
Reingeniería de la placa de expansión para el agente robótico Pololu 3pi+

Luis Pedro González Pérez



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Reingeniería de la placa de expansión para el agente robótico
Pololu 3pi+**


Trabajo de graduación presentado por Luis Pedro González Pérez para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
M.Sc. Miguel Enrique Zea Arenales

(f) 
M.Sc. Carlos Alberto Esquit Hernández

Fecha de aprobación: Guatemala, 28 de noviembre de 2025.

Agradezco profundamente a mi familia, especialmente a mis padres, a mi hermana y a mis abuelos, por acompañarme y motivarme a lo largo de estos cinco años de carrera. Gracias por su apoyo incondicional, por impulsarme a seguir adelante incluso en los momentos difíciles y por creer siempre en mí.

A mi asesor, M.Sc. Miguel Zea, por su guía, paciencia y dedicación durante el desarrollo de este trabajo de graduación. Su acompañamiento fue clave para alcanzar los resultados propuestos.

Agradezco también a Dios, porque sin su ayuda y fortaleza este logro no habría sido posible.

Finalmente, a mis amigos , tanto aquellos que me han acompañado desde el inicio como los que se sumaron en el camino, por su apoyo constante, sus palabras de ánimo y por formar parte de esta etapa tan importante de mi vida.

Prefacio	I
Índice de figuras	V
Índice de cuadros	VI
Resumen	VII
Abstract	VIII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	6
4. Objetivos	7
5. Alcance	8
6. Marco teórico	10
6.1. Robot Pololu 3pi+ 32U4	10
6.2. Microcontrolador TinyS3	11
6.3. Regulador <i>step-up</i> Pololu U3V70F5	12
6.4. Cámara OpenMV Cam H7	14
6.5. Baterías 18650 de Li-Ion y necesidad de un sistema de gestión	15
6.6. Baterías AAA alcalinas	16
6.7. Capacitores electrolíticos SMD y su función en la regulación de potencia	17
6.8. Servomotores MG90S y FT90M	18
7. Diseño eléctrico y dimensionamiento de la placa de expansión	22
7.1. Metodología	22
7.2. Selección de componentes	23
7.3. Análisis de consumo de potencia	28

7.4. Diseño electrónico de la placa de expansión	31
8. Proceso de iteración y desarrollo del diseño de la placa de expansión y base para la cámara OpenMV H7	40
8.1. Metodología	40
8.2. Diseño de base para la cámara OpenMV H7	53
9. Conclusiones	65
10.Recomendaciones	66
11.Referencias	67
12.Anexos	70
12.1. Código de validación en TinyS3	70
12.2. Listado de componentes por placa	71
12.3. <i>Pinout</i> de la placa rediseñada	72
12.4. Imágenes físicas de las iteraciones de la placa de expansión	74

Índice de figuras

1.	Placa electrónica diseñada por Álvarez para la expansión modular del robot Pololu 3pi+	4
2.	Cámara OpenMV inclinada para visualizar las líneas de la carretera	5
3.	Cámara OpenMV en posición vertical para visualizar señales de tránsito	5
4.	Robot Pololu 3pi+ 32U4	11
5.	Microcontrolador TinyS3 basado en ESP32-S3 con conectividad wifi y Bluetooth	12
6.	Vista del módulo Pololu U3V70F5 utilizado en el proyecto	13
7.	Corriente máxima continua de salida en función del voltaje de entrada	13
8.	OpenMV Cam H7	15
9.	Batería INR18650-2500A utilizada como referencia	16
10.	Batería alcalina Energizer E92 utilizada como referencia	16
11.	Capacitor Panasonic EEE-FK1C332AV utilizado como referencia	18
12.	Comparación visual de los servomotores MG90S (izquierda) y FT90M (derecha)	19
13.	Módulos elevadores de voltaje (<i>boost</i>) evaluados durante el rediseño de la placa de expansión	24
14.	Módulo BMS 1S 3A empleado para la protección de la batería	25
15.	Comparación entre servomotores MG90S y Feetech FT90M	27
16.	Diagrama general de conexiones del sistema	31
17.	Pines de expansión disponibles en la nueva placa (vista real y diagrama esquemático)	32
18.	Comparación entre la circuitería original y la circuitería depurada en el rediseño	34
19.	Esquemático original de la placa diseñada por Álvarez	35
20.	Esquemático actualizado de la nueva placa rediseñada por el autor	36
21.	Cálculo de ancho de pista para 3 A (líneas de energía principales)	37
22.	Cálculo de ancho de pista para 2.6 A (alimentación hacia el módulo <i>boost</i>)	37
23.	Cálculo de ancho de pista para 2 A (GPIO y líneas de comunicación)	37
24.	Distribución general de los componentes en la nueva placa	39
25.	Placa de referencia diseñada por Álvarez: vista 3D y esquemático original	42
26.	Primera iteración de la placa: modelo 3D y esquemático	43
27.	Segunda iteración de la placa: modelo 3D y esquemático	45

28.	Tercera iteración de la placa: modelo 3D y esquemático.	46
29.	Cuarta iteración de la placa: modelo 3D y esquemático	47
30.	Quinta iteración de la placa: modelo 3D y esquemático	48
31.	Modelos en Inventor: base del servomotor (izquierda) y base de la cámara (derecha)	53
32.	Ensamble en Inventor de la base con servomotor y cámara	54
33.	Prototipo físico montado en el Pololu 3Pi+: base en posición neutra (izquier- da) e inclinada (derecha)	54
34.	Análisis del mecanismo de cuatro barras en MotionGen	56
35.	Diseño en Inventor de la base del servomotor (versión 2)	56
36.	Montaje físico del mecanismo de inclinación sobre el Pololu 3pi+	57
37.	Análisis de esfuerzo de Von Mises para el segundo prototipo	58
38.	Análisis de desplazamiento máximo del segundo prototipo	59
39.	Modelo en Inventor de la base de la cámara (versión final)	60
40.	Modelo en Inventor de la base del servomotor (versión final)	60
41.	Prototipo final montado físicamente sobre el Pololu 3pi+	61
42.	Análisis final de esfuerzo de von Mises	62
43.	Análisis final de <i>displacement</i>	62
44.	Movimiento del mecanismo de inclinación de la cámara durante las pruebas de validación	63
45.	Distribución y asignación de pines (<i>pinout</i>) en la placa rediseñada	73
46.	Versión V0 de la placa de expansión diseñada y fabricada por Álvarez	75
47.	Versión V1 de la placa de expansión	75
48.	Versión V2 de la placa de expansión	76
49.	Versión V3 de la placa de expansión	76
50.	Versión V4 de la placa de expansión	77
51.	Versión V5 de la placa de expansión	77

Índice de cuadros

1.	Reglas para el dimensionamiento de pistas (MakerLab UVG)	20
2.	Reglas para el dimensionamiento de <i>pads</i> MakerLab UVG	20
3.	Tamaños estándar de agujeros disponibles en el MakerLab LPKF S103	21
4.	Resultados de las pruebas con distintos módulos elevadores de voltaje (<i>boost</i>)	24
5.	Comparación entre los servomotores MG90S y Feetech FT90M	27
6.	Análisis de potencia máxima por módulo	29
7.	Corriente máxima consumida por cada módulo del sistema	29
8.	Corriente en la práctica por módulo y combinaciones, considerando factores de uso realista	29
9.	Escenarios de operación con servomotores y cámara, observados durante las pruebas experimentales	30
10.	Asignación de pines del TinyS3 en la placