidad de alojar diferentes cargas útiles.

2.1.7 Estructura modular

El diseño modular de los CubeSats se basa en módulos estándar que se pueden apilar y conectar de manera eficiente. Cada módulo tiene una función específica, como la carga útil científica, la unidad de control, la fuente de energía, la comunicación y otros subsistemas. Este enfoque modular no solo facilita la integración y personalización, sino que también mejora la capacidad de mantenimiento y actualización de los componentes y sistemas del CubeSat.



Figura 4. Comparación entre un CubeSat de 1U y uno de 3U

2.2 Restricciones mecánicas

Las restricciones mecánicas son un conjunto de limitaciones y consideraciones fundamentales que influyen en el diseño, la construcción y la operación de los CubeSats. Estas restricciones están estrechamente relacionadas con la forma cúbica y las dimensiones estandarizadas de los CubeSats, así como con los requisitos de integración en cohetes lanzadores y la adaptación al entorno espacial. Las restricciones mecánicas son críticas para asegurar el éxito y la seguridad de la misión. A continuación, se exploran con más detalle las restricciones mecánicas en los CubeSats:

2.2.1 Tolerancias de fabricación precisas

Debido a las dimensiones exactas requeridas, las tolerancias de fabricación son fundamentales para la construcción de CubeSats. Incluso pequeñas desviaciones en las medidas pueden tener un impacto significativo en la integración con otros CubeSats, ya sea en una constelación o en un lanzador. La precisión en la fabricación es esencial para garantizar un ajuste perfecto y una correcta alineación.

2.2.2 Sistemas de fijación y montaje

Los CubeSats utilizan sistemas de montaje estandarizados, como guías de rieles y tuercas roscadas, para facilitar su integración en cohetes lanzadores y dispensadores de carga útil. Estos sistemas deben ser fiables y resistentes para garantizar que la estructura permanezca en su lugar durante el lanzamiento y se despliegue correctamente cuando llegue a la órbita. Las restricciones de montaje influyen en cómo se organizan y aseguran los componentes internos.

2.2.3 Estructura robusta

Dado que los CubeSats están sujetos a las fuerzas del lanzamiento y a las condiciones extremas del espacio, deben ser diseñados con estructuras resistentes capaces de soportar vibraciones, choques y cambios de temperatura. La estructura debe ser lo suficientemente fuerte para proteger los sistemas internos y evitar daños durante el lanzamiento.

2.2.4 Despliegue de paneles solares y antenas

Algunos CubeSats incorporan paneles solares y antenas que deben desplegarse una vez en órbita. El diseño de estos mecanismos de despliegue debe ser delicado para garantizar que no interfieran con otros CubeSats y que funcionen correctamente sin dañarse o atascarse.



Figura 5. Momento del despliegue de un CubeSat

2.2.5 Capacidad para adaptarse a dispensadores de carga útil

Los CubeSats deben adaptarse compatibles con los dispensadores de carga útil del cohete lanzador. Esto implica considerar la forma y el tamaño del dispensador, así como la mecánica de separación, para asegurar que el CubeSat se despliegue de manera adecuada y segura.

2.2.6 Protección de los componentes sensibles

Los componentes internos deben estar protegidos de los efectos mecánicos del lanzamiento y las vibraciones. Los mecanismos de sujeción y amortiguación se utilizan para prevenir daños a componentes sensibles, como sensores y dispositivos electrónicos [8].

En conclusión, las restricciones mecánicas en los CubeSats son esenciales para garantizar la compatibilidad con el lanzamiento, la correcta integración en el cohete lanzador y que su funcionamiento sea el deseado. El diseño y la construcción adecuados de la estructura y los sistemas de montaje son cruciales para superar estos desafíos y garantizar el éxito de la misión.

2.3 Restricciones de temperatura

Las restricciones de temperatura son un factor crítico en el diseño y operación exitosa de los CubeSats en el entorno espacial. Dado que estos nanosatélites están expuestos a una amplia gama de condiciones térmicas en el espacio, es esencial comprender y gestionar los efectos de la temperatura en los sistemas y componentes. Las restricciones de temperatura afectan tanto la selección de materiales como el diseño de sistemas de control térmico [9]. Para este estudio, se pueden considerar:

2.3.1 Desafíos de la temperatura

Un CubeSat se enfrenta a temperaturas extremas en el espacio, experimentando temperaturas muy bajas en la sombra y muy altas bajo la radiación solar directa. Estas transiciones entre zonas iluminadas por la luz solar y la sombra provocan cambios de temperatura rápidos, lo que puede afectar la estabilidad y el rendimiento de los sistemas. Las fluctuaciones de temperatura, además, pueden influir en la funcionalidad y la vida útil de componentes electrónicos, sensores, baterías y otros sistemas críticos, ya que los materiales tienden a expandirse y contraerse debido a estos efectos.

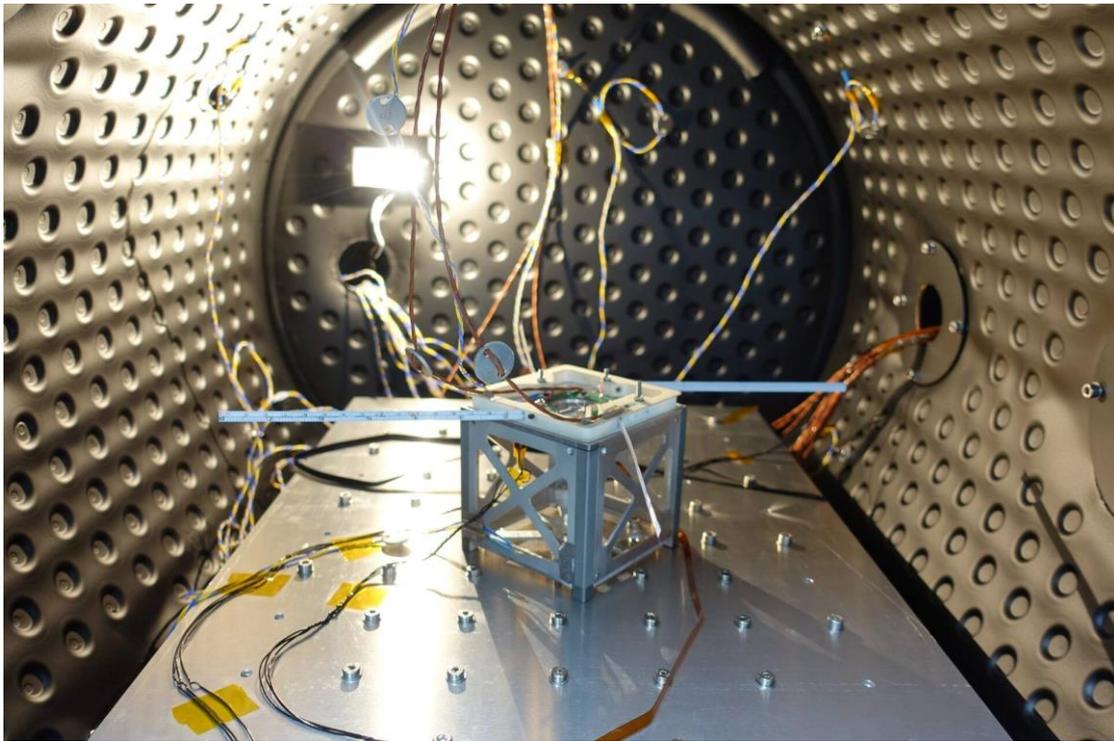


Figura 6. Test de temperatura a un CubeSat

2.3.2 Cómo debemos abordar estos retos

En los CubeSats se deben integrar sistemas de aislamiento térmico que minimicen la transferencia de calor entre sus partes internas y externas, mitigando así los efectos de las variaciones de temperatura. Además, algunos nanosatélites utilizan sistemas de control térmico, tanto activos como pasivos, para mantener las temperaturas dentro de rangos operativos seguros, los cuales pueden incluir dispositivos de calefacción o enfriamiento controlados electrónicamente. La selección de materiales para la fabricación de la placa y los componentes también es crucial, ya que deben tener propiedades térmicas adecuadas para resistir las variaciones de temperatura. Algunos materiales pueden absorber o reflejar la radiación solar para regular la temperatura interna. Otro aspecto crítico en el diseño de la placa es la disposición de los componentes dentro de ella. Separar los componentes más solicitados térmicamente o colocar los que generan calor en zonas aisladas puede ayudar a disipar el calor de manera eficiente. Por último, antes del lanzamiento, los CubeSats se someten a pruebas en condiciones similares a las del espacio para evaluar su reacción a las variaciones de temperatura y garantizar que funcionen según lo previsto, confirmando así si las consideraciones previas funcionan de forma satisfactoria.

Por tanto, las restricciones de temperatura en los CubeSats requieren un enfoque cuidadoso en el diseño y la operación. La gestión térmica adecuada es esencial para mantener el rendimiento y la integridad de los sistemas a lo largo de la misión espacial. Superar estos desafíos contribuye a garantizar que los CubeSats puedan operar con éxito y realizar sus objetivos científicos y tecnológicos en el espacio.

2.4 Restricciones de tamaño

Se consideran como restricciones de tamaño para una placa en un CubeSat, al conjunto de limitaciones y consideraciones específicas que se aplican al diseño y fabricación de las placas electrónicas que componen el nanosatélite. Estas restricciones son esenciales para garantizar que las placas se ajusten dentro del espacio disponible en el CubeSat y puedan operar de manera efectiva en el entorno espacial [10]. Específicamente, las restricciones de tamaño que afectan las placas de un CubeSat:

2.4.1 Dimensiones estandarizadas

Las placas electrónicas en un CubeSat deben ajustarse a las dimensiones estándar definidas para cada unidad cúbica (1U, 2U, 3U, etc.). Estas dimensiones son esenciales para asegurar que las placas puedan ser montadas y acomodadas adecuadamente dentro del CubeSat.

2.4.2 Tamaño de la placa base

Cada unidad cúbica (1U) tiene un área base de aproximadamente 10x10 cm. Las placas electrónicas deben ajustarse a este tamaño y suelen ser apiladas para conseguir la altura deseada del CubeSat (por ejemplo, 1U, 2U, 3U, etc.).

2.4.3 Espesor de la placa

El espesor de las placas o stack-up, como se explicará posteriormente, debe ser considerado cuidadosamente para evitar exceder el espacio disponible. Además, el espesor puede influir en la robustez de la placa y su capacidad para soportar vibraciones y cambios de temperatura.

2.4.4 Alojamiento de componentes

Las restricciones de tamaño afectan la disposición de componentes en la placa. Los componentes deben colocarse de manera eficiente para evitar interferencias y distribuciones homogéneas.

2.4.5 Espacio para conexiones

Las placas deben tener espacio suficiente para alojar conexiones como conectores, pines y soldaduras. Debemos asegurarnos de que haya suficiente espacio para realizar las conexiones que necesitamos.

En general, las restricciones de tamaño de una placa en un CubeSat son esenciales para lograr un diseño compacto, eficiente y funcional que cumpla con los requisitos operativos y científicos de la misión. Cada aspecto del diseño de la placa debe ser cuidadosamente planificado para garantizar su compatibilidad con el CubeSat en su conjunto y su capacidad para operar en el entorno espacial.

2.5 Restricciones respecto a las vibraciones

Para el diseño de una estructura nanosatélital, las vibraciones son un factor crucial que determina en gran medida su durabilidad. La estructura estará sometida constantemente a diferentes estados de carga desde el lanzamiento hasta su despliegue.

La carga útil, encerrada en el carenado del vehículo de lanzamiento, está directamente conectada a un anillo adaptador que realiza la conexión mecánica entre la carga útil y la estructura principal del lanzador. Este anillo adaptador transmite las vibraciones a la base de la carga útil, lo que puede ocasionar fallos estructurales en los nanosatélites (CubeSat) contenidos en ella.

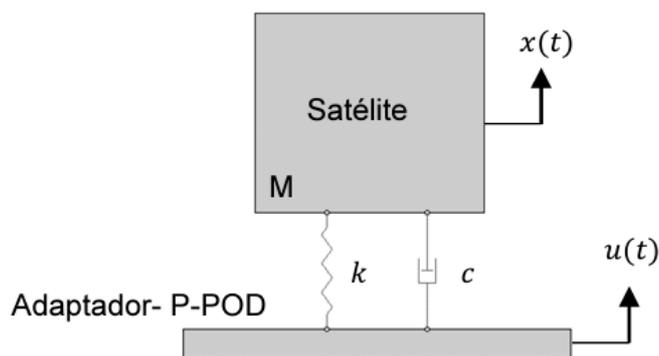


Figura 7. Aproximación de un sistema vibratorio

Este esquema representa un sistema en el que las vibraciones inducidas a una base se transmiten a un cuerpo de masa (M) mediante un resorte (k) y un amortiguador (c). Para este modelo, se deben considerar varios modos de vibración, que se detallan a continuación.

El primero son las vibraciones aleatorias, que ocurren cuando una vibración no puede describirse como periódica. En este caso, no hay un patrón para la frecuencia o la amplitud, y no se pueden aplicar los métodos tradicionales de análisis de movimiento periódico mediante armónicas. Durante la etapa de despegue, las corrientes de los gases de escape de los motores y los propulsores de combustible sólido producirán ondas sonoras que se propagarán a través de la estructura del vehículo de lanzamiento y el carenado.

La separación de las partes del vehículo de lanzamiento en diferentes etapas del vuelo induce cargas de muy corta duración en la estructura interna del satélite, conocidas como cargas de choque. La intensidad de estas cargas generalmente se representa en un espectro de respuesta de choque (SRS, Shock Response Spectrum). El SRS es esencialmente un gráfico que muestra la respuesta de varios sistemas de un solo grado de libertad. Las cargas de choque pueden especificarse mediante el correspondiente registro de la aceleración contra el tiempo o utilizando el espectro de respuesta de choque en el dominio de la frecuencia. Este tipo de vibraciones también debe estudiarse para definir las restricciones.

En general, las limitaciones relacionadas con las vibraciones en un CubeSat son críticas para garantizar su capacidad de resistir las fuerzas mecánicas y las vibraciones durante el lanzamiento y la operación en el espacio.

Es fundamental comprender y adaptarse al perfil de vibración específico de cada cohete utilizado para el lanzamiento del CubeSat. Cada cohete tiene un patrón particular de vibración que debe ser considerado en el diseño del CubeSat.

La elección de materiales resistentes a las vibraciones es esencial para asegurar que el CubeSat pueda absorber o disipar las vibraciones y mantener su integridad estructural. Una posible solución es incluir sistemas de amortiguación y aislamiento, que pueden ayudar a reducir las vibraciones transmitidas a los componentes. Implementar materiales amortiguadores y ensamblajes más resilientes puede ser efectivo en este aspecto.

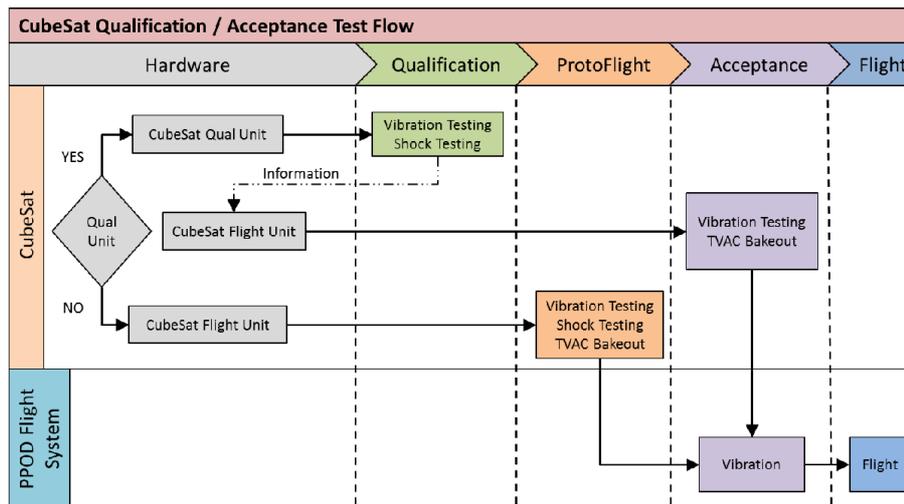


Figura 8. Flujo de pruebas/test de vibraciones que se realizan a un CubeSat

El diseño estructural del CubeSat debe considerar cuidadosamente la disposición de los componentes y su ubicación dentro de la estructura general. Los componentes deben montarse de manera segura para evitar desconexiones. Elementos sensibles como los paneles solares y las antenas deben diseñarse y ubicarse para soportar las fuerzas generadas durante el lanzamiento sin sufrir daños.

En conclusión, las restricciones relacionadas con las vibraciones en un CubeSat son esenciales para asegurar su éxito y funcionalidad en el entorno espacial. Un enfoque minucioso en el diseño estructural, la selección de materiales, la implementación de sistemas de amortiguación y aislamiento, así como pruebas exhaustivas de vibración, son factores cruciales para garantizar que el CubeSat pueda soportar las condiciones desafiantes durante el lanzamiento y la operación espacial.

2.6 Certificaciones y normas

A la hora de diseñar unas especificaciones para un CubeSat, se debe recalcar la importancia de seguir normas y obtener certificaciones que radican en garantizar su operación segura y confiable en el espacio, cumplir con regulaciones, facilitar la colaboración con otros CubeSats, asegurar calidad y rendimiento, minimizar riesgos, promover la cooperación internacional y fomentar el aprendizaje y la mejora continua en el diseño y la operación.

En nuestro caso, tomaremos como bases y normativas la certificación AS9100 y el IPC Clase 3. La certificación AS9100 es un estándar de gestión de calidad específicamente diseñado para la industria aeroespacial. Se basa en el estándar ISO 9001, pero agrega requisitos adicionales y específicos para garantizar la calidad, la seguridad y la confiabilidad en la fabricación y el mantenimiento de productos y servicios relacionados con la aviación, el espacio y la defensa [22]. Algunos aspectos clave de la certificación AS9100 incluyen:

- Enfoque en la calidad y la seguridad: AS9100 establece requisitos rigurosos para garantizar que los productos y servicios aeroespaciales sean seguros y cumplan con los más altos estándares de calidad.
- Cumplimiento normativo: Asegura que la organización cumple con todas las regulaciones y requisitos legales relevantes en la industria aeroespacial.
- Enfoque en la gestión de riesgos: AS9100 enfatiza la identificación y gestión de riesgos, especialmente en proyectos y procesos críticos.
- Reconocimiento global: La certificación AS9100 es reconocida internacionalmente y es esencial para muchas organizaciones que desean operar en la industria aeroespacial.

Por otro lado, Cuando se trata de la fabricación de electrónica, los PCB son una necesidad. En la producción electrónica, hay una separación de PCB en tres categorías principales. Eso es la categoría 1, 2 y 3. Estas categorías reflejan los niveles de calidad de cada placa de circuito. Estos niveles van desde los más bajos (estándares de clase 1) a los más altos (estándares de clase 3) [23].

El IPC supervisa todas estas clasificaciones bajo la norma IPC-6011. Por lo tanto, una clase IPC es la categorización estándar de PCB utilizada en productos electrónicos. El IPC Clase 3 es una clasificación de calidad utilizada en la fabricación de productos electrónicos, especialmente en la industria de la electrónica. Esta clasificación se centra en la calidad y la tolerancia de los componentes y los ensamblajes electrónicos y se utiliza en aplicaciones donde se requiere un alto grado de rendimiento y fiabilidad. Las características que definen los IPC Clase 3 son:

- Tolerancias estrechas: Los componentes y las conexiones deben estar dentro de tolerancias muy estrechas para garantizar un funcionamiento confiable.
- Durabilidad: Los productos deben ser capaces de resistir condiciones ambientales extremas y vibraciones.
- Fiabilidad a largo plazo: Se espera que los productos tengan una vida útil prolongada y un rendimiento constante.
- Alto rendimiento: Los productos deben funcionar a niveles de rendimiento muy altos.
- Aplicaciones críticas: IPC Clase 3 se utiliza en productos electrónicos destinados a aplicaciones críticas, como la industria aeroespacial, la militar y la médica, donde la precisión y la confiabilidad son cruciales.

A modo de resumen, la certificación AS9100 se enfoca en la gestión de calidad en la industria aeroespacial, mientras que el IPC Clase 3 se refiere a una clasificación de calidad utilizada en la fabricación de productos electrónicos, especialmente en aplicaciones críticas. Ambos están destinados a garantizar la calidad y la fiabilidad en sus respectivas industrias.

3 DEFINICIÓN DE LA CARGA ÚTIL

Cuando algo es lo suficientemente importante, lo haces incluso si las probabilidades no están a tu favor.

ELON MUSK

La carga útil de un CubeSat se refiere al conjunto de componentes específicos diseñados para las placas que contienen los componentes, sistemas y dispositivos electrónicos específicos que cumplen con los objetivos y funciones de la aplicación para la cual se está diseñando el PCB. En el contexto de los CubeSats y otros dispositivos espaciales, la carga útil se refiere a los sistemas y componentes electrónicos que tienen un propósito específico y son responsables de la recopilación de datos, el procesamiento de señales, las comunicaciones y otras tareas científicas, tecnológicas o de investigación.

El estudio de la carga de pago tiene como principal función la experimentación SEE, para la cual se hace uso de una memoria sensible a la radiación que sufre el nanosatélite en el entorno espacial. En este momento, cabe destacar la función “BigFlip” de la memoria SRAM, técnica utilizada para la detección y mitigación de los efectos causados por la radiación, tales como Single Event Effects (SEEs).

La carga útil para el CubeSat es la razón principal detrás de la creación del PCB, ya que representa la funcionalidad y el propósito central del dispositivo. La definición y el diseño de la carga útil involucran que se tengan en cuenta varios aspectos, tales como la selección de componentes, el diseño de los circuitos, las consideraciones ambientales y su integración en el CubeSat.

3.1 Descripción de la arquitectura del sistema

La tarjeta impresa diseñada para este proyecto integra varios componentes clave para cumplir con sus funciones específicas. Entre estos componentes se incluyen sensores de temperatura, una memoria RAM estática (SRAM), un microcontrolador y transceptores CAN.

Los sensores de temperatura equipados en la tarjeta, sirven para monitorear las condiciones ambientales a las que se somete el CubeSat en el entorno espacial. Estos sensores se distribuyen estratégicamente en el diseño de la placa para obtener mediciones precisas, es decir, se situarán distintas localizaciones para no dar información duplicada. En muchos casos, el rendimiento y la fiabilidad de los dispositivos electrónicos dependen de mantener ciertas temperaturas dentro de límites específicos. Por lo tanto, estos sensores de temperatura permitirán detectar tanto las variaciones de temperatura, como las zonas que más lo sufren, para así tomar medidas preventivas y evitar el sobrecalentamiento o el enfriamiento excesivo, lo que podría dañar los componentes electrónicos del sistema.

Se incorpora también una memoria SRAM en la tarjeta para almacenar datos temporales y variables del sistema. En el contexto de una tarjeta impresa, la SRAM puede utilizarse para almacenar datos recopilados por los sensores antes de que sean procesados por el microcontrolador. Esto permite una gestión más eficiente de los datos y proporciona una forma rápida de acceder a la información necesaria para las operaciones del

sistema.

El microcontrolador seleccionado controla y gestiona el funcionamiento de los sensores y otros dispositivos conectados. Actúa como el cerebro del sistema, ejecutando las instrucciones necesarias para recopilar datos y tomar decisiones.

La tarjeta cuenta con transceptores CAN para la comunicación con otros dispositivos a través del bus CAN. Estos componentes facilitan la transferencia de datos entre los componentes, la tarjeta y otros sistemas conectados.

Los diferentes componentes de hardware están interconectados entre sí para facilitar la comunicación y el intercambio de datos. El microcontrolador actúa como el punto central de control, coordinando las operaciones de los sensores y gestionando la comunicación a través de los transceptores CAN.

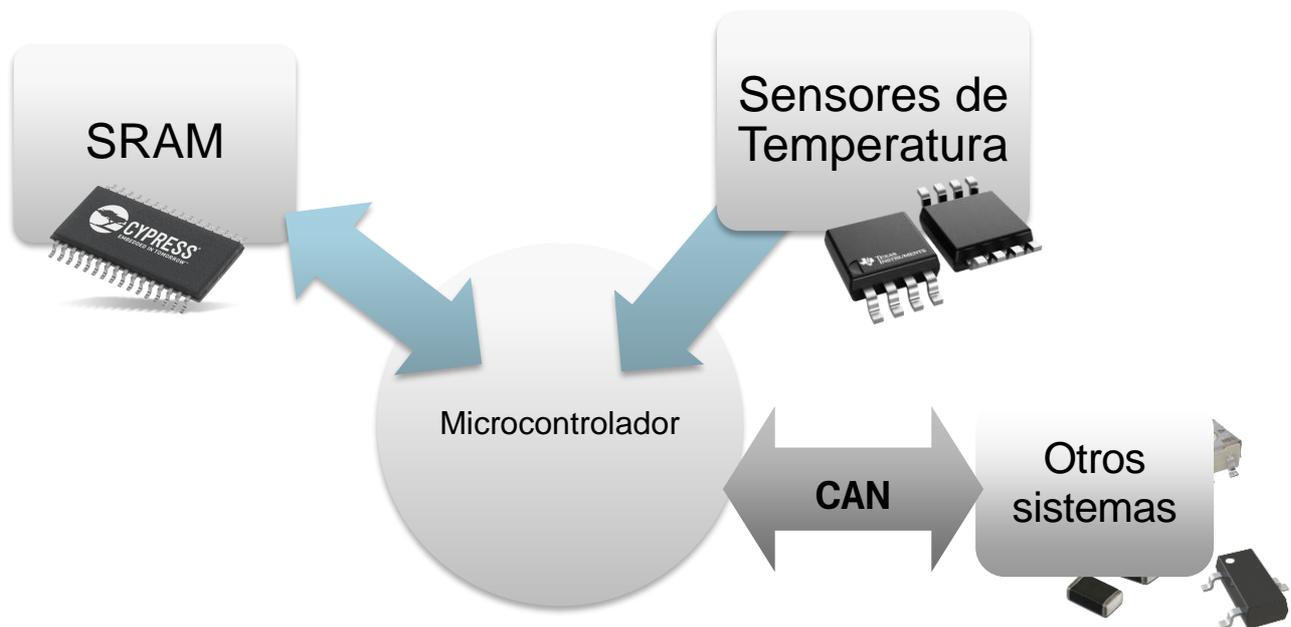


Figura 9. Diagrama de bloques de la estructura del sistema

Este enfoque de arquitectura del sistema permite una integración efectiva de los componentes para lograr las funciones deseadas y cumplir con los objetivos del proyecto.

Al microcontrolador se le puede considerar como el cerebro del sistema y desempeña un papel central en el control y la gestión de los diferentes componentes de hardware. Supervisa y coordina las operaciones de los sensores, procesa los datos recopilados y toma decisiones en función de los resultados. Además, el microcontrolador puede gestionar la comunicación con otros dispositivos externos a través de los transceptores CAN, lo que permite la interacción con sistemas externos y la transmisión de datos. Por su parte, los transceptores CAN son necesarios para la comunicación con otros dispositivos a través del mismo bus. Este bus de comunicación es comúnmente utilizado en aplicaciones industriales y automotrices debido a su fiabilidad y capacidad para transmitir datos a largas distancias. En el contexto de la tarjeta impresa, los transceptores CAN facilitan la comunicación con otros sistemas conectados, lo que permite compartir datos y coordinar acciones entre diferentes partes del sistema.

Cada componente escogido cumple una función específica y esencial en el desarrollo y funcionamiento de la tarjeta impresa. Desde monitorear las condiciones ambientales a las que se someterá el satélite, hasta procesar datos y facilitar la transmisión, estos componentes trabajan en conjunto para lograr garantizar un rendimiento óptimo del sistema.

3.2 Selección de componentes

La selección de los componentes para un CubeSat es un proceso crucial en el diseño y construcción de estos nanosatélites. La elección de los elementos electrónicos adecuados es fundamental para garantizar el rendimiento, la fiabilidad y el éxito de la misión espacial. Este proceso implica una cuidadosa evaluación de las necesidades de la misión y la selección de componentes que se ajusten a los objetivos específicos.

En primer lugar, es esencial definir claramente los objetivos de la misión y los requisitos técnicos que se deben cumplir. Esto ayuda a determinar los tipos de sistemas y funciones que requerirá la carga útil del CubeSat. Una vez que se comprenden los requisitos, se procede a seleccionar los componentes que mejor se adapten a estas necesidades.

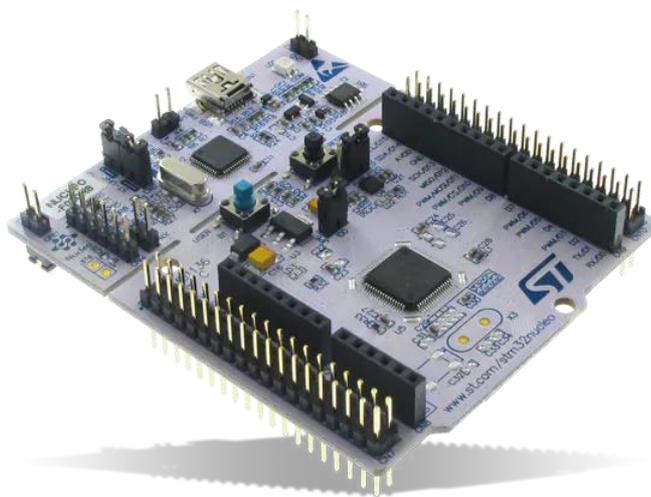


Figura 10. Placa con los componentes montados

La elección de componentes implica consideraciones técnicas y de rendimiento. Se deben evaluar factores como la capacidad de procesamiento, la precisión de los sensores, la eficiencia energética y la capacidad de comunicación. Además, se deben considerar aspectos ambientales, como la radiación y las variaciones de temperatura en el espacio, para elegir componentes que sean capaces de soportar estas condiciones extremas.

La disponibilidad y la confiabilidad de los componentes también son factores críticos. Se debe considerar la disponibilidad a largo plazo de los componentes, ya que la vida útil de un CubeSat puede ser prolongada. Además, es esencial elegir componentes de proveedores confiables que cumplan con estándares de calidad y hayan sido probados en condiciones similares a las del espacio.

El proceso de selección también involucra el equilibrio entre el rendimiento y el consumo de energía. Los componentes de alta gama pueden ofrecer un mejor rendimiento, pero también pueden requerir más energía, lo que puede afectar la duración de la misión debido a la limitada capacidad de las baterías.

En resumen, la elección de los componentes para un CubeSat es una tarea minuciosa que involucra evaluar cuidadosamente las necesidades de la misión, considerar aspectos técnicos y ambientales, y seleccionar componentes confiables y compatibles. Esta selección estratégica garantiza que el CubeSat esté equipado con los elementos necesarios para cumplir con sus objetivos en el entorno desafiante del espacio.

3.2.1 Microcontrolador – STM32L496

Como elemento central de nuestro sistema se ha optado por escoger la opción más adecuada debido a las características solicitadas, el microcontrolador STM32L496Zx, el cual ofrece una combinación acertada de eficiencia energética, potencia de procesamiento y capacidad de memoria. El microcontrolador STM32L496Zx es un dispositivo de la familia STM32 de STMicroelectronics, diseñado para aplicaciones de bajo consumo y alto rendimiento.

El STM32L496Zx es un microcontrolador de 32 bits basado en el núcleo Arm® Cortex®-M4. Ofrece un equilibrio entre el consumo de energía eficiente y el rendimiento gracias a su núcleo Cortex-M4 que opera a una frecuencia de hasta 80 MHz. Esto lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones, desde dispositivos portátiles hasta sistemas embebidos de alto rendimiento.

Una de las características destacadas del STM32L496Zx es su enfoque en la eficiencia energética. Ofrece varios mecanismos para optimizar el consumo de energía, lo que lo hace ideal para aplicaciones que requieren una larga duración de la batería, como es nuestro caso. Además, soporta múltiples modos de bajo consumo que permiten ajustar el consumo de energía según los requisitos de la aplicación.

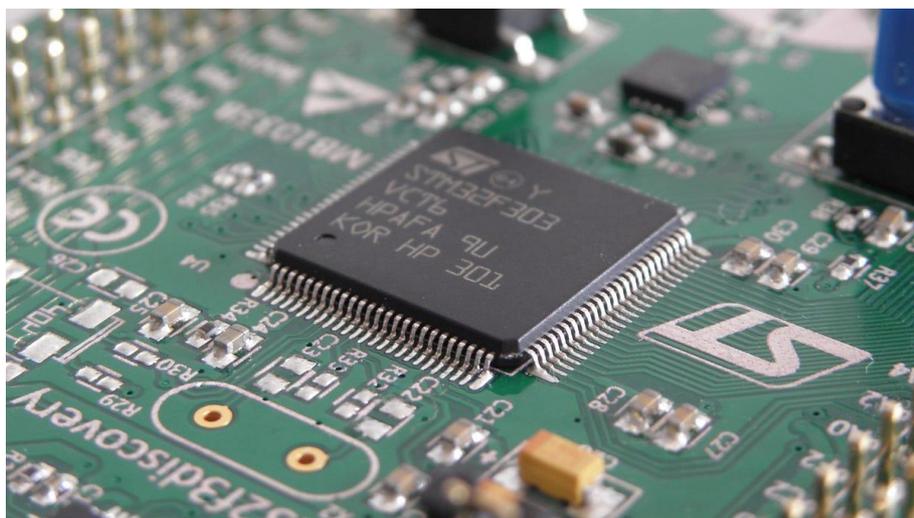


Figura 11. Microcontrolador de la familia STM32

El dispositivo incorpora una variedad de recursos y periféricos, incluyendo:

- Memoria flash de hasta 1 Mbyte y SRAM de hasta 320 Kbyte.
- Controlador LCD integrado con opciones de visualización.
- Convertidores analógico-digiales (ADC) de hasta 12 bits y alta velocidad.
- Interfaces de comunicación estándar y avanzadas como I²C, SPI, USART, UART, USB, CAN, SAI, SDMMC, y más.
- Temporizadores y comparadores para tareas de control y temporización.
- Funciones de seguridad como protección de lectura y escritura de memoria, y Firewall para protección adicional.

El STM32L496Zx opera en rangos de temperatura de -40°C a +85°C (+105 °C en la unión) y de -40°C a +125°C (+130 °C en la unión), con un suministro de energía VDD de 1.71V a 3.6V cuando se utiliza el regulador de voltaje interno y un suministro de energía VDD12 de 1.05V a 1.32V cuando se utiliza un suministro externo SMPS.

Además, el STM32L496Zx es compatible con varios modos de reloj y voltaje, lo que permite adaptarse a diferentes condiciones de funcionamiento. También es compatible con capacidades de detección capacitiva para aplicaciones táctiles o de botones sensibles al tacto [12].

Por tanto, el microcontrolador STM32L496Zx es una poderosa solución que combina alto rendimiento con eficiencia energética y una amplia gama de características y periféricos, lo que lo convierte en una opción versátil para diversas aplicaciones.

3.2.2 Controller area network (CAN) - SN65HVD230

El SN65HVD230 es un transceptor de bus diferencial diseñado para aplicaciones de comunicación de alta velocidad y largo alcance utilizando la topología de bus diferencial. Este componente está fabricado por Texas Instruments y es parte de la familia de dispositivos de la serie SN65HVD2xx, que se utilizan comúnmente en sistemas de comunicación industrial y automotriz.

Estos transceptores están diseñados para operar en entornos especialmente difíciles, ya que cuentan con protección contra inversión de cables, pérdida de tierra, sobretensión y sobre temperatura, así como un amplio rango de modo común de operación.

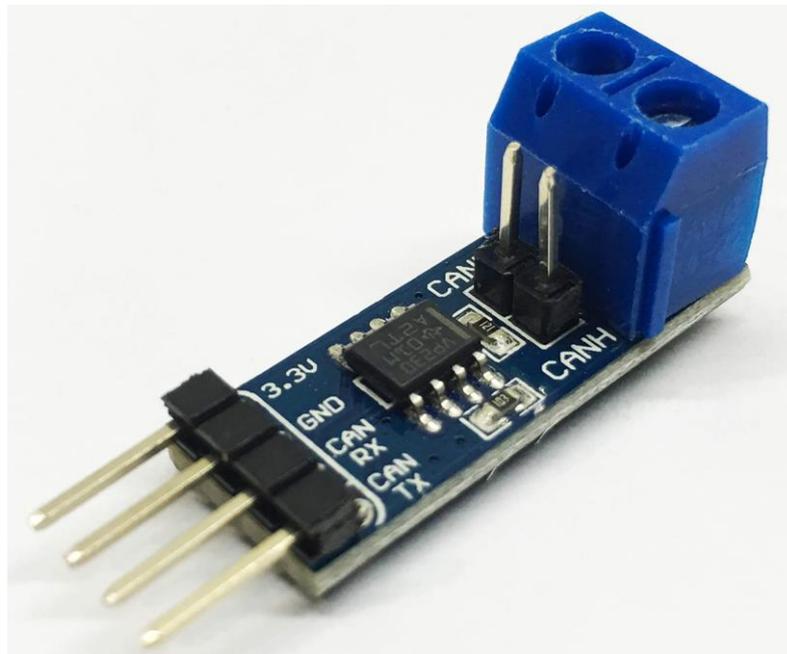


Figura 12. Transceptor CAN integrado SN65HVD230

Lo podemos encontrar en aplicaciones industriales, de automatización de edificios y automotrices [13]. Estos dispositivos operan en un rango de modo común en el bus de -2V a 7V, y pueden soportar transitorios de modo común de $\pm 25V$.

Se pueden destacar las siguientes características y especificaciones del SN65HVD230:

- Interfaz diferencial RS-485: El dispositivo cumple con el estándar RS-485, que define una comunicación diferencial bidireccional entre varios dispositivos en un bus. Esta comunicación diferencial reduce la susceptibilidad al ruido y permite la transmisión de datos a distancias más largas en comparación con las interfaces de un solo cable.
- Alta velocidad de transmisión: El SN65HVD230 admite tasas de transmisión de datos de hasta 20 Mbps, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren comunicación rápida y eficiente.
- Protección de sobretensión y cortocircuito: El dispositivo incluye protección contra sobretensiones transitorias y protección contra cortocircuitos en las líneas de transmisión, lo que mejora la durabilidad y la confiabilidad en entornos difíciles.
- Control de modo de baja potencia: El transceptor puede colocarse en un modo de espera de baja corriente (solo escucha) durante el cual el controlador se apaga y el receptor permanece activo si se aplica un nivel lógico alto al pin RS. Este modo proporciona un consumo de energía más bajo que el modo normal, pero aún permite que el controlador CAN monitoree el bus en busca de actividad, indicando que debe volver a poner el transceptor en modo normal o en modo de control de pendiente. El controlador principal (MCU, DSP) devuelve el dispositivo a un modo de transmisión (alta

velocidad o control de pendiente) cuando desea transmitir un mensaje al bus o, si durante el modo de espera, recibe tráfico del bus indicando la necesidad de estar nuevamente listo para transmitir.

- Fuente de alimentación amplia: El SN65HVD230 generalmente opera con una amplia gama de tensiones de alimentación, lo que facilita su integración en diferentes sistemas.
- Conexiones de bus: El dispositivo cuenta con pines de entrada y salida diferencial para transmitir y recibir datos, así como pines adicionales para la detección de sobretensión y otras funciones.

En general, el SN65HVD230 es un transceptor diferencial RS-485 que permite la comunicación confiable y rápida en aplicaciones industriales y automotrices. Su capacidad para resistir el ruido y su protección contra sobretensiones lo hacen adecuado para entornos desafiantes donde se requiere una comunicación robusta. Para obtener detalles técnicos precisos, es importante consultar la hoja de datos y la documentación proporcionada por el fabricante.

3.2.3 Static RAM (SRAM) - CY62157EV30

La función clave de nuestro estudio recae sobre la implementación de una memoria sensible a radiación que nos permita entender cómo las partículas cargadas pueden afectar al funcionamiento de los dispositivos electrónicos. La memoria escogida en este caso ha sido el modelo CY62157EV30, un tipo de memoria estática de acceso aleatorio fabricada por Cypress Semiconductor, que ahora es parte de Infineon Technologies. Esta memoria pertenece a la familia de dispositivos MoBL® (More Battery Life), que están diseñados para ofrecer un bajo consumo de energía, lo que es especialmente útil en dispositivos alimentados por baterías y sistemas móviles.

Podemos destacar las siguientes características de la memoria RAM CY62157EV30:

- Tipo de memoria: La CY62157EV30 es una memoria RAM estática (SRAM) de baja potencia. A diferencia de las memorias dinámicas (DRAM), las SRAM no requieren refrescamiento periódico, lo que las hace más rápidas y adecuadas para aplicaciones donde se necesita un acceso rápido a los datos.
- Capacidad de almacenamiento: La capacidad de almacenamiento de la CY62157EV30 es de 2 megabits (Mb), que equivale a aproximadamente 256 kilobytes (KB) de datos.
- Interfaz de datos: Esta memoria SRAM utiliza una interfaz de datos paralela, lo que significa que los datos se transmiten y se almacenan en grupos de bits simultáneamente.
- Bajo consumo de energía: La serie MoBL® de Cypress está diseñada para reducir el consumo de energía, lo que es especialmente importante en dispositivos móviles y batería-operados. Estos dispositivos tienden a entrar en modos de baja potencia para extender la vida útil de la batería.
- Velocidad de acceso rápida: Las SRAM son conocidas por su velocidad de acceso rápido en comparación con las memorias dinámicas (DRAM). Esto las hace adecuadas para aplicaciones donde se necesita un acceso rápido a los datos.
- Tensión de alimentación baja: La memoria CY62157EV30 generalmente opera con tensiones de alimentación de 1.8 V a 3.6 V, lo que contribuye a su eficiencia energética y a su uso en sistemas de bajo consumo de energía.
- Formato de encapsulado: La memoria suele estar disponible en varios formatos de encapsulado, como TSOP (Thin Small Outline Package) y BGA (Ball Grid Array), lo que facilita su montaje en placas de circuito impreso.

La implementación de esta memoria es esencial para comprender los impactos causados por la radiación en los componentes electrónicos. Aquí debemos introducir el concepto de Single Event Effect (SEE). Un SE en general es una perturbación o fallo que ocurre en dispositivos electrónicos cuando son impactados por partículas cargadas de alta energía, como ocurre en el entorno espacial. Estas partículas pueden provenir de rayos cósmicos, radiación solar o incluso fuentes terrestres en entornos de alta radiación.

Cuando una partícula cargada choca con un componente electrónico, puede depositar energía suficiente para alterar el funcionamiento del dispositivo. Indagando más en este tipo de efectos, un SEE es un tipo específico de perturbación temporal en un dispositivo electrónico, causada por la interacción de una partícula cargada. A diferencia de otros efectos que pueden causar cambios permanentes o daños físicos en los componentes, un SEE es transitorio y se manifiesta como un pulso momentáneo de corriente o voltaje que altera temporalmente el funcionamiento del circuito.

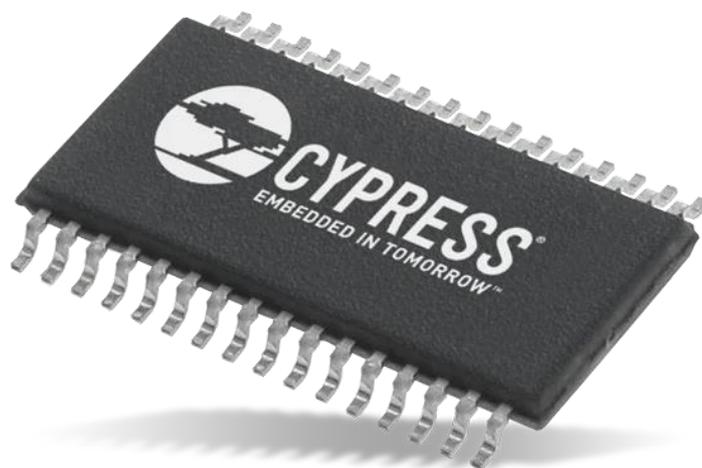


Figura 13. Ejemplo de una Static RAM

Para mitigar los efectos de los SEE, se emplean diversas técnicas de diseño. Estas pueden incluir la implementación de redundancia, filtros para suavizar los picos de corriente, y de esta forma corregir errores transitorios antes de que afecten al funcionamiento del sistema. Es por ello clave la elección de la memoria RAM CY62157EV30, la cual se utiliza en una variedad de aplicaciones donde se necesita una memoria de acceso rápido y eficiente [14].

3.2.4 Sensor de Temperatura - LM75

El LM75 es un sensor de temperatura digital de alta precisión fabricado por Texas Instruments. Diseñado para medir la temperatura ambiente con exactitud, este dispositivo se comunica a través de una interfaz digital I²C, lo que lo hace ampliamente compatible con una variedad de microcontroladores y sistemas embebidos.



Figura 14. Sensor de temperatura LM75 de interfaz I²C

El LM75 es una solución eficiente y versátil para la monitorización de la temperatura en aplicaciones electrónicas y sistemas de control. Entre sus principales características se incluyen:

- Interfaz I²C: El LM75 utiliza el protocolo de comunicación I²C (Inter-Integrated Circuit) para transmitir los datos de temperatura. Esto permite una fácil integración con otros dispositivos y microcontroladores que también admitan I²C.
- Resolución de 9 bits: El sensor ofrece una resolución de 9 bits para la medición de temperatura, lo que significa que puede detectar cambios sutiles en la temperatura y proporcionar mediciones precisas.
- Rango de temperatura amplio: El LM75 puede operar en un amplio rango de temperaturas, generalmente desde -55°C hasta +125°C, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en una amplia gama de entornos.
- Alarma de temperatura: El sensor puede configurarse con límites de temperatura alta y baja. Cuando la temperatura medida cruza estos límites, se puede activar una alarma a través de la línea de salida dedicada, lo que es útil para sistemas de control y monitoreo.
- Bajo consumo de energía: El LM75 es eficiente en términos de consumo de energía, lo que es especialmente importante en dispositivos alimentados por baterías o en aplicaciones de baja potencia.
- Tensión de alimentación: El sensor funciona típicamente con tensiones de alimentación de 3.3 V o 5 V, lo que lo hace compatible con una variedad de entornos y sistemas.
- Formato compacto: El LM75 suele estar disponible en encapsulados compactos y fáciles de montar, lo que facilita su integración en placas de circuito y sistemas electrónicos [15].

El sensor LM75 es una herramienta confiable y precisa para medir la temperatura en aplicaciones electrónicas. Su capacidad de comunicación a través de I²C, su rango de temperatura amplio y sus características de alarma lo hacen adecuado para diversas aplicaciones, como sistemas de climatización, control de temperatura en equipos electrónicos y sistemas de monitoreo térmico, como es nuestro caso, en el cual se pretende controlar las variaciones de temperaturas a las que se someterá la placa, evitando así sobrecalentamientos no deseados.

4 DISEÑO DEL PCB

La exploración espacial es un viaje sin fin hacia lo desconocido, una búsqueda perpetua de respuestas a preguntas sin fin.

NEIL ARMSTRONG

En este capítulo se van a desarrollar los procesos de estudio y diseño del PCB de la carga útil del satélite. Este PCB formará parte de un conjunto de los mismos, los cuales se utilizan en configuración apilada y suelen integrar componentes del sistema o subsistemas completos de sensores y actuadores de mayor tamaño. Cabe tener en cuenta que todo este proceso debe ir acorde a las normativas impuestas. Definir estas normas garantiza un diseño coherente y modular, así como un modelo a seguir para los CubeSat que requieran trabajar sobre estas especificaciones.

Gran parte de esta especificación que se va a implantar está inspirada en el diseño típico de las placas CubeSat, las cuales, nunca están del todo definidas. Esto es bastante paradójico porque el éxito del programa CubeSat se debe claramente a su factor de forma estandarizado. Los PCBs nunca fueron especificados por el programa CubeSat ya que cada CubeSat se diseña para llevar a cabo una misión determinada, y debe ser capaz de cumplir unos objetivos, lo que hace que cada PCB sea creado acorde a sus requisitos.

4.1 Consideraciones iniciales

Para comenzar, una vez seleccionados los componentes previamente descritos en el capítulo anterior, se realizó un esquema en papel, a modo de simulación. Esto sirve de gran ayuda tanto para la selección como para la localización de los componentes que posteriormente se implementarán en el programa.

En dicho esquema se pueden apreciar:

- Microcontrolador
- Dos transceptores CAN
- Sensor de temperatura
- SRAM
- Dos conectores de pines

Esto nos servirá como primera aproximación para el posicionamiento de los componentes, a raíz de esto, se plantea una hoja de cálculo de la que nos ayudaremos para seleccionar los puertos del microcontrolador de los cuales haremos uso.

Para este trabajo, se plantea la creación de una librería que contenga todos los esquemáticos de cada uno de los componentes, así como su respectiva librería de huellas. Una vez tengamos para componente sus respectivos esquemáticos y huellas, se deben compilar en una librería integrada (Integrated Library). Unificar las librerías en una integrada, aparate de reunir y organizar todos los componentes electrónicos en una única ubicación, nos permite mantener los símbolos y huellas siempre sincronizados.

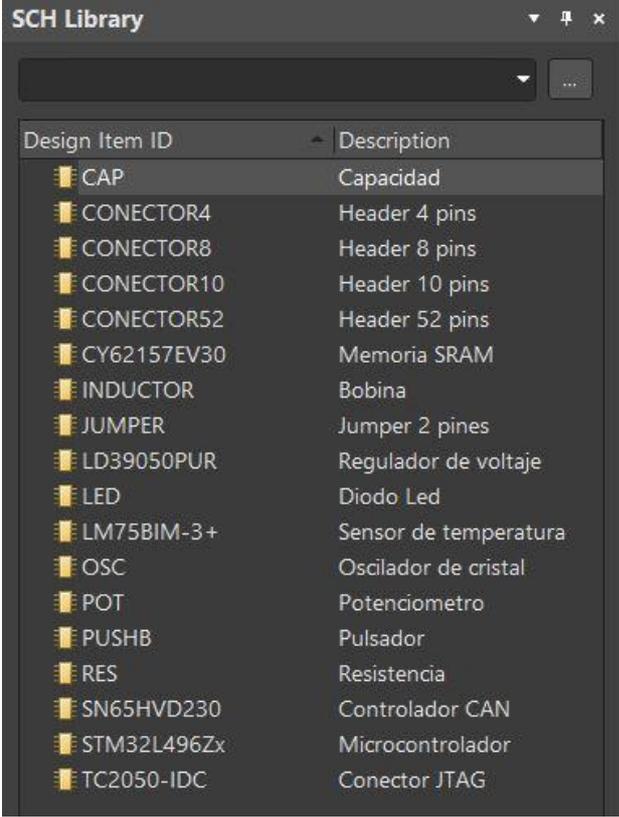
Por ello, esto es esencial para gestionar las librerías y es, por tanto, que se hace especial hincapié desde un primer momento en la creación y mantenimiento de una biblioteca de componentes ordenada y correcta para mejorar la eficiencia, la consistencia y la calidad de los diseños electrónicos. Esta iniciativa no solo agiliza el proceso de desarrollo, sino que aporta comodidad a la hora de trabajar en el montaje de los componentes.

4.2.1 Librería de símbolos

La biblioteca de esquemáticos proporciona una representación visual clara de los componentes electrónicos utilizados en el proyecto. Cada componente en esta librería está asociado con un símbolo gráfico que representa su función y conexión en un esquemático. Estos símbolos están diseñados con conexiones eléctricas específicas que representan los pines del componente real. Esto facilita la conexión de los componentes en el esquemático y asegura que las conexiones eléctricas se realicen correctamente, lo que es esencial para el funcionamiento adecuado del diseño.

Gracias a esto, definiremos también una descripción detallada de cada componente que nos reúna los datos más útiles de los mismos. De esta forma, de un primer vistazo tendremos a nuestra disposición toda la información de los elementos. En resumen, pulsando sobre cualquiera de los esquemáticos de nuestros componentes, podremos ver datos como el fabricante, el proveedor, su part number, datasheet, el tipo de ensamblado que conlleva, etc.

Para nuestro proyecto, una vez seleccionados los componentes que se van a utilizar, con la ayuda del datasheet de cada componente y sus propiedades, la librería de símbolos nos queda de la siguiente forma:



Design Item ID	Description
CAP	Capacidad
CONECTOR4	Header 4 pins
CONECTOR8	Header 8 pins
CONECTOR10	Header 10 pins
CONECTOR52	Header 52 pins
CY62157EV30	Memoria SRAM
INDUCTOR	Bobina
JUMPER	Jumper 2 pines
LD39050PUR	Regulador de voltaje
LED	Diodo Led
LM75BIM-3+	Sensor de temperatura
OSC	Oscilador de cristal
POT	Potenciometro
PUSHB	Pulsador
RES	Resistencia
SN65HVD230	Controlador CAN
STM32L496Zx	Microcontrolador
TC2050-IDC	Conector JTAG

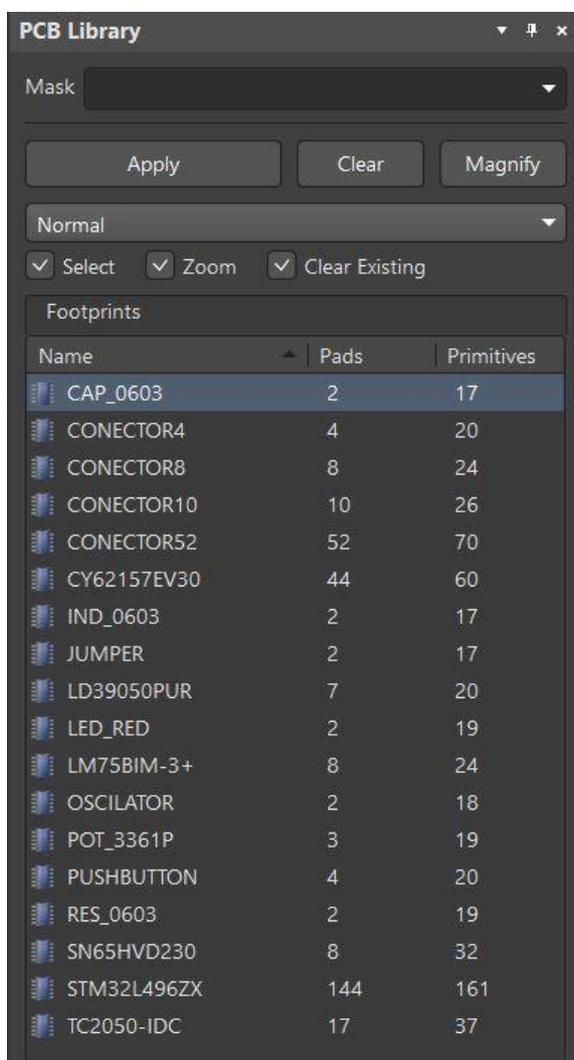
Figura 16. Librería de símbolos

Adquiere esto gran importancia por servir como base de la que parte su integración con otros procesos del trabajo, como la librería de huellas y la lista de materiales (BOM). Se facilita la sincronización y la consistencia entre todas las etapas del diseño, contribuyendo a una gestión más eficiente y efectiva del proyecto como se verá en los siguientes apartados.

4.2.2 Librería de huellas

La librería de huellas se puede asemejar a colección de plantillas para los componentes que utilizamos en nuestro PCB. Estas "plantillas" son representaciones gráficas que muestran cómo deben colocarse los componentes en la placa y su manifestación física. Simplifica mucho el proceso a la hora de trabajar, ya que proporciona opciones predefinidas para los componentes más comunes.

Se debe asignar a cada componente su respectiva huella tal y como se nos muestra en el datasheet. Es por ello, que una vez se generen, hay que asociarle a cada símbolo su huella. Así obtendremos el componente completamente creado. Nuestra librería de huellas queda de la siguiente forma:



The screenshot shows a software window titled "PCB Library". At the top, there is a "Mask" dropdown menu. Below it are three buttons: "Apply", "Clear", and "Magnify". A "Normal" dropdown menu is also present. Underneath are three checked checkboxes: "Select", "Zoom", and "Clear Existing". The main area is a table titled "Footprints" with three columns: "Name", "Pads", and "Primitives". The table lists various component footprints with their respective pad and primitive counts.

Name	Pads	Primitives
CAP_0603	2	17
CONECTOR4	4	20
CONECTOR8	8	24
CONECTOR10	10	26
CONECTOR52	52	70
CY62157EV30	44	60
IND_0603	2	17
JUMPER	2	17
LD39050PUR	7	20
LED_RED	2	19
LM75BIM-3+	8	24
OSCILATOR	2	18
POT_3361P	3	19
PUSHBUTTON	4	20
RES_0603	2	19
SN65HVD230	8	32
STM32L496ZX	144	161
TC2050-IDC	17	37

Figura 17. Librería de huellas

Lo importante de esto, es que aparte de facilitarnos el posterior montaje de la placa, con la opción de validar y detectar errores que se hayan cometido durante el proceso. Además, al tener opciones predefinidas, nos ayuda a mantenernos consistentes en nuestros diseños.

Para la creación de las huellas se utilizan unas capas cuya función principal es la separación de funciones, ya que cada capa puede estar destinada a desempeñar una tarea específica, como enrutamiento de señales, suministro de energía, plano de tierra, o detalles mecánicos. Esta separación permite organizar el diseño de manera más eficiente, optimizando así el espacio disponible en la placa y mejorando la integridad de la señal. Además, contribuye a reducir interferencias entre señales eléctricas, lo que puede resultar en una mayor calidad de la señal y una disminución del ruido electromagnético.

Al utilizarse capas internas para conectar componentes, se evita interferir con las conexiones en las capas exteriores, lo que simplifica el diseño de PCB más densos y complejos. Esto, a su vez, permite una mejor optimización del rendimiento eléctrico de la PCB al reducir la impedancia de la señal y mejorar su integridad. Además, las capas mecánicas juegan un papel crucial al incluir detalles como contornos de la placa, dimensiones externas y orificios de montaje. Para nuestro caso, trabajaremos sobre las siguientes capas:

- Top Layer (color rojo): la capa superior es la capa principal en la que se colocan la mayoría de los componentes y rutas conductoras en una PCB. Esta capa representa la parte superior de la placa y se utiliza para enrutamiento de pistas y colocación de componentes.
- Bottom Layer (color azul): la capa inferior es la opuesta de la capa superior y representa la parte inferior de la PCB. Se utiliza también para enrutamiento de pistas y colocación de componentes en la cara inferior de la placa.

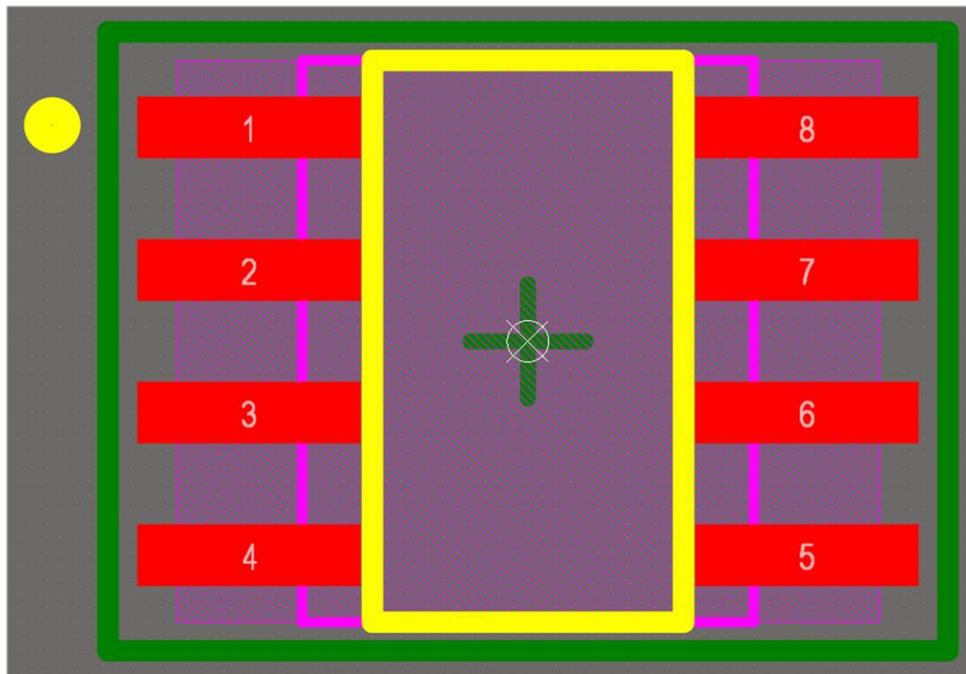


Figura 18. Capas de una huella

- Mechanical 1 (color rosa): esta capa se utiliza para detalles mecánicos adicionales en el diseño de PCB. Puede ser utilizada para diferentes casos pero, en nuestro proyecto se utilizará para señalar el “cuerpo” del componente.
- Mechanical 13 (zona rayada morada): esta capa específica puede utilizarse para fines personalizados o específicos del diseño, para nuestras huellas representará el 3D del componente en sí.
- Mechanical 15 (color verde): esta capa puede ser utilizada para una variedad de propósitos, como dimensionamiento adicional, detalles de montaje o cualquier otra información mecánica necesaria

para el diseño de la placa. Se ha considerado que esta capa recoja aproximadamente el tamaño que ocupará el componente en la placa y, adicionalmente, señalará el centro geométrico de dicho elemento.

- Top Overlay (color amarillo): es una de las capas de serigrafía y se utiliza para incluir información visual adicional en la parte superior de la PCB. En esta capa se pueden agregar nombres de componentes, valores, referencias, logotipos o cualquier otra información útil para la identificación de los componentes en la placa. En el caso mostrado, lo que se imprimirá en la placa es la zona señalada por el top overlay y un punto que señale el pin 1 del componente.



Figura 19. Leyenda de colores de las capas de una huella

4.3 Diseño de esquemáticos

Para el siguiente paso, se crearán los esquemáticos que nos servirán de ayuda para las uniones y el montaje de los componentes entre sí sobre la placa del PCB.

En nuestro caso, se ha optado por tomar una estructura jerárquica para organizar los esquemáticos de forma que se simplifique la división de los componentes en diferentes esquemáticos. Exactamente, se tomará un esquemático nombrado como “00_top”, del cual colgarán los demás componentes. Este, recogerá los “Sheet Symbols” de los elementos que forman el PCB. Cada “Sheet Symbol” está formado por un cuadro rectangular que representa el componente, al que se añadirán también los puertos que conectan las interacciones entre todos ellos.

La nomenclatura escogida para cada una de las capas que formarán el esquemático de nuestro PCB seguirá una numeración para cada uno de los esquemáticos, facilitando así su implementación en el “00_top”. Es importante seguir esta regla para que, al nombrarlos de la misma forma dentro del “00_top”, se escalonen en de la forma que buscamos en el proyecto. Tal y como se puede observar en la siguiente figura:

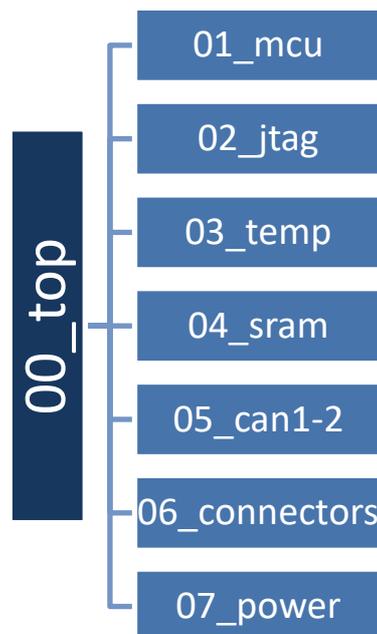


Figura 20. Nomenclaturas escogidas para los esquemáticos

4.3.1 Esquemático “Top”

Sobre la creación del siguiente diagrama, debemos tener en cuenta que en él no usaremos los componentes que hemos creado previamente, mas bien, estará formado por figuras de forma cuadrada que representaran a los mismos.

Plasmaremos sobre él siete “Sheet symbols”, más específicamente, uno para el Microcontrolador (01_mcu), uno para el conector JTAG (02_jtag), uno para el sensor de temperatura (03_temp), uno para la static RAM (04_sram), uno para los dos transceptores CAN (05_can1-2), uno que reúne el resto de conectores (06_connectors) y otro para la unidad de potencia (07_power).

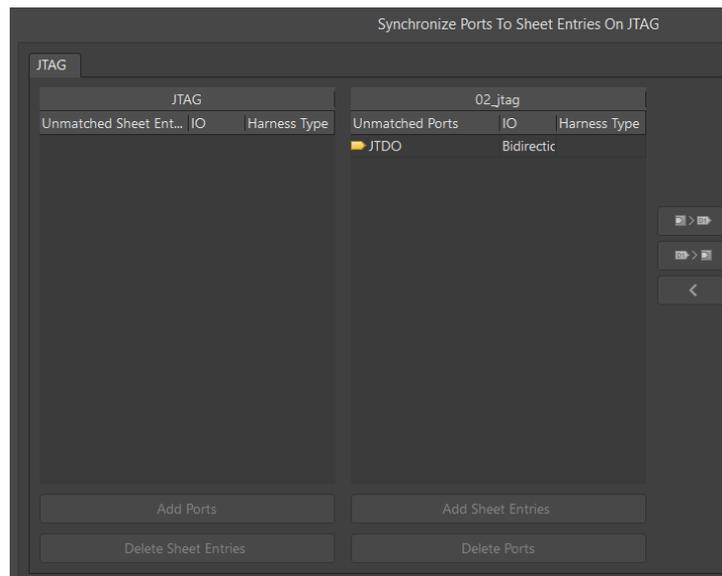


Figura 21. Sincronización de puertos

Una vez creados, se deben ir completando los diagramas esquemáticos de cada uno de los componentes nombrados. Así, por cada puerto o conexión que creamos en ellos, al sincronizarlo con el esquemático “00_top”, se nos habilitará la opción de añadir dicho puerto de entrada o salida en el “Sheet symbol” correspondiente.

Dentro de las subsecciones que hemos generado previamente a partir de los “Sheet symbols”, debemos acompañar a nuestro componente de los elementos necesarios para su correcta implementación y desarrollo de la función que deseamos que realice.

Esto, se llevará a cabo a partir de la adición del cableado oportuno para conectar los puertos de salida y entrada que unirán a nuestro componente al resto de elementos del PCB.

En la elaboración de un esquemático de un PCB, es esencial incorporar una serie de elementos clave como por ejemplo las resistencias, capacidades, tomas de tierra, alimentación... Estos componentes desempeñan roles cruciales en el funcionamiento de los circuitos eléctricos, para asegurarnos de que sean eficientes, confiables y seguros que cumplan con los requisitos de rendimiento y funcionalidad que buscamos. A continuación, se explican en detalle la creación de cada uno de los esquemáticos.

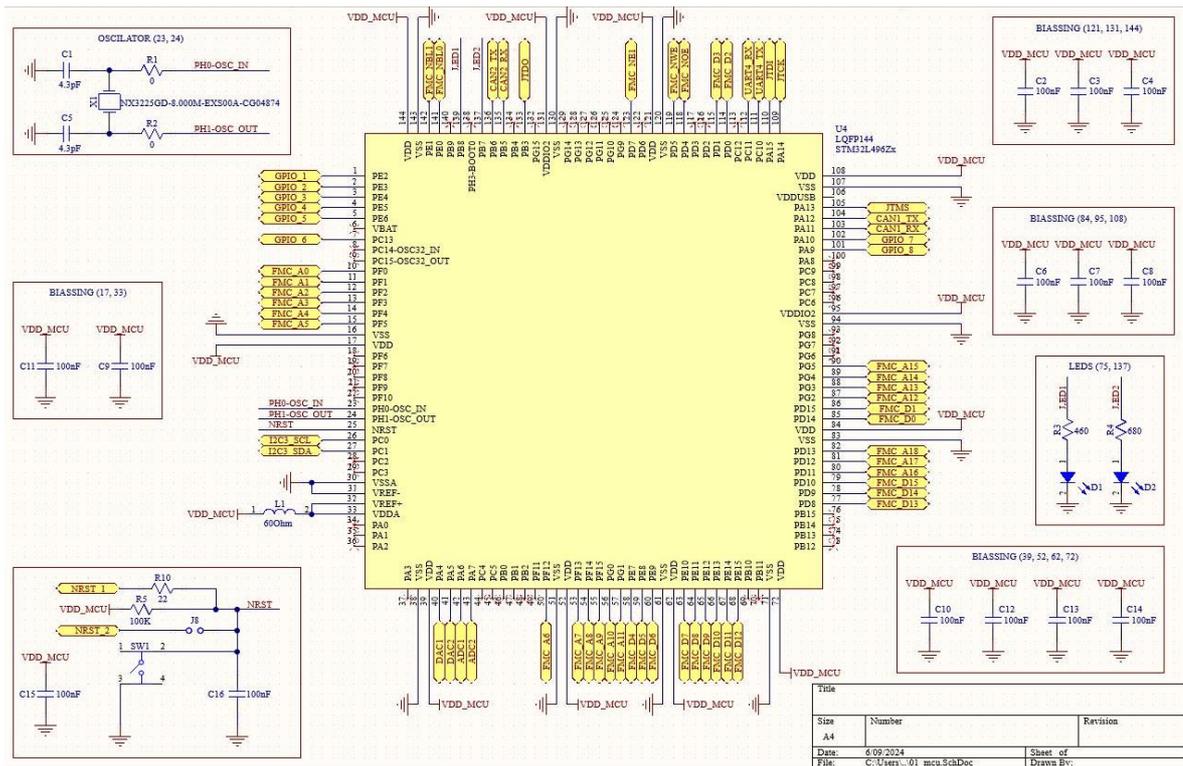


Figura 23. Esquemático (01_mcu) del microcontrolador

4.3.3 Esquemático del conector JTAG (02_jtag)

En el JTAG, tanto para los pines de entrada/salida de datos, el de selección de modo y el del reloj, se añadirán resistencias conocidas como resistencias de pull-up. Este tipo de resistencia hace que los pines tengan un estado definido cuando no están en activo. Además, en el pin de alimentación como se ha explicado previamente, añadiremos una capacidad de biassing.

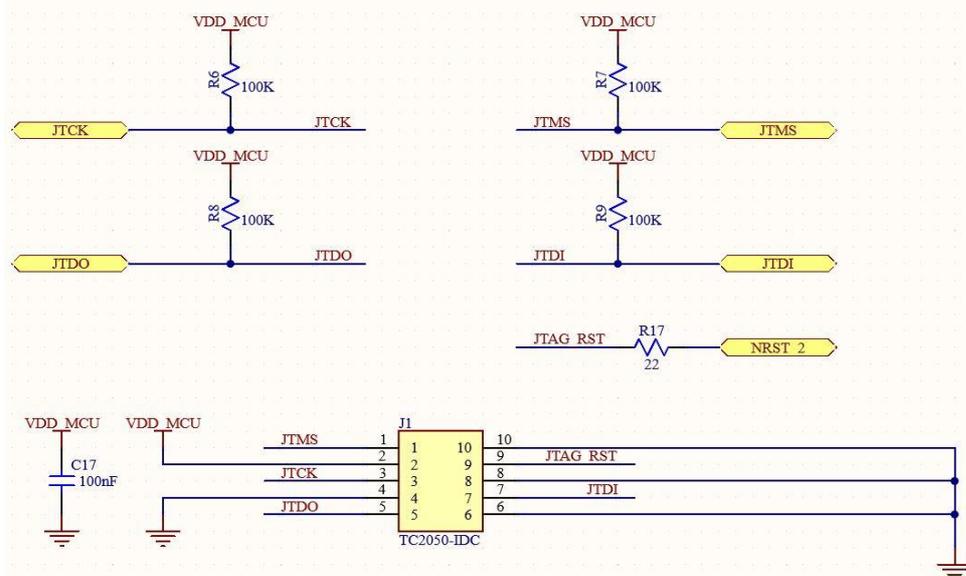


Figura 24. Esquemático (02_jtag) del conector JTAG

4.3.4 Esquemático del sensor de temperatura (03_temp)

Será necesario utilizar resistencias de pull-up en las líneas del I²C. El LM75 utiliza el bus I²C para comunicarse con el microcontrolador. Las líneas de datos y del reloj del bus necesitan resistencias de pull-up para mantenerse en un estado alto cuando no esten activas. Destacar también que cada sensor está identificado con una dirección, dependiendo de si estas entradas están conectadas a tierra o alimentación, podremos configurar la dirección del bus deseada.

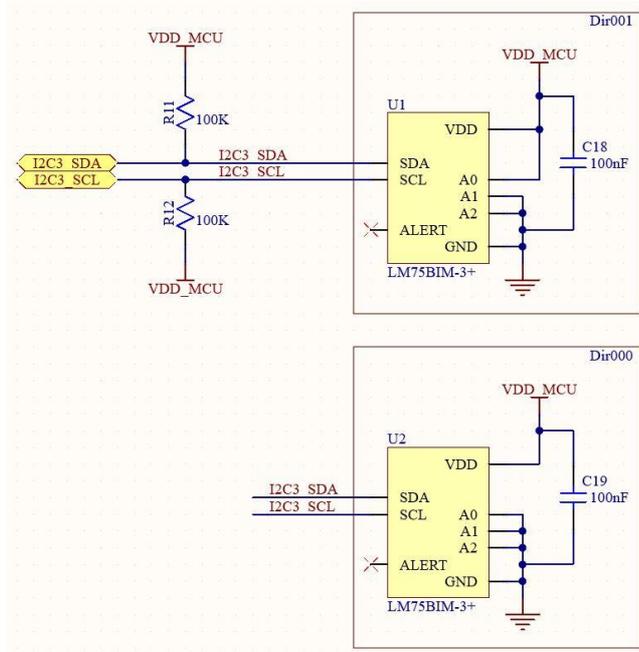


Figura 26. Esquemático (03_temp) del sensor de temperatura

4.3.5 Esquemático de la Static RAM (04_sram)

El componente clave de nuestro sistema, la memoria. Compuesta por una gran cantidad de pines bidireccionales, y las tomas de alimentación y tierra. Esta mayoría de conexiones serán de datos y de dirección, además de contar con varios pines de control (enable).

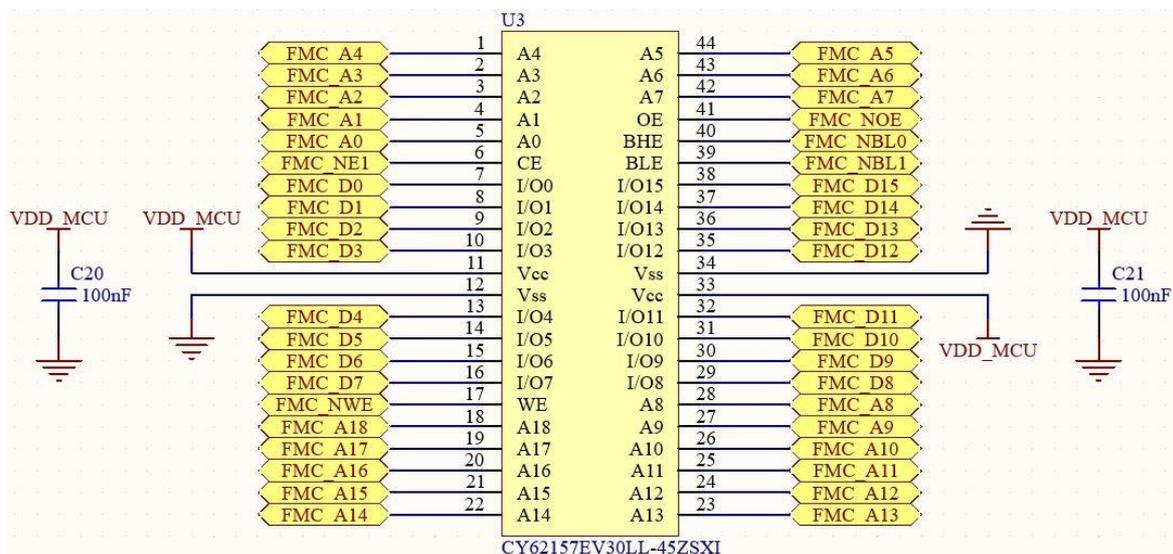


Figura 27. Esquemático (04_sram) de la Static RAM

4.3.6 Esquemático de los transceptores CAN (05_can1-2)

Se han colocado resistencias de 120 ohmios (valor de impedancia común en transceptores CAN) en cada extremo del bus para evitar distorsiones de la señal que puedan causar interferencias y errores de comunicación. En estos buses, las líneas CANH y CANL forman pares diferenciales, de ahí que se marquen como tales en el esquemático.

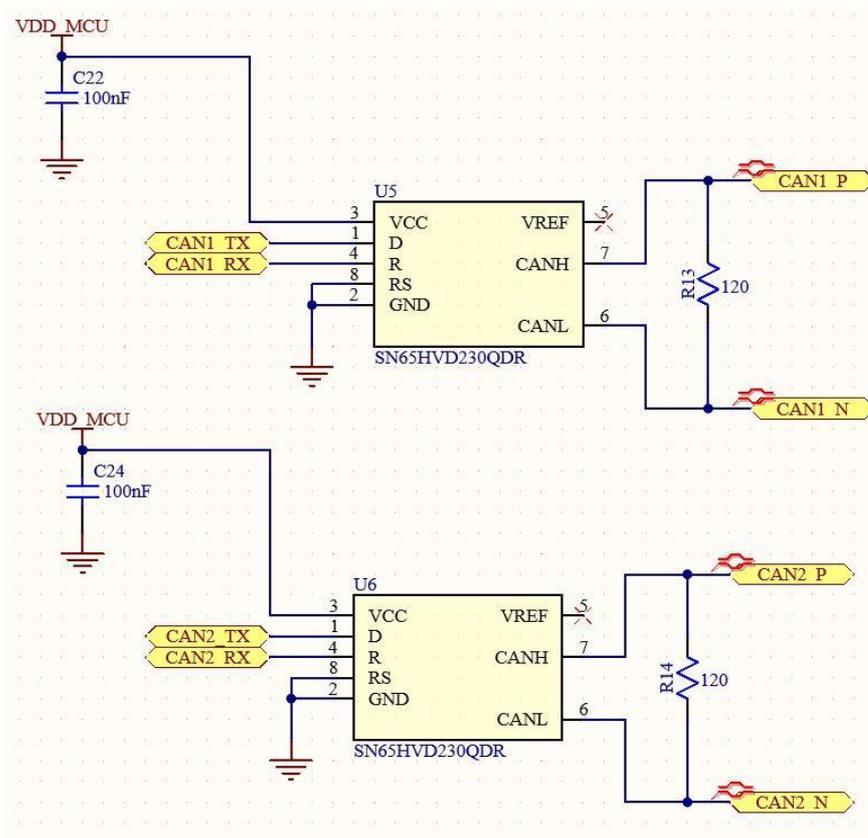


Figura 28. Esquemático (05_can1-2) de los transceptores CAN

4.3.7 Esquemático de los conectores (06_connectors)

Aquí se recopilan todas las tiras de conectores que utilizamos en la placa, desde los GPIOs hasta los que utilizan otros sistemas como el I²C. Cabe destacar los pines de la alimentación de entrada, situados en los conectores de cabecera del PCB, a partir de los cuales se alimentará también a la unidad de potencia.

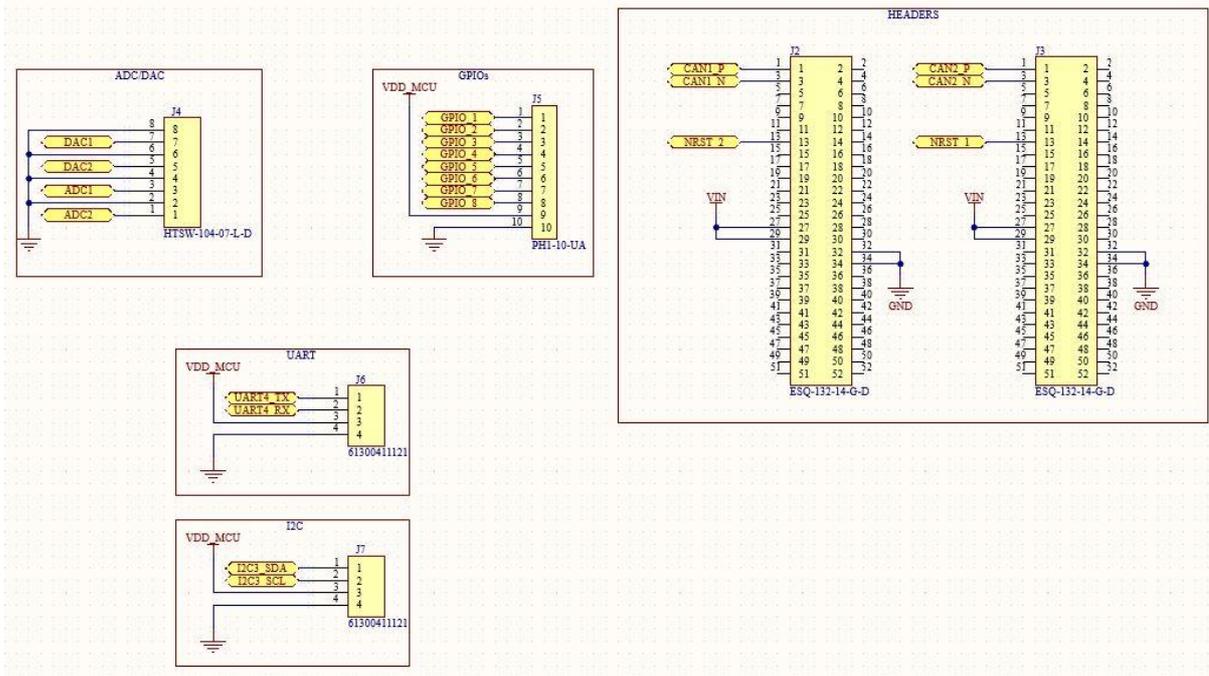


Figura 29. Esquemático (06_connectors) de los conectores

4.3.8 Esquemático de la unidad de potencia (07_power)

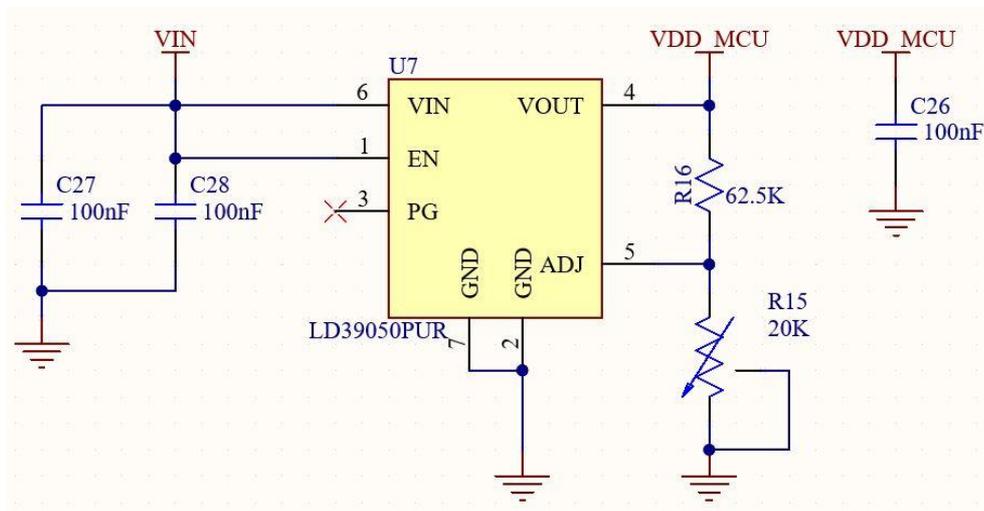


Figura 30. Esquemático (07_power) de la unidad de potencia

El potenciómetro se utiliza para ajustar la salida de voltaje o corriente de la unidad de potencia, y debemos darle un valor adecuado al mismo, según nos indica su datasheet. Por ello, usando:

$$V_{OUT} = V_{ADJ} \cdot \left(1 + \frac{R16}{R15} \right) \quad \text{Siendo: } V_{ADJ} = 0.8V$$

Finalmente, la alimentación de entrada es la fuente de energía primaria que alimenta la unidad de potencia. El regulador de potencia convierte la VIN, con ayuda de capacidades para estabilizarla, en tensión de salida VOUT.

4.4 Bill of Materials (BOM)

La Bill of Materials, como dice su nombre, es una lista de materiales que ofrece un desglose exhaustivo de todos los componentes necesarios para el ensamblaje de nuestro proyecto. Esta herramienta puede proporcionar un detalle completo de cada componente, incluyendo nombres, descripciones, designadores, cantidades e incluso precios.

Una de las funciones que cumple la generación de la BOM es facilitar la gestión de componentes al permitir que los fabricantes administren de manera eficaz los elementos que nos son necesarios. Proporcionando esta detallada lista, se asegura la adquisición de los componentes correctos en las cantidades apropiadas, minimizando así errores y retrasos en el proceso de fabricación.

Además, la BOM simplifica la identificación de componentes, lo que es esencial durante la etapa de adquisición de materiales y el ensamblaje del PCB. Los “Part Number” y las descripciones detalladas incluidas en la lista garantizan una identificación precisa, evitando así confusiones y errores durante la producción.

Otro aspecto muy útil es para calcular el coste del proyecto. La lista permite calcular con precisión los costos asociados al incluir los precios de los componentes y las cantidades requeridas. Esta información es muy importante para estimar el costo total del proyecto. Finalmente, la BOM proporciona una documentación completa del diseño electrónico, lo que es esencial para futuras referencias, mantenimiento y reparaciones.

En nuestro caso, hemos considerado como aspectos más relevantes a mostrar en la BOM los siguientes: La descripción de cada componente es el nombre técnico con el que identifica al mismo; el nombre que se le ha asignado durante el diseño, este facilita su selección en la librería y en el esquemático; el “designator” es la etiqueta asignada a cada componente como por ejemplo (R) en resistencias, (C) en capacidades o (J) para los conectores; la número de unidades de cada componente utilizadas durante el diseño; el fabricante del mismo; el proveedor del componente a través del cual se comprará; y, por último los “Part Numbers”, que son la nomenclatura que adquieren los componentes en un catálogo de piezas, tendremos por tanto uno para el fabricante y otro distinto para el proveedor.

	Description	Name	Designator	Quantity	Manufacturer	Manufacturer PN	Supplier	Supplier PN
1	Capacidad	CAP	C1, C5	2	Murata Electronics	GQM1875C2E4R3CB12D	Mouser	81-GQM1875...
2	Capacidad	CAP	C2, C3, C4, C6, C7, C8...	26	KYOCERA AVX	KAM15AR71H104KT	Mouser	581-KAM15A...
3	Diodo Led	LED	D1, D2	2	KINGBRIGHT	KPT-3216LVSECK-J3-PRV	Farnell	2610421
4	Conector JTAG	TC2050-IDC	J1	1	Tag Connect	TC2050-IDC	DigiKey	TC2050-IDC-...
5	Header 52 pins	CONNECTOR52	J2, J3	2	Samtec	ESQ-132-14-G-D	Mouser	200-ESQ1321...
6	Header 8 pins	CONNECTOR8	J4	1	Samtec	HTSW-104-07-L-D	Mouser	200-HTSW104...
7	Header 10 pins	CONNECTOR10	J5	1	Adam Tech	PH1-10-UA	DigiKey	2057-PH1-10...
8	Header 4 pins	CONNECTOR4	J6, J7	2	Würth Elektronik	61300411121	Mouser	710-6130041...
9	Jumper 2 pines	JUMPER	J8	1	Adam Tech	PH1-02-UA	DigiKey	2057-PH1-02...
10	Bobina	INDUCTOR	L1	1	Murata Electronics	BLM18PG600SH1D	DigiKey	490-7820-1-...
11	Resistencia	RES	R1, R2	2	Vishay / Beyschlag	MCT0603HZ0000ZP500	Mouser	594-MCT060...
12	Resistencia	RES	R3	1	Vishay / Dale	TNPW0603459RBEEN	Mouser	71-TNPW060...
13	Resistencia	RES	R4	1	Panasonic	ERJ-3EKF6800V	Mouser	667-ERJ-3EKF...
14	Resistencia	RES	R5, R6, R7, R8, R9, R1...	8	Vishay / Dale	CRCW0603100KFHEAP	Mouser	71-CRCW060...
15	Resistencia	RES	R13, R14	2	Vishay / Dale	TNPW0603120RBYEN	Mouser	71-TNPW060...
16	Potenciómetro	POT	R15	1				
17	Resistencia	RES	R16	1	Vishay / Dale	CRCW0603100KFHEAP	Mouser	71-CRCW060...
18	Pulsador	PUSHB	SW1	1	TE Connectivity / P&B	5-1437565-0	Mouser	506-5-14375...
19	Sensor de temperatura	LM75BIM-3+	U1, U2	2	Analog Devices	LM75BIM-3+	Mouser	700-LM75BI...
20	Memoria SRAM	CY62157EV30	U3	1	Infineon Technologies	CY62157EV30LL-45ZSXI	Mouser	727-CY57EV3...
21	Microcontrolador	LQFP144	U4	1	STMicroelectronics	STM32L496Zx	Mouser	511-STM32L4...
22	Controlador CAN	SN65HVD230	U5, U6	2	Texas Instruments	SN65HVD230QDR	Mouser	595-SN65HV...
23	Regulador de voltaje	LD39050PUR	U7	1	STMicroelectronics	LD39050PUR	DigiKey	497-8717-1-...
24	Oscilador de cristal	OSC	X1	1	ECS Inc.	ECS-3225MVLC-270-CN-TR	DigiKey	XC2242TR-ND

Figura 25. Bill of Materials

4.5 Especificaciones de diseño del PCB

Acorde a la normativas y siguiendo los estándares de creación y fabricación de CubeSats, se debe tener en cuenta que constan una forma ligeramente rectangular con las esquinas redondeadas y cutouts en los bordes. Deben incluir también cuatro orificios de montaje, uno en cada esquina. De estos últimos, los dos que se sitúan en la zona superior equidistarán una distancia menor que en los inferiores. A continuación se muestran las medidas consideradas:

	Medida
Altura	95.89 mm
Anchura	90.17 mm
Espesor	1.57 mm
Redondeo esquinas	1.2 mm

Tabla 3. Dimensiones del PCB [16]

A todo esto, se deben añadir 104 agujeros para pines en la parte superior del PCB, a modo de conector. Para nuestra placa se han elegido cuatro filas de veintiséis pines (4x26), cada uno de ellos de 1.016 mm de diámetro [16].

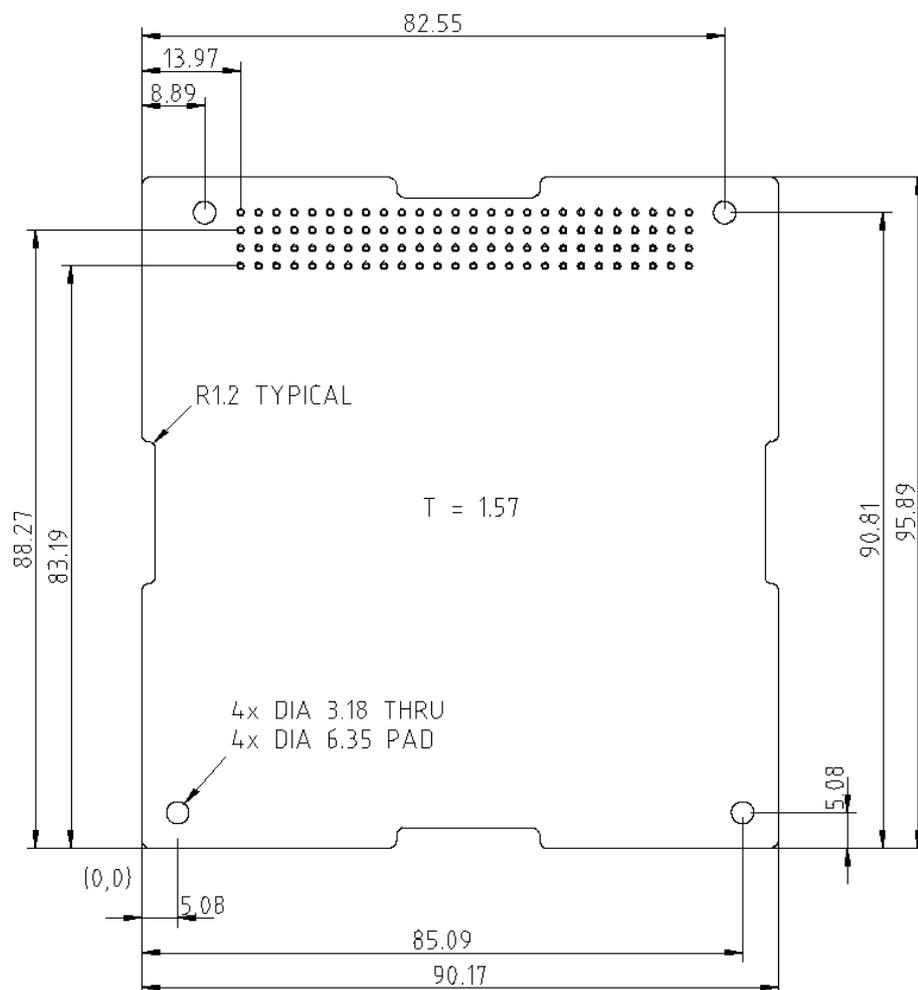


Figura 26. Dimensiones exteriores de la placa [16]

Los pines que se solicitan para hacer la función del conector se han dividido en dos conectores de pines de encabezado formados por cincuenta y dos pines como se aprecia en la Figura 9. Estos dos conectores son nombrados como Header 1 (H1) y Header 2 (H2).

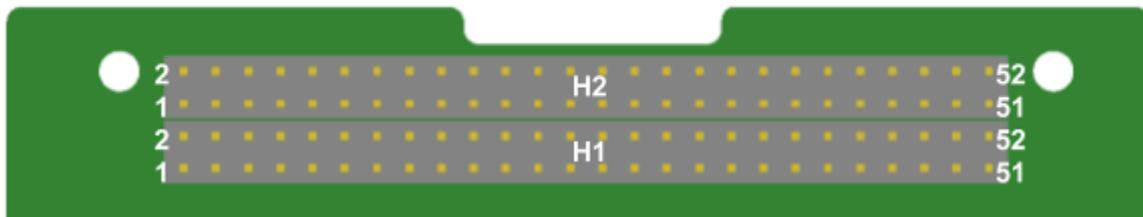


Figura 27. Disposición de los 104 pines de los conectores

Respecto a las dimensiones tomadas para los recortes, se pueden apreciar las medidas en el siguiente esquema:

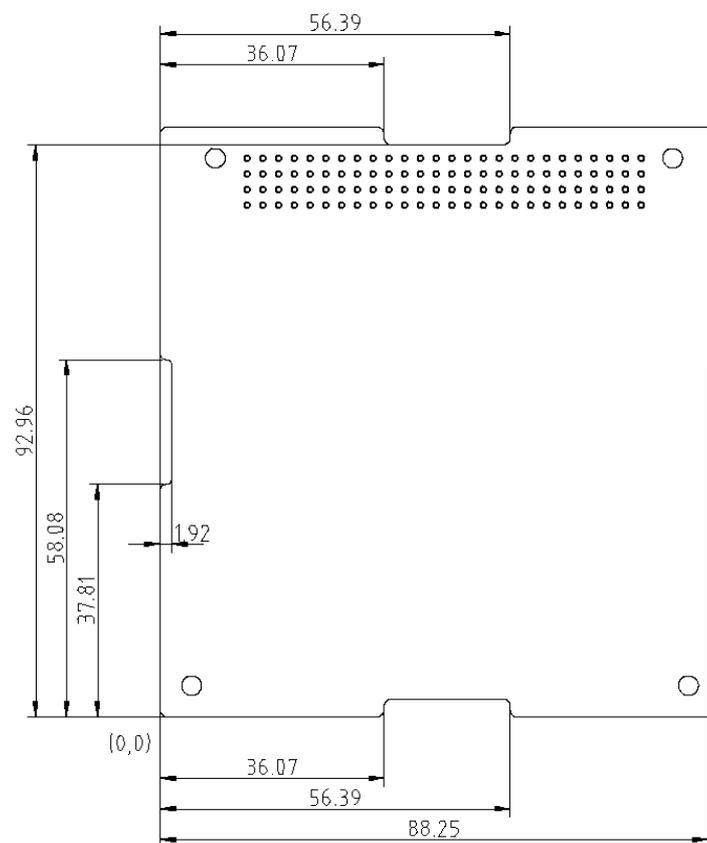


Figura 28. Dimensiones de los recortes de la placa [16]

4.6 Definición del Stack-up del PCB

El término “stacking” o “stack-up” en un PCB, se refiere a la disposición tridimensional de las diversas capas que componen la placa. Un PCB consta típicamente de múltiples capas apiladas, cada una con una función específica. El proceso de "stacking" implica determinar cómo se organizarán y conectarán estas capas para cumplir con los requisitos de diseño y funcionamiento. En la selección del “stacking” se deben tener en cuenta diversos factores como:

- Número de capas: un PCB puede tener varias capas, incluyendo capas de señal, capas de alimentación, capas de tierra y capas internas para enrutamiento de señales y conexiones.

- Orden de las capas: el orden en el que se apilan las capas es importante. Por lo general, las capas de señal se intercalan entre capas de alimentación y tierra para garantizar un adecuado suministro de energía y un buen rendimiento de señal.
- Distribución de señal y corriente: el "stack-up" también se utiliza para asegurarse de que las señales y la energía se distribuyan de manera eficiente a través de la placa. Esto implica considerar la ubicación de las capas de alimentación y tierra, así como la ubicación de componentes críticos.
- Dimensiones y espaciado: el espaciado entre las capas y las dimensiones generales del PCB son parte integral del "stack-up". Esto influye en la integridad mecánica y eléctrica de la placa.

Para ser más específicos, en nuestro caso hemos elegido una distribución en la que las placas se sitúan a una distancia de 15 mm. Los componentes no deben exceder una altura de 8.67 mm hacia arriba (A) y 4.83 mm hacia la placa inferior (B). El lado principal de montaje de los componentes será el denominado con A en la Figura 10.

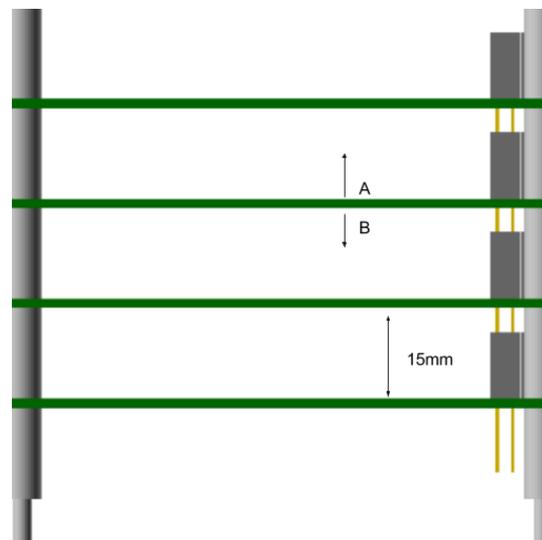


Figura 29. Vista lateral del “stacking” [16]

Para las capas del PCB se ha seleccionado que el ancho de la misma sea de aproximadamente 1.6 mm y que cumpla la siguiente configuración, con una constante dieléctrica de 4.3 GHz en el núcleo:

Top Overlay		Overlay				
Top Solder	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03
Top Surface Finish	PbSn	Surface Finish		0.02mm		
1 Top Layer	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
Dielectric 1	PP-017	Prepreg		0.11mm	4.29	0.02
2 Int1 (GND)	CF-004	Plane	1oz	0.018mm		
Dielectric 3	Core-028	Core		1.2mm	4.29	0.02
3 Int2 (PWR)	CF-004	Plane	1oz	0.018mm		
Dielectric 5	PP-017	Prepreg		0.11mm	4.29	0.02
4 Bottom Layer	CF-004	Signal	1oz	0.035mm		
Bottom Surface...	PbSn	Surface Finish		0.02mm		
Bottom Solder	SM-001	Solder Mask		0.0254mm	4	0.03

Figura 30. Configuración del “stack-up” escogida [17]

En la estructura de capas de una placa de circuito impreso (PCB), existen varios conceptos a destacar.

El “Prepreg” también conocido como aislante, es un material delgado impregnado con resina y curado a un grado intermedio. Se utiliza principalmente como material de unión y aislamiento para los patrones conductores internos de placas de circuito impreso multicapa. Tras ser laminado con el prepreg, la resina de epoxy semicurada se exprime, comienza a fluir y se solidifica, uniendo las placas de circuito impreso multicapa y formando una capa aislante.

Por otra parte, el núcleo es un material rígido con un grosor específico y cobre en ambos lados. Las diferencias entre ambos son:

- El prepreg tiene una textura semisólida similar al cartón, mientras que el núcleo es un material rígido similar al cobre.
- El prepreg funciona tanto como adhesivo como aislante, mientras que el núcleo sirve como material fundamental para las PCB, con roles funcionales completamente diferentes.
- El prepreg puede ser flexible, mientras que el núcleo no puede doblarse.
- El prepreg no es conductor, mientras que el núcleo tiene capas de cobre en ambos lados, sirviendo como medio conductor para las placas de circuito impreso [18].

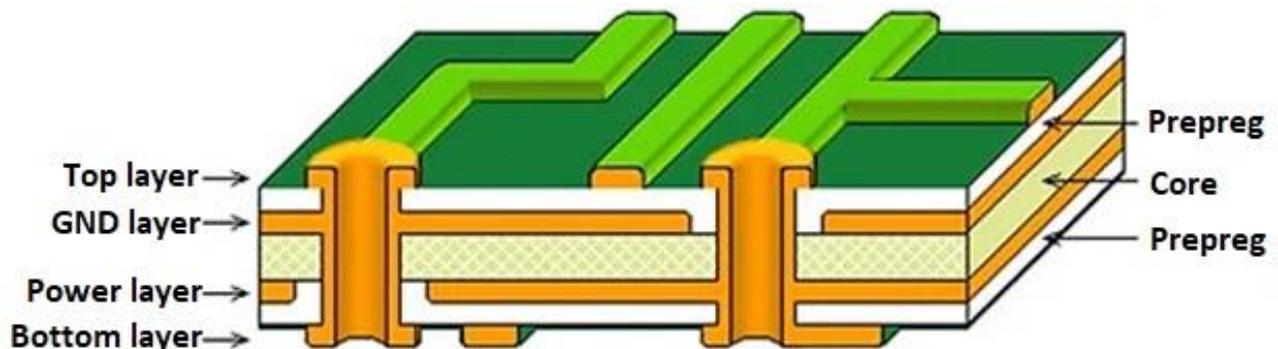


Figura 31. Vista interna del funcionamiento de las vías

Todo esto deberá cumplir unos estándares regularizados previos a su producción. Para conocer la normativa que rige los aspectos críticos en el diseño especial, debemos presentar a la European Cooperation for Space Standardization (ECSS), reconocida por establecer estándares técnicos en la industria aeroespacial europea, desempeña un papel fundamental en la gestión de proyectos espaciales. Entre sus normativas, la ECSS 7070 se erige como una piedra angular en la gestión de documentos. Esta norma no solo establece protocolos para la documentación de diseño y fabricación, sino que también influye en aspectos técnicos críticos, como el stack-up de PCB diseñados para aplicaciones en el espacio.

La implementación adecuada del stack-up es esencial para asegurar la integridad y fiabilidad de los sistemas electrónicos en entornos espaciales desafiantes. La configuración de capas y materiales en un PCB debe cumplir con las directrices de la ECSS 7070 para abordar problemas como la radiación cósmica, las fluctuaciones extremas de temperatura y las vibraciones.

Para lograr esto, es necesario seleccionar cuidadosamente los materiales dieléctricos, establecer distancias de separación apropiadas y considerar la disposición de capas para minimizar las interferencias electromagnéticas. Todo esto contribuye a garantizar la resistencia a condiciones extremas y la durabilidad del sistema electrónico [19].

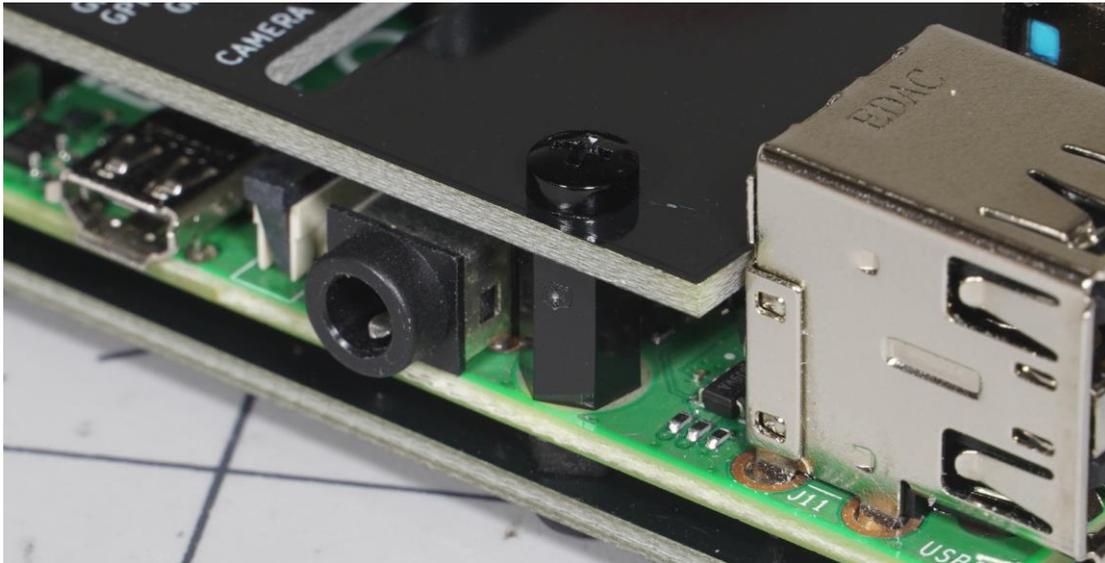


Figura 32. Detalle de las capas de una placa

Por lo tanto, tener en cuenta las pautas de la ECSS 7070 no solo asegura la conformidad con los estándares de calidad en la documentación, sino que también es fundamental para la fiabilidad de los sistemas electrónicos en el espacio [20].

4.7 Reglas de diseño

Las reglas de diseño desempeñan un papel clave previo al proceso de rutado de una placa de circuito impreso. Son esenciales para garantizar que el diseño final cumpla con los estándares y especificaciones deseados, así como para asegurar la funcionalidad, fiabilidad y rendimiento óptimo del circuito. Esto unificará las normas que seguirá el rutado de nuestro PCB.

Estas reglas son importantes porque ayudan a evitar cortocircuitos y problemas de interferencias al especificar condiciones como el ancho mínimo y máximo de las pistas, el espacio mínimo entre pistas y la separación mínima entre pistas y los pads. Cumplir con estas reglas garantiza que las pistas estén correctamente dimensionadas y espaciadas, lo que reduce la probabilidad de interferencias y asegura un funcionamiento adecuado del circuito.

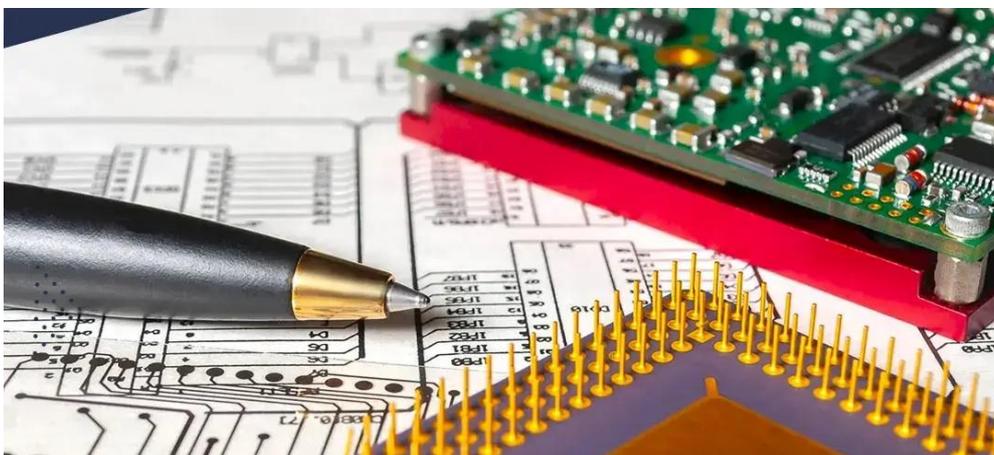


Figura 33. Diseño del PCB [28]

Por medio de ellas, se definen cómo deben conectarse los componentes entre sí y con otras partes del circuito, asegurando una conexión eléctrica sólida y confiable que minimiza la resistencia eléctrica y reduce la posibilidad de fallos o mal funcionamiento en el circuito.

También son críticas para mantener la integridad de las señales en el diseño. Esto incluye la impedancia de las líneas de transmisión, la longitud de trazado coincidente y la disposición de las capas de señal. Para nuestro caso, cabe destacar que se limitará el ancho de las pistas a 10 mil, excepto para las pistas que pertenezcan a conexiones de potencia, las cuales serán de 12 mil.

Una vez definidos estos parámetros, para la selección de los componentes auxiliares en nuestro trabajo, debemos definir el término "0603", el cual se refiere al tamaño de dichos componentes respecto a la tecnología de montaje en superficie (SMD), como resistencias, capacitores, inductores, entre otros, que se utilizan en circuitos electrónicos. En este caso, "0603" significa que el componente tiene dimensiones de aproximadamente 0.06 x 0.03 in (1.5 x 0.8 mm), donde el primer número indica el ancho y el segundo número indica la longitud del componente [29].

La elección del tamaño 0603 para componentes de una placa PCB que formará parte de un nanosatélite puede tener varias ventajas. En primer lugar, su tamaño compacto es ideal para aplicaciones en las que el espacio es limitado, como es el caso, en el que disponemos de restricciones espaciales debido a su tamaño reducido. Además, el tamaño 0603 forma parte de la tecnología de montaje en superficie, ya que al permitir que los componentes se monten directamente en la superficie de la PCB se simplifica el proceso de ensamblaje y reduce los costes de producción.

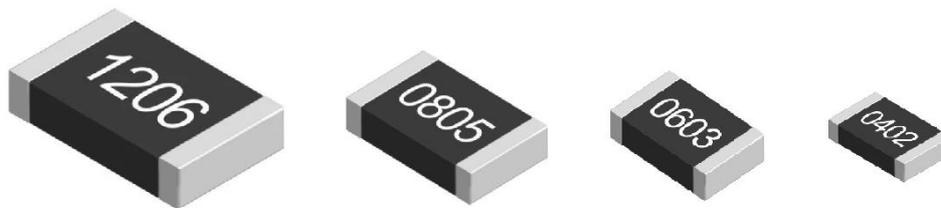


Figura 34. Ejemplos de tamaños utilizados comúnmente en SMD

Otra ventaja importante es la alta disponibilidad de componentes de tamaño 0603 en el mercado. Esto significa que hay una amplia gama de opciones para elegir en términos de valores de resistencia, capacitancia e inductancia. Esto facilita la elección de los componentes que más se adecuen a nuestras necesidades. Además, a pesar de su pequeño tamaño, los componentes de tamaño 0603 ofrecen un rendimiento confiable y cumplen con los estándares de calidad requeridos para aplicaciones espaciales. Son capaces de funcionar en condiciones extremas de temperatura, vibración y radiación, lo que los hace adecuados para su uso en entornos hostiles como el espacio.

Respecto al diseño de la placa deberemos considerar también agregar resistencias de pull-up en algunas zonas de la placa. En primer lugar, estas resistencias ayudan a estabilizar las señales, lo que garantiza un comportamiento predecible de la línea de señal cuando no está siendo activamente impulsada por un dispositivo. Esto es especialmente importante en para evitar problemas como lecturas erróneas, consumo excesivo de energía o comportamientos no deseados. La presencia de una resistencia de pull-up mantiene la línea de señal en un estado conocido y ayuda a evitar estos problemas.

Además de estas razones, las resistencias de pull-up también pueden ayudar a reducir las interferencias electromagnéticas y mejorar la inmunidad al ruido al mantener las líneas de señal en un estado lógico alto y reducir la susceptibilidad a perturbaciones externas.

Otro aspecto a tener en cuenta es la necesidad de añadir un "diffpair" o par diferencial, esto consta de un par de líneas de señal que se utilizan para transmitir una señal diferencial. Estas líneas están diseñadas para llevar señales opuestas, pero complementarias, que representan la diferencia de voltaje entre ellas. Un diffpair consta de dos líneas de señal, a menudo llamadas "CAN_P" (positiva) y "CAN_N" (negativa), que están configuradas de manera que el cambio en el voltaje de una línea se refleja como un cambio opuesto en la otra línea.

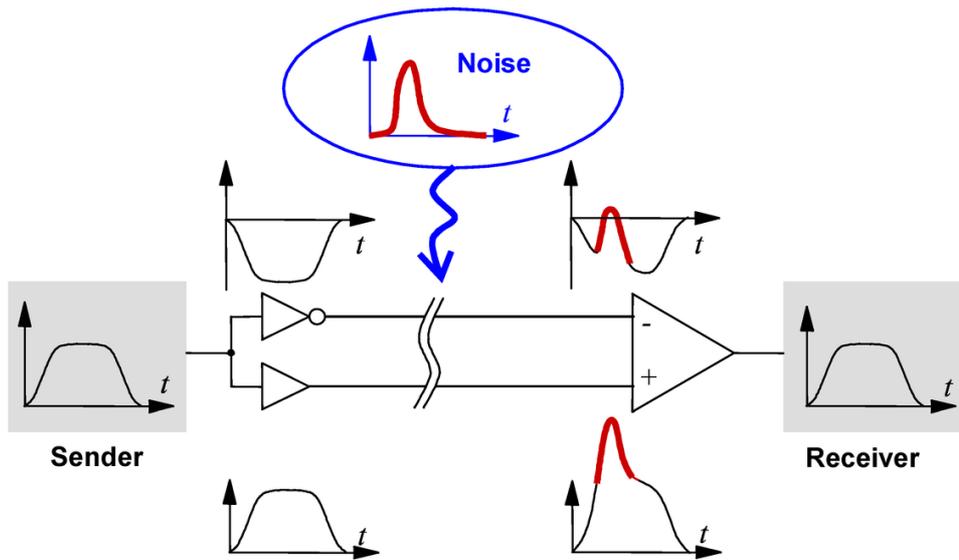


Figura 35. Reducción de ruido mediante señal diferencial [24]

Una de las ventajas adicionales del uso de señales diferenciales es su capacidad para ecualizar los tiempos de retraso en la señal. En sistemas de comunicación diferencial, las líneas de señal diferencial generalmente tienen longitudes iguales y trazados de ruta similares para ambas líneas. Esto significa que cualquier retraso en una línea de señal se compensa automáticamente por el retraso correspondiente en la otra línea [25].

Cuando se transmite una señal, el retraso en la misma puede ser diferente en cada extremo debido a factores como la impedancia del cable, la longitud del recorrido y la capacitancia del entorno. Estos desfases pueden provocar distorsiones en la señal y dificultar la recuperación precisa de los datos por parte del receptor. Al usar señales diferenciales, los desfases en las líneas de señal se compensan mutuamente, lo que permite una transmisión más precisa y confiable de los datos. Además, cualquier interferencia o ruido que afecte por igual a ambas líneas de señal se cancela cuando se toma la diferencia entre ellas en el receptor, lo que mejora aún más la integridad de la señal.

También, a medida que se ha ido avanzando en el desarrollo de la placa, se ha determinado agregar un regulador de voltaje en el circuito. En primer lugar, este dispositivo sirve para estabilizar el voltaje de salida, asegurando que permanezca constante incluso si la entrada experimenta fluctuaciones. Esta estabilidad es esencial debido a que se requiere una alimentación de voltaje fiable para el funcionamiento correcto de los componentes.

Además, los reguladores de voltaje protegen los dispositivos sensibles del circuito contra daños causados por variaciones en la fuente de alimentación. Pueden prevenir picos o caídas repentinas de voltaje que podrían resultar de cambios en la carga, interferencias o fluctuaciones en la red eléctrica.

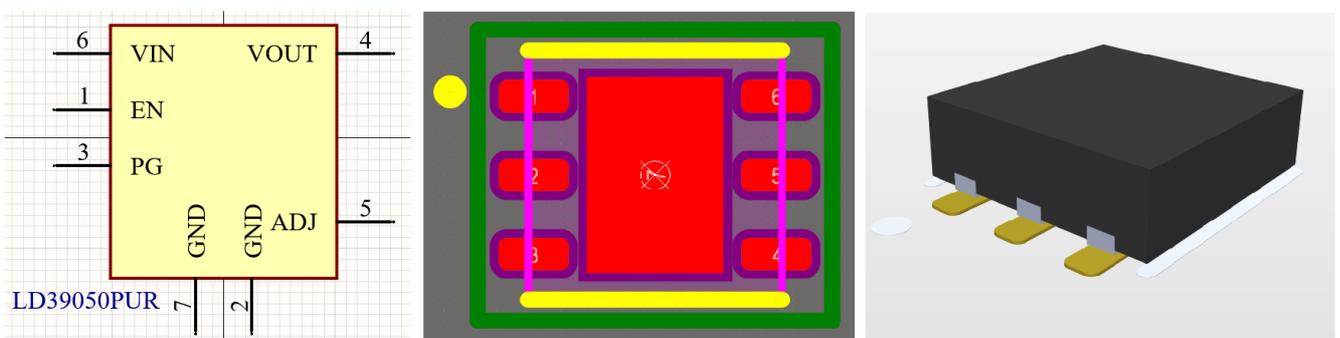


Figura 36. Esquemático, huella y 3D del regulador de voltaje

Además de estabilizar el voltaje y proteger contra variaciones, los reguladores de voltaje facilitan la compatibilidad con diferentes componentes que requieren niveles de voltaje específicos. Pueden reducir un voltaje más alto de una fuente de alimentación a un nivel adecuado para alimentar componentes más sensibles que necesitan un voltaje más bajo [26].

Finalmente, la última consideración a destacar es que se debe situar al oscilador lo más próximo posible al microcontrolador. Al hacer esto, se minimiza la longitud de las pistas de conexión entre ellos. Esto reduce la posibilidad de interferencias electromagnéticas causadas por las señales de alta frecuencia del oscilador, que podrían afectar otros componentes cercanos. Así, se reducen los retardos en la propagación de la señal entre el oscilador y el microcontrolador [27]. Esto garantiza una temporización precisa de las operaciones del microcontrolador, lo que es crucial para comunicaciones seriales de alta velocidad o procesamiento de datos instantáneo.

Las señales de reloj generadas por el oscilador son esenciales para el funcionamiento del microcontrolador, ya que sincronizan las operaciones del sistema. Al reducir la longitud de las rutas de conexión entre el oscilador y el microcontrolador, se minimiza la degradación de la señal y se mejora la integridad de dicha señal de reloj. Al mantener el oscilador cerca, se reduce la susceptibilidad del sistema a interferencias externas y se mejora la estabilidad de estas señales.

4.8 Floorplanning

Un aspecto clave a considerar es la forma en la que se sitúan cada uno de estos componentes en la placa. Un posicionamiento incorrecto, aunque sea eléctricamente válido, podría afectar al funcionamiento de todo el sistema. La correcta colocación también minimiza las interferencias electromagnéticas entre componentes. Al posicionarlos de manera estratégica, se reducen las señales no deseadas y se mejora la calidad de la señal. Esto lo podemos conseguir con un delicado rutado en las zonas que están delimitadas por componentes que trabajan a alta frecuencia.

Una vez que tenemos la librería de componentes completa, se debe empezar a crear el modelo del PCB. Para ello, con las dimensiones y condiciones comentadas previamente, comenzaremos definiendo las distintas capas de las que se compone la placa del PCB, y, sobre la que se colocarán los componentes que se crearon en la librería del proyecto:

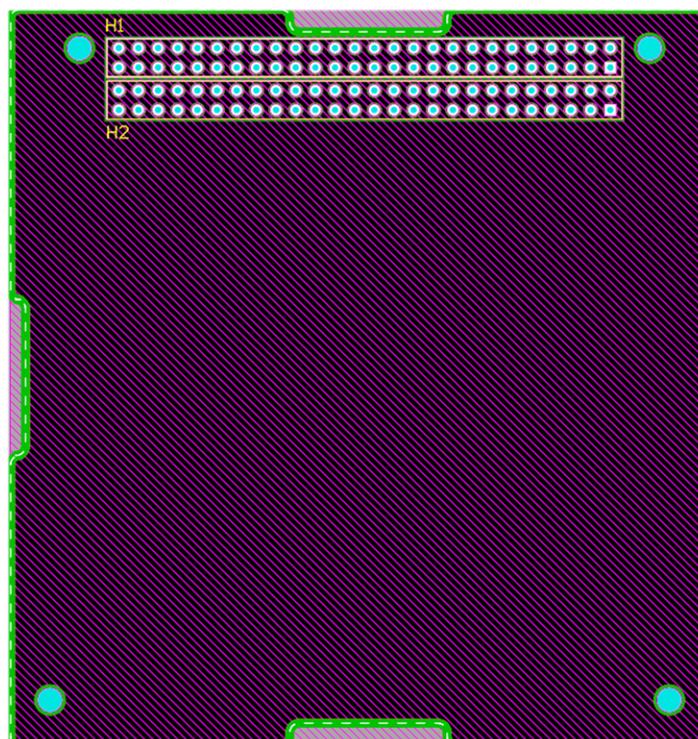


Figura 37. Huella PCB de la placa

En nuestro caso, esto lo podemos observar en el oscilador, el cual se posiciona lo más próximo posible al microcontrolador. Así conseguimos que sus respectivas conexiones sean lo más pequeñas posibles, con lo que conseguimos optimizar la integridad de la señal, además de evitar cruces no deseados o interferencias con las señales de otros enrutamientos.

Como primera aproximación, situaremos los componentes de tal forma que rodeen al microcontrolador, el cual consideramos como núcleo de la placa y del que partirán la mayoría de conexiones, por eso debe estar accesible para el resto de componentes. En nuestro caso, se ha considerado que la posición más adecuada para la SRAM es bajo el microcontrolador, ya que de esta forma se simplifica de manera considerable las conexiones entre sus puertos. De esta forma, se dejarán espacios disponibles para el resto de conjuntos.

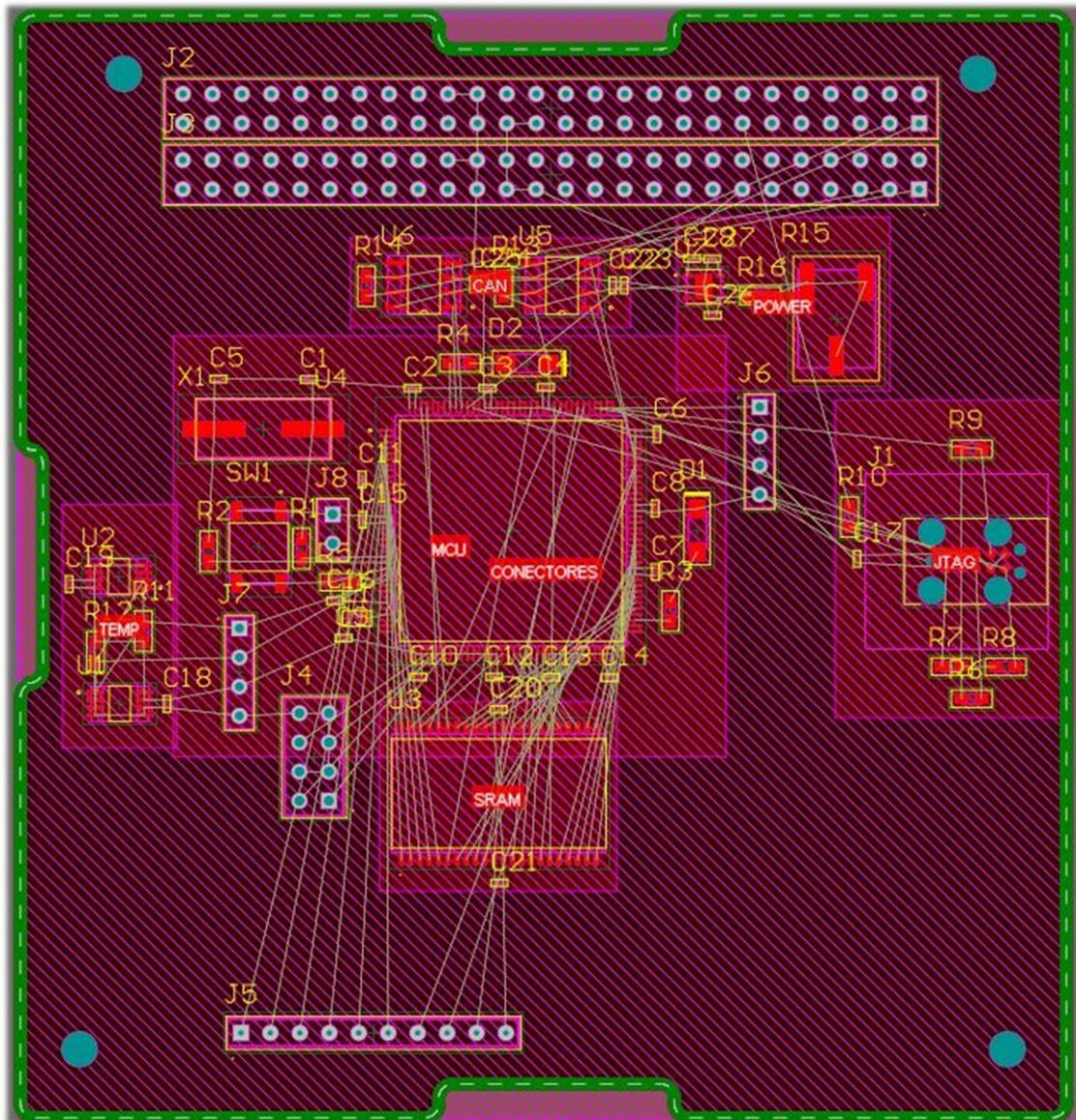


Figura 38. Propuesta inicial del floorplanning

Como se puede observar, respecto a los sensores de temperatura (a la izquierda de la figura 26), no se deben situar en zonas próximas, ya que no funcionarían de la forma deseada. Colocar dos sensores muy cerca en un PCB puede provocar interferencias térmicas, es decir, ocurriría un acoplamiento térmico que, como resultado puede ofrecer tanto medidas inexactas de ambos sensores, como lecturas redundantes de las variaciones de temperatura. El primer caso, es especialmente problemático en situaciones donde que requieren de alta precisión en las mediciones, ya que los sensores pueden no reflejar la temperatura real. Para el caso

redundante, no se aprovecharía la función de colocar dos sensores, como es nuestro caso. Proporcionarán valores similares, por lo que es inútil este posicionamiento.

Es por ello, que los sensores de temperatura se distribuirán en puntos estratégicos de la placa que nos permitirá detectar zonas calientes o incluso el sobrecalentamiento de algunos componentes electrónicos. Este sobrecalentamiento es crítico para prevenir fallos y que dichos componentes funcionen de forma correcta.

Tras redistribuir un poco las zonas, nos quedará uno de los sensores en una zona un tanto crítica (U2 en la Figura 27) y el otro se coloca en una zona menos solicitada térmicamente (U1 en la Figura 27). De esta forma se logra medir de una forma más efectiva las variaciones de temperatura a las que se somete la placa en diferentes zonas de la misma.

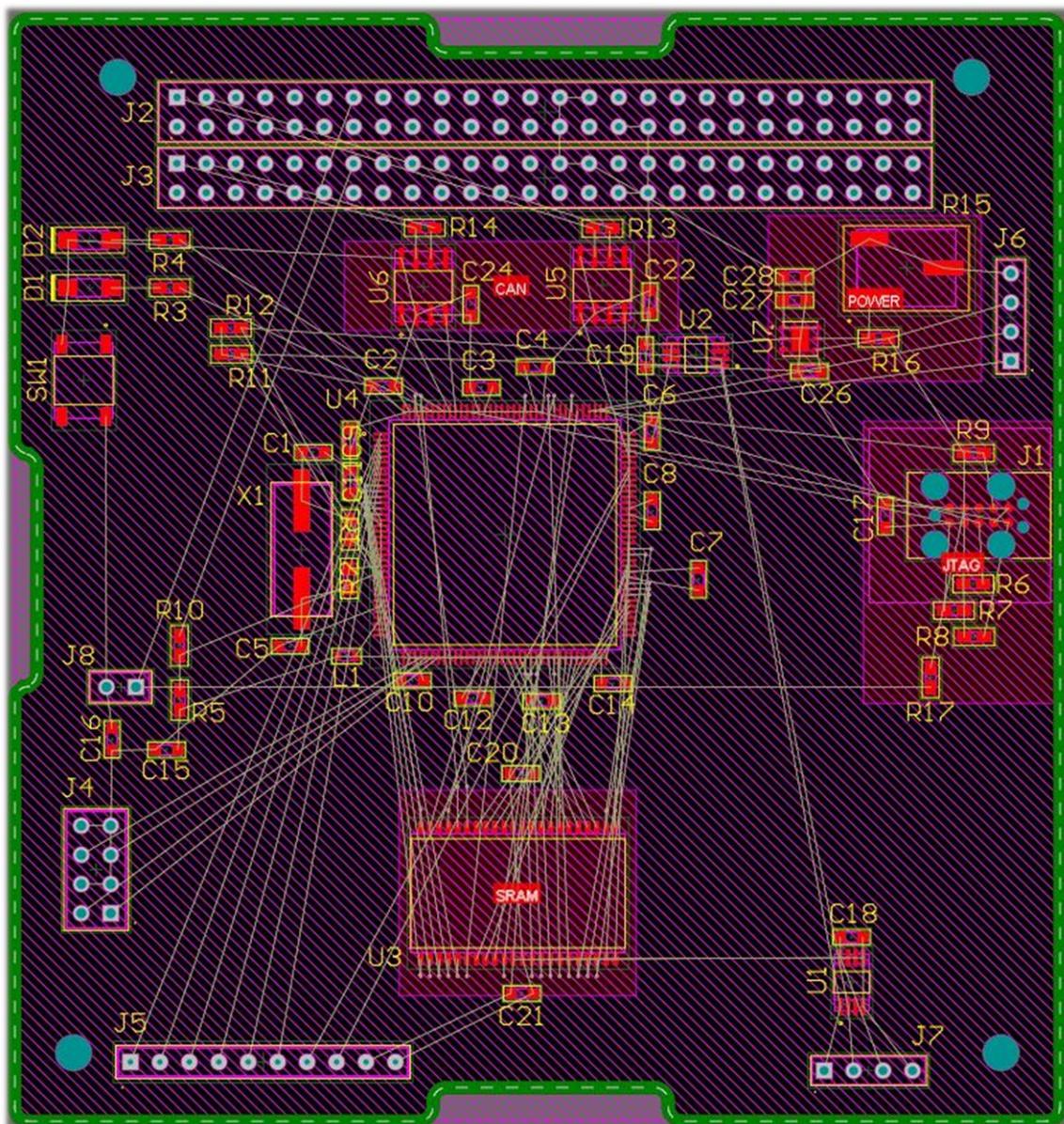


Figura 39. Floorplanning tras consideraciones

Como se puede observar en la ilustración, se ha comprobado que la posición más adecuada para los transceptores CAN (U5 y U6) es entre el microcontrolador (U4) y los conectores de pines (J2 y J3), ya que sus conexiones se simplifican facilitando el rutado de la zona superior de la placa. De la misma manera, el conector JTAG (J1) mantiene la zona que se planteó inicialmente. Apartado del resto de componentes y en uno de los extremos laterales.

Por último, las hileras de conectores pertenecientes a los ADC/DAC y GPIOs se ha decidido colocarlas próximas a los bordes de la placa, zonas apartadas y no muy sobrecargadas para no interferir demasiado con el resto de conexiones. Todos aquellos elementos auxiliares que se observan en el floor planning (como resistencias, capacidades, bobinas, ...), se situaran a lo largo de la placa atendiendo a la disposición mostrada en su respectivo esquemático aportando así, un eficiente nivel de orden al PCB.

Una vez planteado el diseño del floor planning se debe comenzar el proceso de rutado en las diferentes capas del stack-up comentado previamente.

4.9 Rutado

Conocemos como rutado o enrutamiento al proceso de desarrollo del PCB que consiste en establecer las conexiones eléctricas entre los distintos componentes de la placa a través de pistas y vías. El objetivo de este apartado será encontrar los caminos que lleven a cada uno de los puertos de los componentes a conectarse al lugar donde deben de la forma más directa y sencilla, evitando así retrasos o interferencias de las señales.

Para ello, hay que destacar el modelo de stack-up escogido. Como se explicó en apartados anteriores, el ensamblaje de nuestra placa, respecto a capas que pueden contener rutas, constará de:

- Plano superior (top layer): capa principal en la que se colocan la mayoría de los componentes y rutas del PCB.
- Plano de tierra (GND): capa de cobre que actúa como referencia de voltaje cero para los componentes de la placa.
- Plano de alimentación (VCC): capa dedicada a distribuir el voltaje de alimentación a todos los componentes del circuito que la requieran.
- Plano inferior (bottom layer): es la opuesta de la capa superior y representa la parte inferior de la PCB. Se utilizará también para enrutamiento de pistas. También se puede utilizar para la colocación de componentes, pero en nuestro caso no es necesario, ya que se ha decidido colocar todos en el plano superior.

Esta superposición de los planos beneficia al rutado haciendo que la capacitancia se distribuya, y, de esta forma, mejorar el desacoplamiento y reducir el ruido. Respecto al ancho de las pistas, cabe destacar que en los planos de tierra y alimentación estas serán de un ancho mayor. Esto es debido a la búsqueda de una integridad de la señal óptima para esas conexiones, de esta forma, conseguimos mejorar la eficiencia del circuito.

Para llevar a cabo estas conexiones entre las diferentes capas se debe presentar el concepto de vía. Las vías son elementos que permiten realizar conexiones eléctricas entre las diferentes capas de la PCB. Generalmente son perforaciones que se realizan en la placa, perforación con la cual conseguimos conectar rutas a través de las capas. A través de ellas, podemos evitar cruces e interferencias entre las señales, además por supuesto, de conseguir conexiones a alimentación o tomas de tierra en cualquier lugar de la placa que nos lo solicite.

Antes de comenzar, se deben destacar algunos conceptos clave a la hora de enrutar. Por un lado, diferenciar los componentes SMD, los cuales se montan directamente sobre la superficie de la PCB, y los componentes Through Hole, se insertan mediante pines o patas a través de agujeros perforados que atraviesan la placa. Otro aspecto importante es evitar giros de 90° o 180° en las conexiones para mantener la integridad de la señal y mejorar el rendimiento de las conexiones. Los giros bruscos pueden provocar distorsiones en la señal y son más propensos a sufrir defectos durante la fabricación. También pueden introducir inductancias y subidas de resistencia parásitas no deseadas. Por estos motivos, se recomienda utilizar un ángulo más suave, como 45° o un trazado curvo, pero para nuestro caso únicamente haremos uso de trazos rectos por tanto los ángulos serán de 45°.

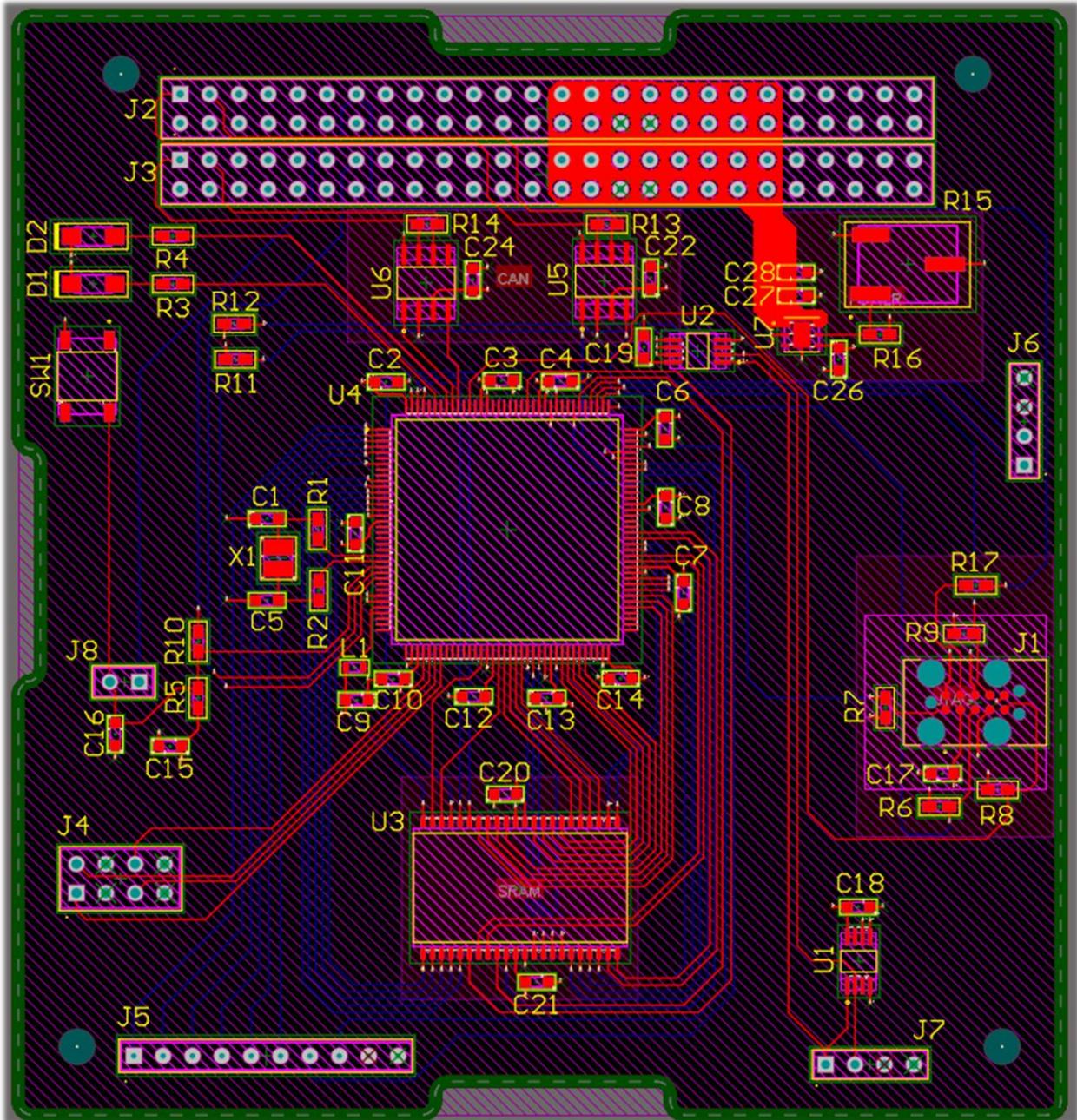


Figura 40. Conexiones y componentes del plano top

En primer lugar, comenzaremos el rutado por la SRAM, ya que es el componente que posee más conexiones con el microcontrolador y, por tanto, será la zona más delicada para rutar. Se va alternando el uso de ambos planos de conexión, de esta forma evitamos interferencias y cruces no deseados. Tras varias iteraciones debido a zonas conflictivas con las conexiones de otros componentes, en la Figura 28 se puede observar la disposición final escogida.

Destacar que en el capa superior, para alimentar la unidad de potencia, no se han utilizado pistas de conexión, se ha optado por utilizar un plano poligonal que abarca todos los puertos de alimentación de entrada (VIN). El uso de este tipo de planos es una técnica utilizada en el diseño de placas que consiste en rellenar de cobre una sección grande y continua para crear un plano y, de esta forma, reducir la impedancia, las caídas de tensión y mejorar la estabilidad de la señal.

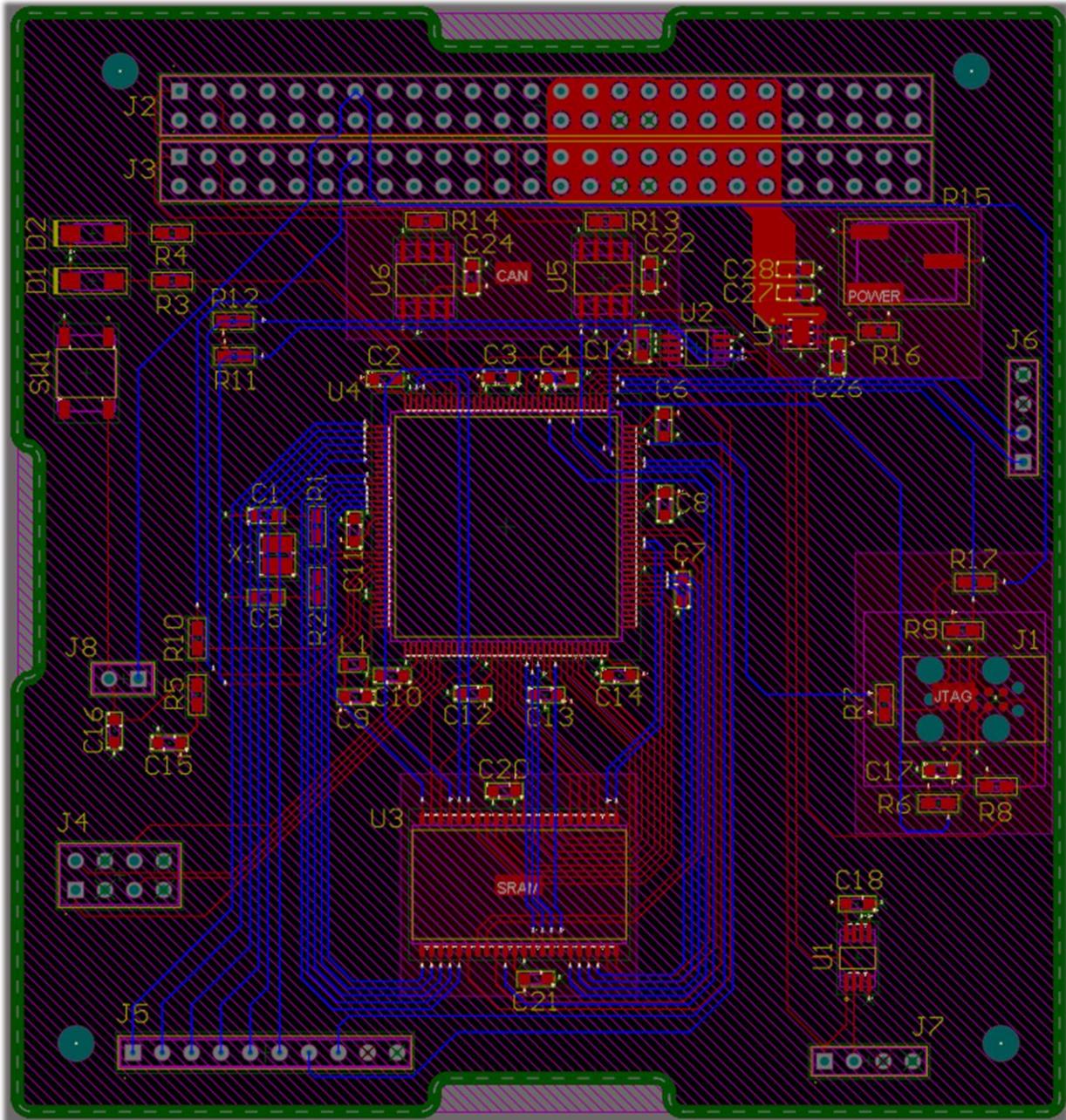


Figura 41. Conexiones en el plano bottom

A partir de fijar cómo se conectará la SRAM al resto de componentes, se pueden ir rutando el resto de elementos. Para cada uno de los puertos se buscará la forma más óptima de conectarlos. Es importante que, cumpliendo las condiciones comentadas previamente, se conecten de la forma más sencilla y corta posible.

Por ello, se ha realizado un estudio de todas y cada una de las conexiones de la SRAM respecto a la longitud de sus conexiones y al retraso asociado. Dado que las señales eléctricas sólo pueden viajar a través de conductores a una velocidad limitada, la longitud de las conexiones en el PCB afecta directamente al retraso de la señal. Cuanto más larga sea la conexión, más tarda la señal en llegar a su destino, aumentando la latencia, fenómeno que llamaremos “delay”. Por ejemplo, las señales que deben llegar al mismo tiempo pueden llegar en momentos ligeramente diferentes, provocando errores en la transmisión de datos. Para evitar esto, debemos igualar las longitudes de las pistas, consiguiendo que el retraso sea parejo para todas las conexiones. Otra opción que nos permite la herramienta es una personalización de las longitudes de las pistas, llamado en Altium “Track length tuning”.

	Delay (ps)	Length (mm)
A0	413,630	68,344
A1	394,987	65,398
A2	375,742	62,357
A3	356,172	59,264
A4	337,631	56,335
A5	203,683	35,168
A6	109,951	17,374
A7	106,410	16,815
A8	108,638	17,167
A9	109,425	17,291
A10	110,221	17,416
A11	110,997	17,540
A12	189,127	32,868
A13	193,694	33,590
A14	310,334	49,039
A15	330,298	52,194
A16	294,938	49,588
A17	320,743	53,666
A18	340,566	56,798
D0	325,571	51,447
D1	329,183	52,018
D2	547,350	86,493
D3	565,680	92,371
D4	186,135	32,395
D5	187,076	32,544
D6	187,708	32,644
D7	185,873	32,354
D8	164,162	25,941
D9	177,471	28,044
D10	191,115	30,200
D11	204,379	32,296
D12	227,660	35,975
D13	262,246	41,440
D14	280,033	44,251
D15	297,984	47,088
NOE	367,592	61,069
NBL0	273,226	46,157
NBL1	286,445	48,246
NWE	617,317	97,549
NE1	518,710	84,949

Tabla 4. Longitudes y respectivos retrasos de señal de las conexiones de la SRAM

A pesar de esto, para nuestro caso no será necesario utilizar estas técnicas, ya que el máximo retraso de señal que se nos permite es de 1 ns (10^{-9} s). Como se puede observar en la Tabla 3, ninguna de nuestras conexiones supera ese nivel de retraso, por lo que no incumplimos inconveniente alguno en dicho rutado.

En las siguientes figuras se adjunta el resultado en tres dimensiones del diseño final del rutado que nos queda en la placa, tanto para el plano superior como en el inferior:

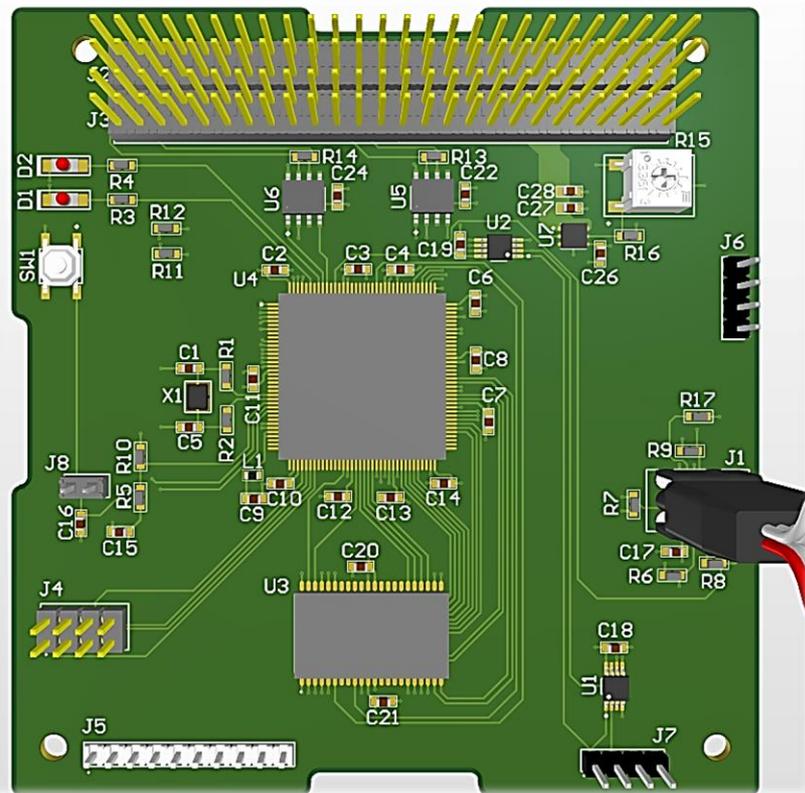


Figura 42. Vista 3D de las conexiones y componentes del plano top

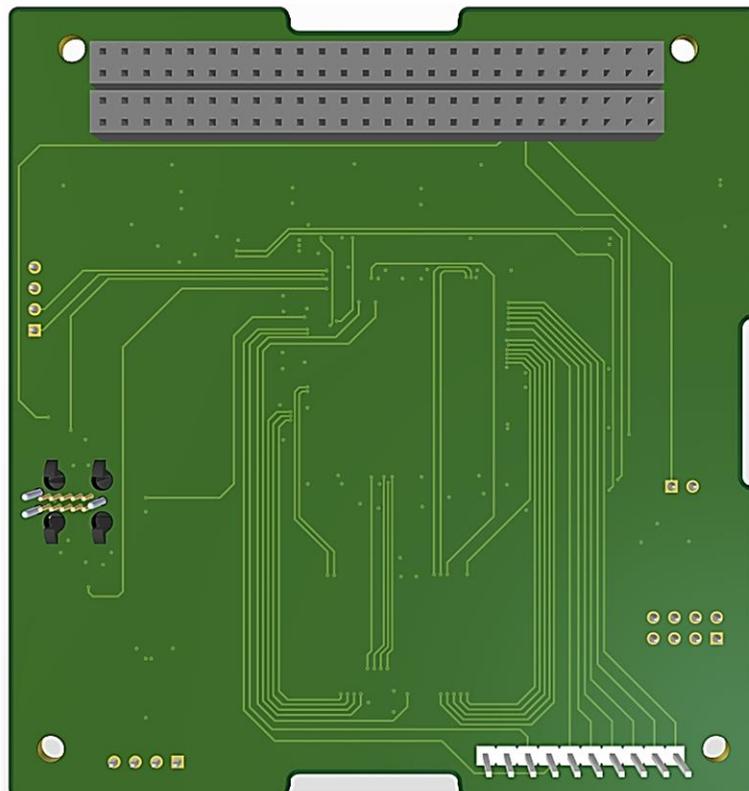


Figura 43. Vista 3D de las conexiones en el plano bottom

4.10 Verificación del diseño

Por último, una vez tengamos todos los puertos conectados y el diseño de las pistas totalmente cerrado, habrá que realizar la verificación del mismo, a través de la herramienta conocida como “Design Rule Check”, para asegurar que todas las reglas de diseño se cumplan y que no haya cortocircuitos ni discontinuidades. Para ello: Tools – Design Rule Check – Run Design Rule Check. Esto nos ofrecerá un reporte de mensajes en caso de que ocurriera algún error.

Para nuestra placa, al generar la revisión del diseño respecto a las reglas impuestas, esta herramienta detallará los errores e increpacias que encuentre tanto en las huellas como en el rutado de las mismas. Gran parte de los errores se repiten, por lo que a continuación se recogerán los que nos han aparecido y la solución propuesta para su corrección:

- “Clearance Violation”: este error nos aparece cuando la distancia entre dos elementos, ya sean pistas, vías o huellas de componentes, es menor que el valor mínimo especificado en las reglas de diseño.
Como solución al mismo, simplemente bastará con separar o redistribuir las zonas conflictivas en las que nos aparece que interfieren dos o mas componentes entre sí.
- “Minimum Annular Ring”: ocurre cuando el anillo anular de una vía o de un componente de tipo through hole es más pequeño que el tamaño mínimo especificado en las reglas de diseño. El anillo anular es la distancia entre el borde del agujero y el límite exterior del pad.
- “Minimum Solder Mask Sliver”: cuando una sección de la máscara de soldadura es más estrecha que el valor mínimo especificado. La máscara de soldadura es una capa protectora que evita que el estaño se adhiera a áreas no deseadas durante el proceso de soldadura.
- “Silk to Solder Mask Clearance Constraint”: este error ocurre cuando el serigrafiado (silkscreen) está demasiado cerca o se superpone con la máscara de soldadura. El serigrafiado se utiliza para imprimir texto y gráficos en la PCB, y no debe interferir con las áreas de soldadura para evitar problemas durante la fabricación y ensamblaje. Este error nos aparece en mayor parte en las capacidades, por tanto modificaremos la huella en la librería para que se corrija de forma generalizada.

En estos tres últimos casos, se ha optado por modificar los valores de las reglas de diseño. Es decir, hemos tenido que reducir los límites mínimos que se escogieron en el Capítulo 4.3 del trabajo. De esta forma, se admiten valores más estrechos tanto de los anillos como de las máscaras de soldadura.

4.11 Generación de outputs en Altium Designer

La generación de archivos Gerber es uno de los pasos definitivos en el proceso de diseño de PCB en Altium Designer. Estos archivos contienen toda la información necesaria para que los fabricantes puedan fabricar el PCB de acuerdo con las especificaciones que se han diseñado. El proceso comienza preparando el proyecto para asegurarse de que esté completamente terminado y verificado. Esto incluye verificar las conexiones eléctricas, validar el diseño contra las reglas de diseño (el comentado Design Rule Check) y verificar que todos los componentes estén ubicados y conectados correctamente.

Estos archivos Gerber será importante que incluyan tanto los archivos de las capas, que contienen los trazos y pads de las capas de cobre del PCB máscaras de soldadura y el serigrafiado, así como los archivos de perforaciones, que definen los agujeros a realizar sobre la placa y las características mecánicas de la misma. De esta forma se transmite la información a las máquinas de perforación CNC, especificando el tamaño y la ubicación de los agujeros o contornos a perforar.

5 CONCLUSIONES

La electrónica no solo nos permite alcanzar las estrellas, sino también entenderlas. Es la herramienta que nos permite desentrañar los misterios del cosmos.

EDWIN HUBBLE

Tal y como se ha podido observar a lo largo de esta memoria, se ha llevado a cabo un enriquecedor estudio sobre las normativas de implementación de tarjetas impresas en aplicaciones aeroespaciales, así como un extenso desarrollo de la carga útil adecuado a la propuesta de la Misión Alpha. Se realiza en ella un análisis detallado de las normativas vigentes, incluidas las normas internacionales reconocidas por la European Cooperation for Space Standardization (ECSS), la AS9100 y el IPC, lo que permitió comprender los requisitos técnicos específicos para las tarjetas impresas en estos entornos.

En este estudio, se afrontaron varios desafíos a los que hacer frente, tales como la importancia de cuales y cuantos componentes elegir, una adecuada colocación en la placa y, las conexiones correspondientes. Destacar momentos en los cuales se comprobó la necesidad de añadir un sensor de temperatura más al sistema. Esto fue clave ya que, el principal objetivo del proyecto quedaba obsoleta con la utilización de un único sensor. De esta forma, se obtienen medidas más precisas de las distintas zonas de la placa. Permitiendo así, la detección de las zonas más solicitadas o conflictivas en términos de la temperatura.

Tras esto, el proceso más complejo a realizar ha sido la colocación de componentes y posterior rutado. Este último, tomó de numerosas iteraciones hasta alcanzar un diseño eficiente y de la forma más sencilla dentro de lo posible. Para el rutado, se consideró comenzar a conectar los componentes principales con mayor número de pines y de esta forma, evitar complejidad en las conexiones posteriores. Este proceso se llevo a cabo de forma fluida pero, a medida que restaban menos conexiones por unir, aumentaba la dificultad. Es, en este momento, cuando el proyecto adquirió mayor complejidad aunque, tras varios intentos y propuestas, se logró alcanzar un diseño adecuado a las características y condiciones impuestas. Finalmente, se obtuvo la solución deseada que, tras cumplir y superar todo lo comentado previamente,

Además, se exploraron los desafíos únicos de la industria aeroespacial, como la fiabilidad, la resistencia a las condiciones extremas de temperatura, vibración y radiación. Se evaluaron tecnologías y materiales avanzados para el diseño y fabricación de tarjetas impresas, lo que proporcionó una base sólida para el desarrollo de la carga útil.

El diseño y desarrollo de la tarjeta impresa se realizó utilizando Altium Designer, una herramienta líder en la industria para el diseño de placas de circuitos impresos. Esta experiencia permitió adquirir habilidades prácticas en el diseño de PCBs y familiarizarse con una herramienta esencial en la industria aeroespacial.

5.1 Líneas Futuras

Para futuras investigaciones, este trabajo puede servir como motivación para explorar nuevas áreas de estudio y mejoras en los diseños de PCB para aplicaciones aeroespaciales. Además, los conocimientos adquiridos en este proyecto pueden ser de gran utilidad para el diseño completo del CubeSat, es decir, para el desarrollo del resto de PCBs necesarias para la misión.

Se pueden investigar nuevas tecnologías y materiales para mejorar el rendimiento y la fiabilidad de las tarjetas impresas en entornos aeroespaciales. Además, se puede explorar la integración de sistemas de comunicación avanzados y sensores adicionales para mejorar las capacidades del CubeSat.

Una de las áreas de mejora es el uso de materiales avanzados y técnicas de fabricación. Los PCB deben ser fabricados con materiales que puedan soportar las extremas variaciones de temperatura y las intensas radiaciones presentes en el espacio. Materiales como los polímeros de alto rendimiento y los compuestos cerámicos están siendo investigados para proporcionar mayor estabilidad térmica y resistencia a la radiación [31].

Además, la miniaturización y el aumento de la densidad de los componentes son tendencias clave. La capacidad de integrar más funcionalidad en un área más pequeña permite la creación de satélites más pequeños y ligeros, lo cual es esencial para las misiones espaciales que buscan minimizar costos y maximizar el rendimiento. Los avances en tecnologías de fabricación de alta precisión permiten la producción de PCBs con trazos más finos y una mayor cantidad de capas, mejorando así la capacidad y la fiabilidad de los dispositivos electrónicos en el espacio [32]. A corto plazo, ya se están llevando a cabo prototipos de PCB flexibles, las cuales pueden suponer un aspecto muy considerable en la fabricación y diseño de las tarjetas impresas, ofreciendo multitud de nuevas oportunidades e implementaciones.

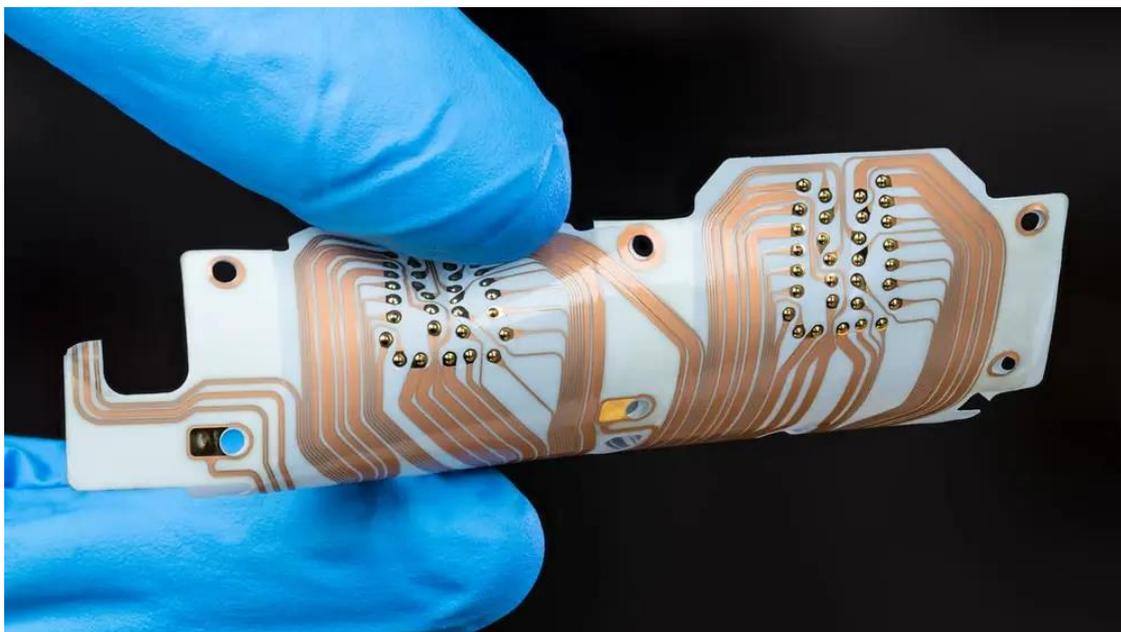


Figura 44. Prototipo de PCB flexible

El mundo de la investigación aeroespacial y el uso de nanosatélites promete ser emocionante y lleno de oportunidades innovadoras. Estos diminutos dispositivos espaciales están revolucionando la forma en que exploramos y utilizamos el espacio, ofreciendo una plataforma versátil y rentable para una amplia gama de aplicaciones, como son las destacadas en este estudio.

Otra mejora significativa se encuentra en el diseño y la estructura de los PCB. Se están desarrollando técnicas de diseño que minimizan los efectos de las vibraciones y los choques que ocurren durante el lanzamiento y las operaciones en el espacio. Esto incluye el uso de sistemas de amortiguación y la optimización del diseño de las

capas del PCB para distribuir las tensiones mecánicas de manera más uniforme.

En primer lugar, se espera que la investigación espacial continúe avanzando hacia una mayor comprensión del universo y de nuestro propio planeta. Los nanosatélites proporcionan una herramienta valiosa para llevar a cabo misiones científicas en áreas como la observación de la Tierra, la monitorización del clima y la investigación espacial. Su tamaño compacto y su relativo bajo costo permiten el despliegue de constelaciones de nanosatélites para una cobertura global y más accesible.

Cabe destacar también el auge en el uso de nanosatélites en la industria espacial comercial. Empresas privadas están utilizando estos dispositivos para ofrecer servicios de comunicaciones, imágenes de la Tierra de alta resolución, monitoreo de recursos naturales y más. Se espera que esta tendencia continúe creciendo, con un aumento en la demanda de nanosatélites y una mayor competencia en el mercado espacial.

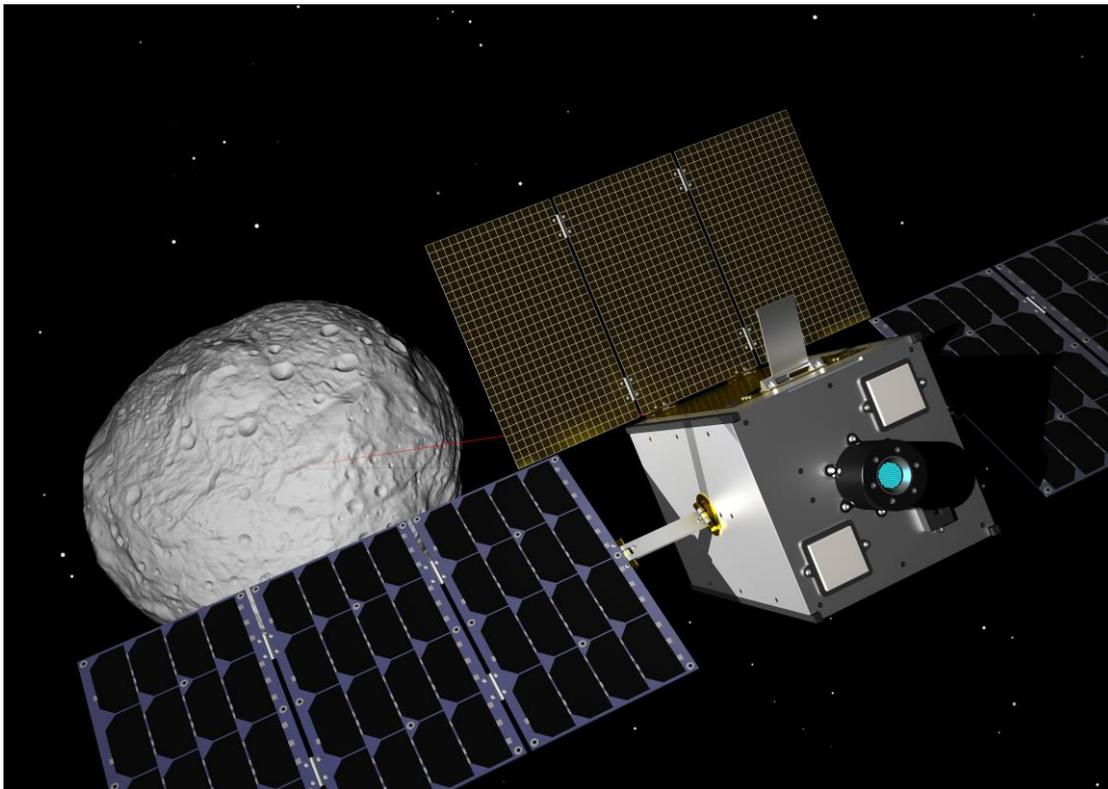


Figura 45. Prototipo del CubeSat M-ARGO

Para finalizar, este trabajo proporciona una base sólida para el diseño y desarrollo de tarjetas impresas en aplicaciones aeroespaciales, y ofrece oportunidades para futuras investigaciones y mejoras en esta área crucial de la ingeniería espacial. Los conocimientos adquiridos y las lecciones aprendidas en este proyecto pueden ser de gran utilidad para futuras misiones espaciales y proyectos de investigación en el campo de la exploración espacial.

Por todo esto, es de gran valoración por parte del autor, la oportunidad ofrecida a la hora de realizar este proyecto. El cual, aparte de cumplimentar una solución al problema propuesto al comienzo de esta trayectoria, ha servido como una detallada y completa formación en la materia, en un papel que se sitúa en una alta demanda actualmente, y que se espera continúe en alza durante las décadas venideras.

ANEXO A

IMPLEMENTACIÓN FÍSICA EN ALTIUM DESIGNER

Para llevar a cabo este proyecto, se hará uso del programa Altium Designer, el cual es un software de diseño asistido por computadora (CAD) ampliamente utilizado en la industria electrónica. Está diseñado para facilitar la creación y desarrollo de circuitos electrónicos y placas de circuito impreso (PCB). Esta potente plataforma proporciona herramientas avanzadas de diseño de PCB, simulación de circuitos, gestión de componentes y una interfaz intuitiva para diseñadores e ingenieros [21]. Altium Designer es esencial para agilizar el proceso de diseño electrónico y garantizar la precisión en la creación de circuitos y PCB de alta calidad. En este anexo se explicarán los procedimientos seguidos a la hora de diseñar, crear y montar los componentes de la placa y su respectivo rutado.

A.1 Creación del Proyecto en Altium Designer

Una vez definido el modelo de placa que se va a utilizar y los respectivos componentes, se plasmarán dichas ideas en el programa Altium Designer. En primer lugar, se definen las normas que deberá cumplir nuestro PCB respecto a sus características. Estas normas se conocen como las capacidades del PCB.

Mediante el comando “Rules”, de la pestaña “Design”, se activa una ventana emergente en la cual, se implementarán las normas descritas en el capítulo 4.3. Ya completados los campos de las normas, se continuará definiendo el “Stack up” escogido en el capítulo 4.2. Esto, desde la misma pestaña anterior, “Design”, y pulsando sobre “Layer Stack Manager” nos permite editar el “Stack up” acorde a nuestras especificaciones.

Para comenzar con la creación de los componentes, deberemos agregar el documento esquemático (Schematic) donde se diseñarán cada uno de ellos. Haciendo uso de la ficha de datos (Datasheet) de los componentes se pueden crear los esquemáticos de cada componente, asociándoles la forma y el número de pines tal y como se nos muestra en la ficha.

Esta serie de esquemáticos deberemos reunirlos en una “Schematic Library”, donde posteriormente podremos compilarlos para asociarles las huellas.

A.1.1 Creación del Microcontrolador

Como se ha explicado previamente, y, con ayuda de la ficha de datos, es esencial definir claramente los requisitos y especificaciones del microcontrolador antes de comenzar cualquier diseño. Esto incluye considerar la arquitectura del microcontrolador, sus funciones requeridas, los periféricos necesarios y los requisitos eléctricos.

La etapa inicial del diseño implica crear un esquemático que representa el circuito eléctrico del microcontrolador. Aquí, se agregan símbolos que representa el bloque funcional del microcontrolador y los pines correspondientes. En nuestro caso, se deben añadir los 144 pines que forman el tipo de microcontrolador escogido, el LQFP144. A su vez, se define la función de cada uno de ellos, tal y como se describe en el datasheet del componente.

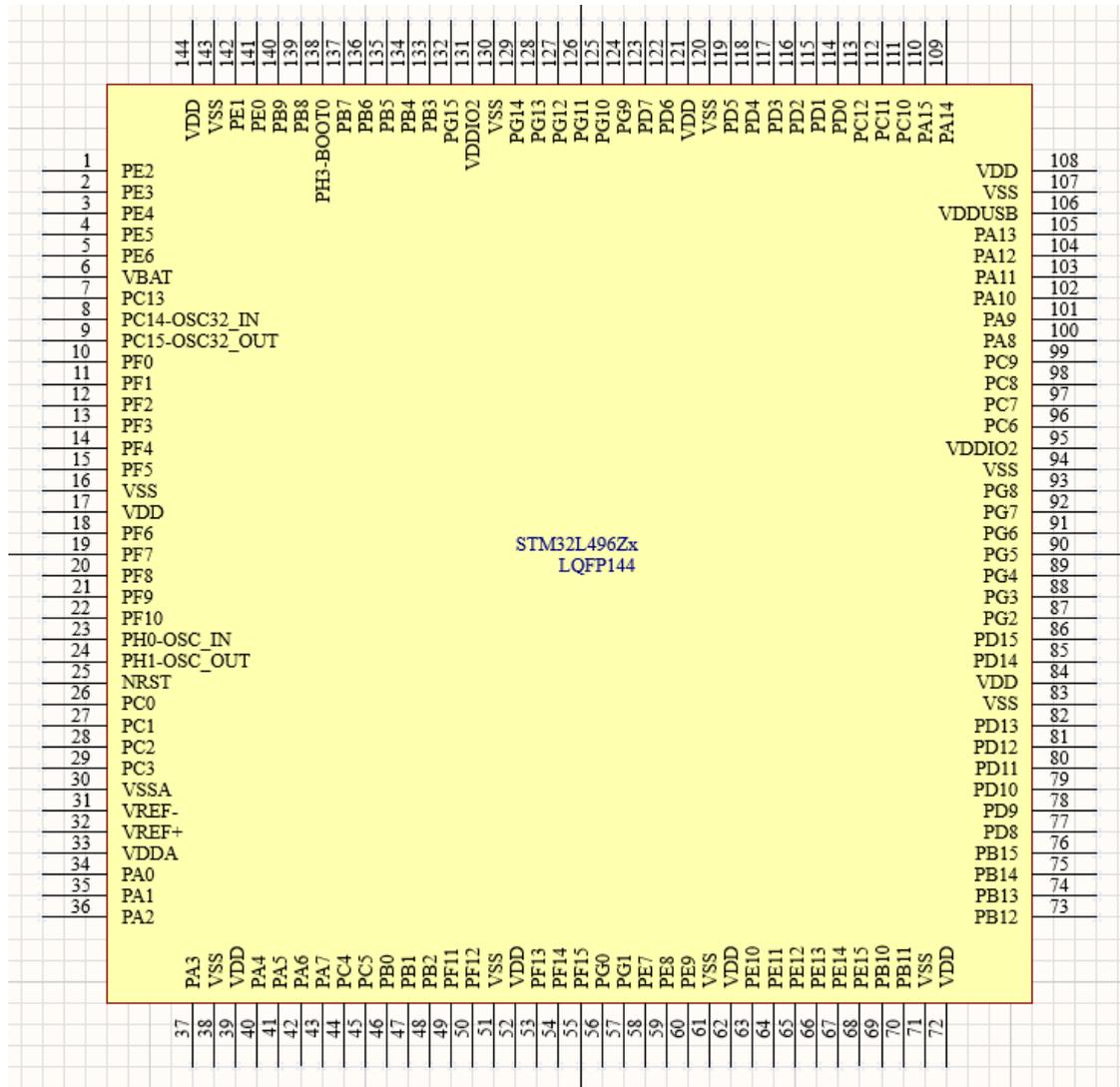


Figura 46. Esquemático del microcontrolador, LQFP144

Con los esquemáticos de cada componente, el siguiente paso será crear las huellas de cada uno y asociarlas respectivamente. Cada componente en el esquemático debe tener una huella asociada que describa su disposición física en la placa de circuito impreso (PCB). Esto es esencial para el diseño posterior de la PCB. Para realizar las huellas debemos generar una “PCB Library”, donde seleccionaremos las medidas, capas y elementos que constituirán la forma física de nuestros componentes. Para ello, nuevamente tendremos que tener presente las indicaciones de la ficha de datos, en la que se nos describirán todas y cada una de estas magnitudes.

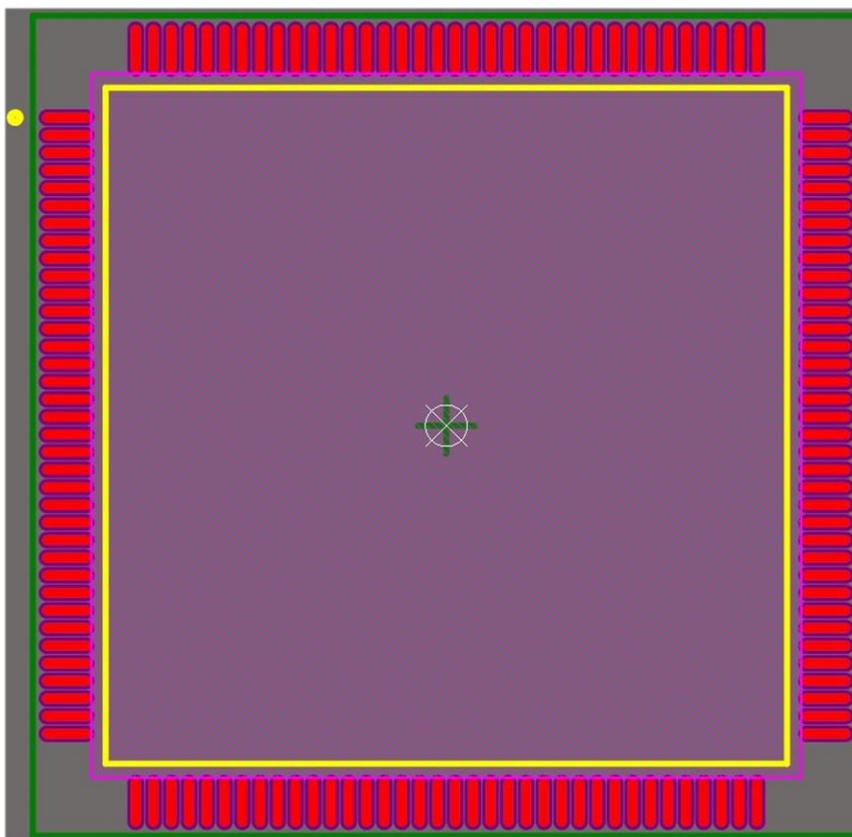


Figura 47. PCB del microcontrolador, LQFP144

Además de las huellas para la PCB, es importante crear modelos 3D precisos para representar físicamente los componentes en el diseño. Estos modelos 3D se asocian con las huellas de los componentes para asegurar que coincidan con la disposición física real.

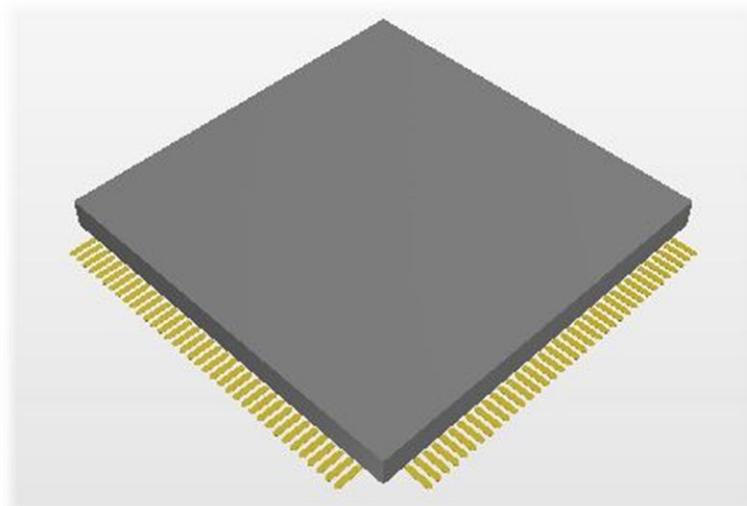


Figura 48. Representación 3D del microcontrolador, LQFP144

Por último, se compilan ambas librerías, la “Schematic Library” y “PCB Library”, para poder implementar los componentes al PCB. El hecho de compilar las librerías en Altium Designer es un proceso esencial para optimizar y acelerar el diseño de placas de circuito impreso (PCB). Los beneficios incluyen una mayor eficiencia en el diseño, la reducción de errores, la portabilidad de datos, una mejor gestión de versiones y un rendimiento mejorado del software. También garantiza la coherencia y la

integridad de los datos de diseño, facilita la colaboración en equipo y mejora la experiencia de diseño en Altium Designer.

Una vez completado el diseño, se realiza una revisión exhaustiva para garantizar que todas las conexiones sean correctas y que los modelos 3D estén asociados correctamente. Se ejecutan comprobaciones de reglas de diseño y se verifica la precisión de las huellas, conexiones y modelos 3D, tales como validar que cada pin del modelo PCB se corresponda con su respectivo pin y función que se describe en el esquemático.

A.1.2 Creación de la SRAM, CAN, Sensor de Temperatura y conector.

Al igual que en el apartado anterior, se repetirá el mismo proceso de creación para el resto de componentes, creando los símbolos esquemáticos que representan gráficamente estos elementos en el esquemático del proyecto. Estas representaciones incluyen pines, conexiones eléctricas y propiedades para definir adecuadamente el componente. Estos símbolos son esenciales para construir el diseño esquemático de manera precisa. De la misma forma, gracias a la ficha de datos, se deben añadir el número de pines que nos describen:

- El conector debe tener 52 pines.
- El sensor de temperatura consta de 8 pines.
- El transceptor CAN tiene 8 pines.
- La Static RAM escogida está formada por 44 pines.

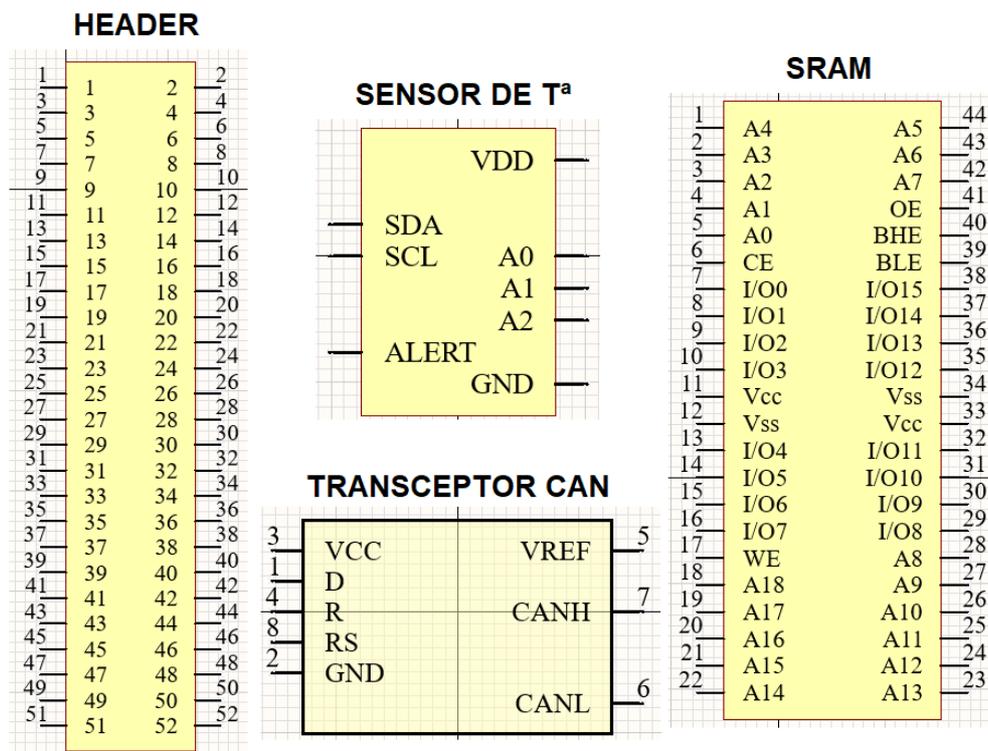


Figura 49. Esquemáticos de los componentes principales

La siguiente fase implica la creación de huellas (footprints), que son las representaciones físicas de cómo se verán los componentes en la PCB. Esto incluye la disposición de los pads, orificios de montaje y otros detalles físicos que aseguran que el componente se conecte correctamente en la placa.

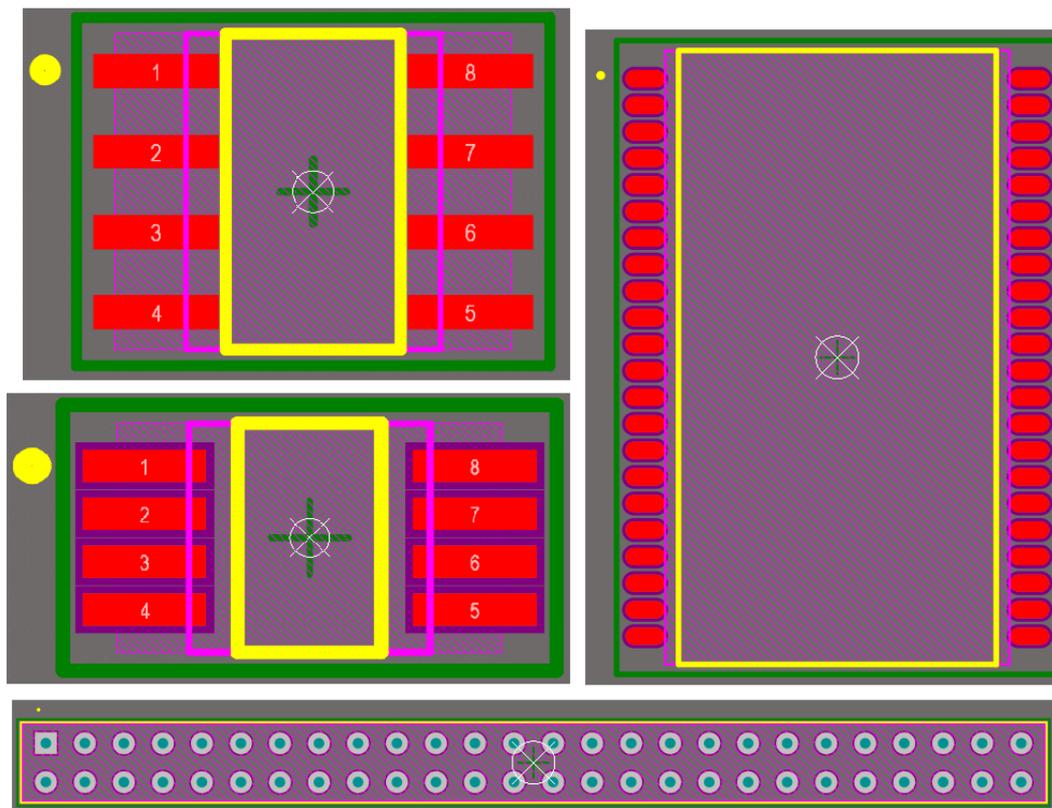


Figura 50. Huellas de los componentes principales

Finalmente, se deben crear modelos 3D que proporcionen una representación tridimensional de los componentes. Estos modelos 3D permiten una visualización precisa de cómo se verán los componentes en el entorno de la PCB, lo que es esencial para la verificación del diseño y la detección de posibles problemas de montaje.

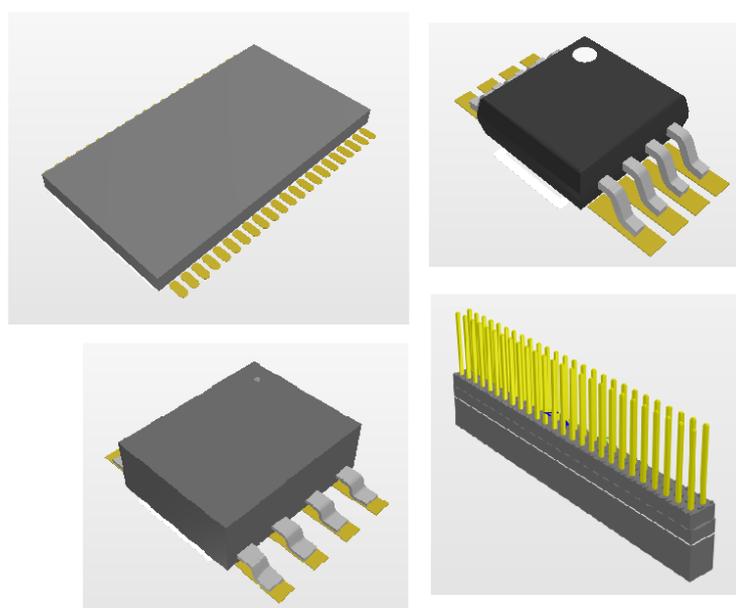


Figura 51. Representación 3D de los componentes principales

A.2 Floorplanning

Una vez definidos los esquemáticos y, con la creación de todos los componentes y la base de la placa, en la pestaña “Design”, haciendo click en “Update PCB Document” se cargarán todas las huella de los componentes que utilizamos en nuestro PCB.

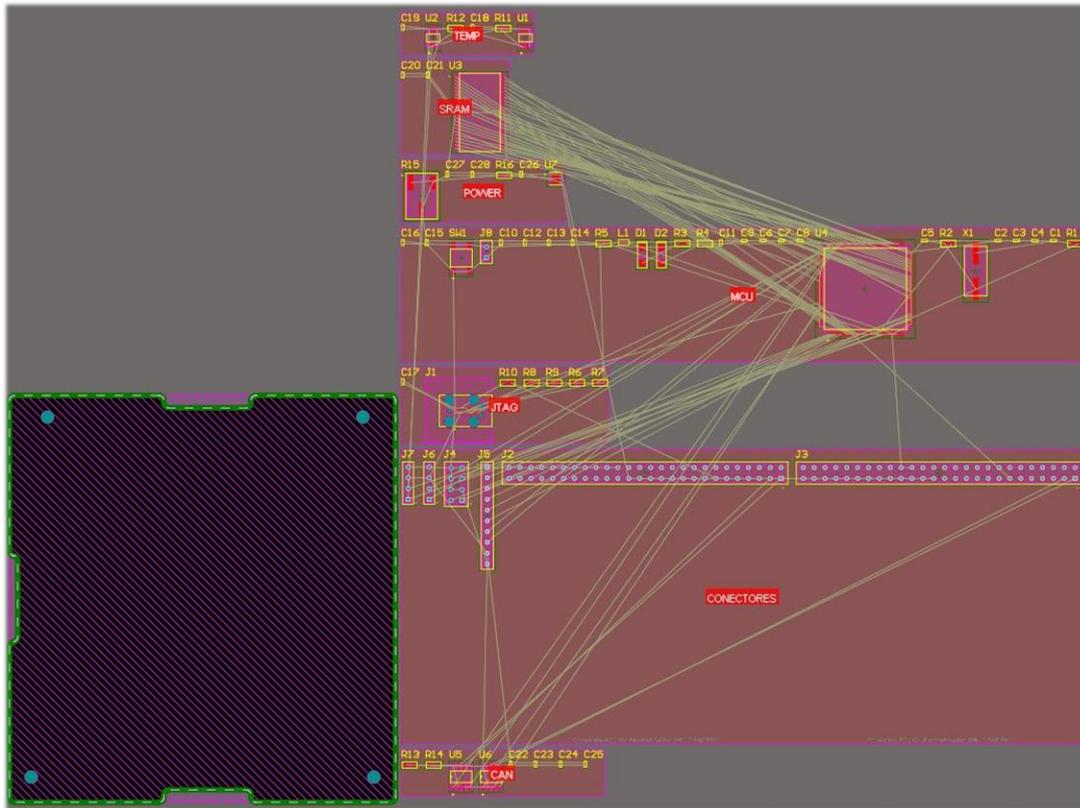


Figura 52. Integración de los componentes en el PCB

Una vez hecho esto, se nos muestran todos los componentes que hemos creado y diferenciado por esquemáticos, comprobando así los beneficios respecto al orden que nos ofrece haberlos separado por esquemático.

Todo esto, junto a la definición de las capas y las reglas de diseño explicadas durante el proyecto, nos permite comenzar a colocar los componentes en la misma. Simplemente deberemos pinchar en el elemento y arrastrarlo a la zona en la que queremos situarlo.

Tras varias iteraciones sobre las posiciones de los componentes, tal y como se ha explicado en el Capítulo 4.7, el floorplanning del proyecto quedará finalmente:

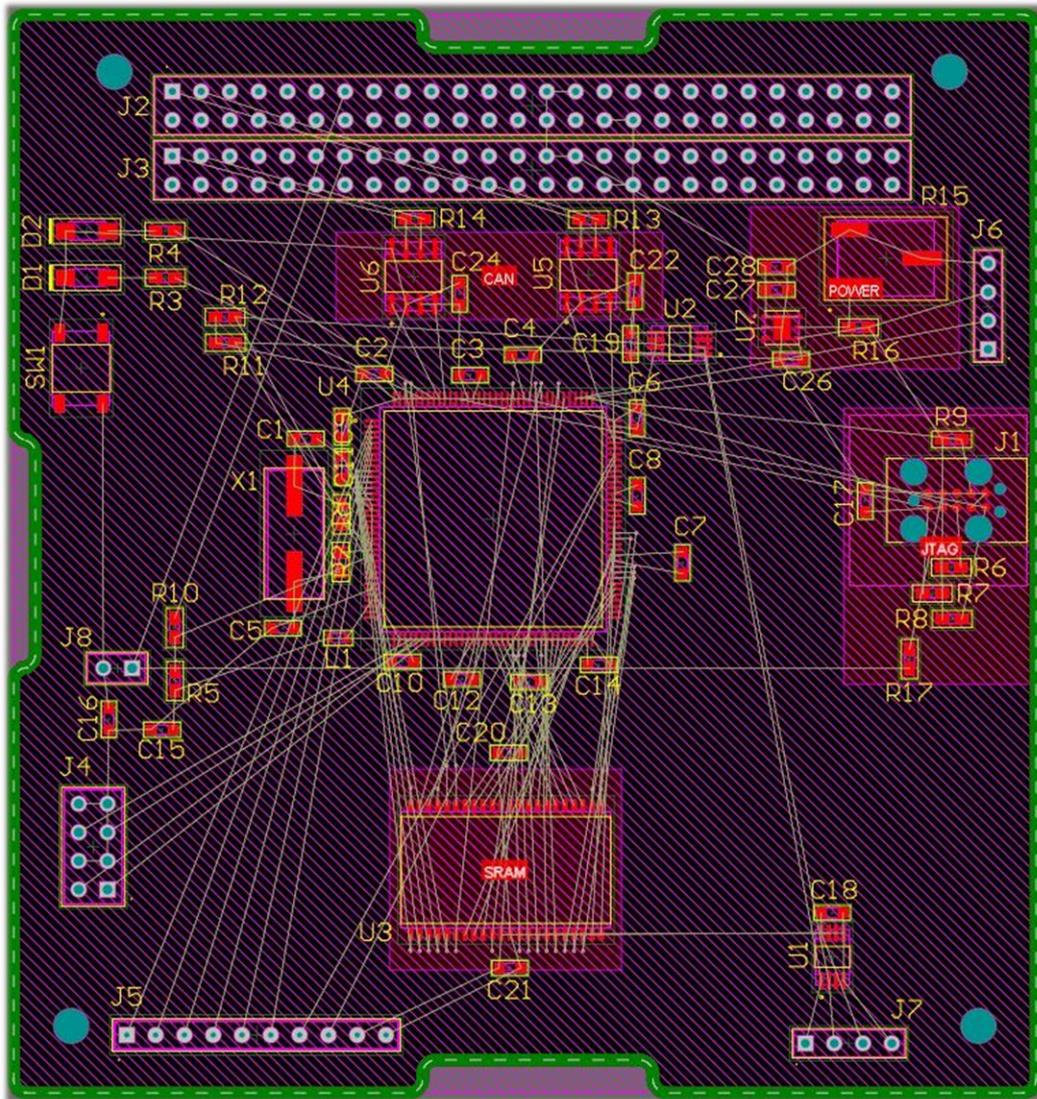


Figura 53. Posicionamiento definitivo de los componentes

A.3 Rutado

En esta vista del PCB se aprecian unas líneas rectas, estos segmentos indican cómo se conectan los puertos de cada uno de los componentes entre sí, por tanto nos sirven como guía a la hora de realizar el rutado. Pulsando la tecla Alt y colocando el cursor encima de cualquier componente, se nos resalta la ruta que debe seguir y dónde debe ir conectado. Una vez se coloquen las pistas del rutado, nos resaltarán la misma pista que conecta ambos puertos.

Una condición importante a la hora de situarlos en la placa es asegurarnos de que todos los elementos de un mismo esquemático deben estar contenidos en el “Room Definition” del mismo. Si esto no se cumple, posteriormente a la hora de validar el PCB, pueden aparecer errores.

Con todos los componentes situados tal y como se observa en la Figura 53, podemos comenzar el rutado de la placa. Como hemos comentado previamente en el desarrollo del trabajo, para nuestro caso hemos comenzado rutando la memoria ya que es el componente que más conexiones mantiene con el microcontrolador.

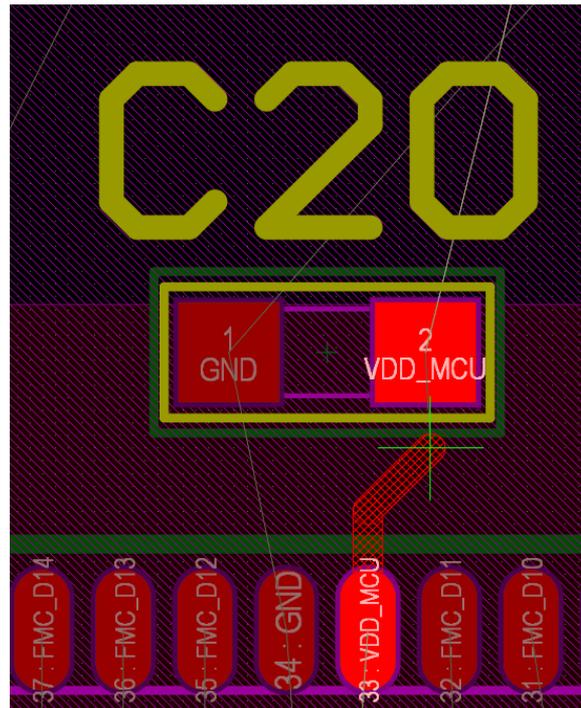


Figura 54. Ejemplo de enrutamiento de pista

Para enrutar, pulsamos “ctrl+W” y pinchamos en el puerto del que queremos tirar la ruta. El cursor cambiará a una cruz y dispondremos desde el mismo la línea que nos guía al puerto que recibe la pista. Por tanto, deberemos tomar la ruta más óptima y breve que nos sea posible. Este proceso constará de varias iteraciones hasta encontrar la forma más adecuada para que todos los componentes de nuestra placa queden conectados.

Si queremos cambiar de capa, simplemente debemos seleccionarla en el menú inferior y pulsar de nuevo “ctrl+W”. Debemos tener en cuenta que todos los componentes de nuestra placa están situados en el plano superior, por lo que, si queremos rutar en el plano inferior, tendremos que colocar una vía. Para ello, mientras estamos colocando la pista, al pulsar la tecla “2” directamente nos añade una vía en el extremo de la misma. Otra opción es buscar en la barra de herramientas “Place - Pad” para colocarla donde deseemos. Si el componente es de tipo Through hole no será necesario colocar una vía, ya que podemos comenzar a rutar en cualquiera de ambas superficies.

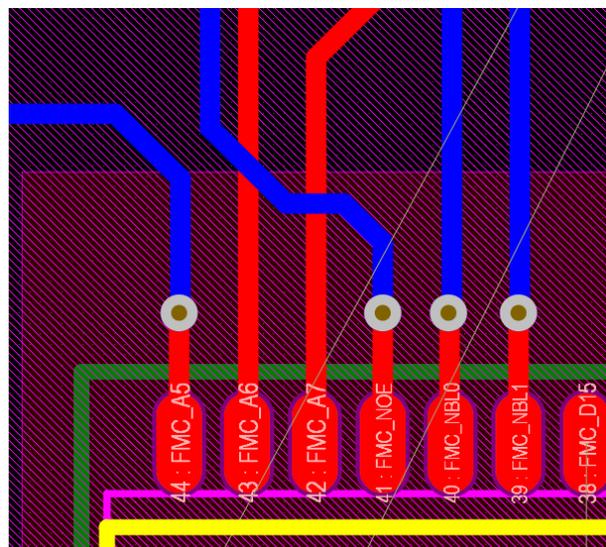


Figura 55. Implementación de vías y cambios de plano

Es, en estos momentos, donde se aprecian los beneficios de poder rutar en placas multicapas, ya que permite mucha versatilidad y una importante optimización de las conexiones y de las rutas tomadas. Así se ahorran cruces e interferencias no deseados, aparte de que sería prácticamente imposible realizar todo el rutado en una misma capa.

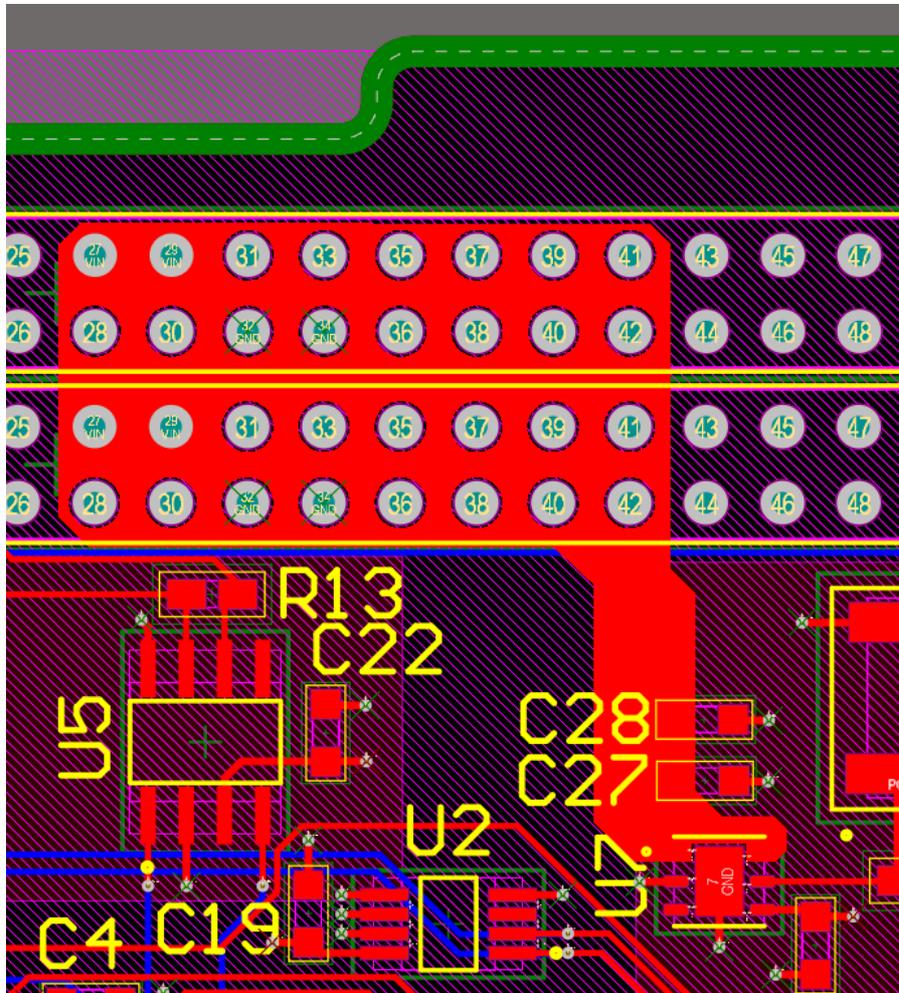


Figura 56. Plano que unifica la tensión de entrada

Una opción bastante útil a destacar y que facilita el enrutamiento es la implementación de planos de conexión, ya que nos permiten conectar múltiples pines iguales a la misma red. Para crear este polígono haremos uso de la herramienta “Poligon Pour” y, para nuestro caso, seleccionaremos que la red que queremos unificar es la tensión de entrada VIN.

Luego, dibujaremos el contorno del polígono en el área deseada de la placa, cubriendo todas las zonas que necesitan conectarse a VIN. Una vez dibujado, suavizando los bordes cuidando que no hagan esquinas de 90°, el polígono se llena automáticamente con la red VIN.

La utilización de un plano para unificar los pines de tensión de entrada mejora significativamente la distribución de energía, reduce el ruido y por supuesto, facilita el enrutamiento al proporcionar una conexión más sencilla para múltiples pines.

REFERENCIAS

- [1] Misión Alpha | <https://misionalpha.com/>
- [2] Peter Fortescue, Graham Swinerd and John Stark, *Spacecraft systems engineering*, 2011
- [3] CubeSat Design Specification Rev. 14.1 | *The CubeSat Program*, California Polytechnic State University, 2022
- [4] P-POD MK. III Rev. E User Guide | *The CubeSat Program*, California Polytechnic State University, 2014
- [5] Sputnik, el satélite pionero | El español, https://www.lespanol.com/el-cultural/ciencia/entre_2_aguas/20171006/sputnik-satelite-pionero/252226170_0.html
- [6] Guía básica de nanosatélites | Alén Space, <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>
- [7] S Lee, A Hutputanasin, A Toorian, W Lan, R Munakata, J Carnahan, D Pignatelli and Arash Mehrparvar. CubeSat Design Specification Rev. 13 | *The CubeSat Program*, California Polytechnic State University, 2014
- [8] Tecnologías basadas en CubeSat para la detección remota basada en el espacio | TS2 Space SP, <https://ts2.space/es/tecnologias-basadas-en-cubesat-para-la-deteccion-remota-basada-en-el-espacio/>
- [9] Landeta P, Olmedo F and Fernández E | *Análisis y simulación del comportamiento térmico del sistema integrado, estructura y componentes electrónicos del prototipo del satélite Cubesat*, 2014
- [10] NASA CubeSat Launch Initiative | *CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers*, 2017
- [11] Jorge Enrique Herrera, Diego Francisco Ledezma, Guadalupe Maribel Hernández, Patricia del C. Zambrano, Jorge Alfredo Ferrer, Bárbara Bermúdez. *Diseño Estructurañ de un Sistema CubeSat con Recubrimiento de Barrera Térmica*, 2015
- [12] STMicroelectronics. DS11585 Rev. 17 | *STM32L496xx Datasheet*, 2022
- [13] Texas Instruments. SLOS3460 | *SN65HVD23x 3.3-V CAN Bus Transceivers Datasheet*, 2018
- [14] Cypress Semiconductor Corporation. 38-05445 Rev. *S | *CY62157EV30 MoBL Datasheet*, 2020
- [15] Analog Devices. 19-4385 Rev. 2 | *LM75 Datasheet*, 2021
- [16] LibreCube Board Specification | LibreCube, https://librecube.gitlab.io/standards/board_specification/
- [17] PCB Manufacturing & Assembly Capabilities | JLCPCB, <https://jlcpcb.com/capabilities/pcb-capabilities>
- [18] Stackup for Multi-layer laminated structures | PCB Way, <https://www.pcbway.com/multi-layer-laminated-structure.html>
- [19] ECSS-E-ST-70-01C Space project management - Configuration and information management | European Cooperation for Space Standardization (ECSS), <https://www.altium.com/es/altium-designer>
- [20] ESA Standards Portal | Agencia Espacial Europea (ESA), <https://escies.org/standards>
- [21] Altium Designer, <https://www.altium.com/es/altium-designer>

- [22] AS9100/AS9100D | NQA Global Certification Body, <https://www.nqa.com/en-us/certification/standards/as9100>
- [23] Guía completa sobre como determinar los productos de clase IPC | WellPCB Technology, <https://placapcb.com/clase-IPC.html>
- [24] Señal diferencial | Wikipedia, https://es.wikipedia.org/wiki/Señal_diferencial
- [25] Principios de pares diferenciales - Parte 1 | Altium Limited, <https://resources.altium.com/es/p/principios-de-pares-diferenciales-parte-1>
- [26] Regulador de tensión | Wikipedia, https://es.wikipedia.org/wiki/Regulador_de_tensión
- [27] PCB Design Techniques to Minimize Oscillator Phase Noise | Analog Devices Inc., <https://resources.altium.com/p/removing-noise-analog-signals-your-pcb>
- [28] Diseño de Circuitos | Electrónica Online, <https://electronicaonline.net/electronica/disenio-de-circuitos/>
- [29] SMD Component Sizes | Surface Mount Technology Association (SMTA), <https://www.ultralibrarian.com/2024/01/25/smt-components-size-chart-what-to-know-ulc>
- [30] First test campaigns completed at the new CubeSat Support Facility | Agencia Espacial Europea (ESA), https://www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite/First_test_campaigns_completed_at_the_new_CubeSat_Support_Facility
- [31] Cadence PCB Design Blog - Challenges for Electronic Circuits in Space Applications (Cadence PCB Design & Analysis), <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2023-challenges-for-electronic-circuits-in-space-applications>
- [32] NASA | Assurance Methods used for NASA PCBs, <https://nepp.nasa.gov/index.cfm/27505>
- [33] NASA | Lunar Flashlight, <https://www.nasa.gov/mission/lunar-flashlight/>
- [34] ESA | The future, by the box: 10 years of ESA Technology CubeSats, https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/The_future_by_the_box_10_years_of_ESA_Technology_CubeSats
- [35] ESA | M-Argo: ESA's asteroid-targeting CubeSat, https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2021/02/M-Argo_ESA_s_asteroid-targeting_CubeSat

GLOSARIO

UHF: Ultra High Frecuency	III
VHF: Very High Frecuency	III
NASA: National Aeronautics and Space Administration	3
ECSS: European Cooperation for Space Standardization	7
IPC: Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits	7
PCB: Printed Circuit Board	7
SRS: Software Requirements Specification	14
RAM: Random Access Memory	17
SRAM: Static Random Access Memory	17
LCD: Liquid Crystal Display	19
ADC: Analog to Digital Converter	19
SPI: Serial Peripheral Interface	19
USART: Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter	19
UART: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	19
USB: Universal Serial Bus	19
SAI: Serial Audio Interface	19
SDMMC: Secure Digital Multimedia Card	19
VDD: Voltage Drain Drain	20
LDO: Low Dropout Regulator	20
DAC: Digital to Analog Converter	20
SMPS: Switched Mode Power Supply	20
RTC: Real-Time Clock	20
MCU: Microcontroller Unit	20
DSP: Digital Signal Processor	20
DRAM: Dynamic Random Access Memory	21
TSOP: Thin Small Outline Package	21
BGA: Ball Grid Array	21
I ² C: Inter-Integrated Circuit	23
ESA: European Space Agency	28
SMD: Surface Mount Device	28
CAD: Computer-Aided Design	34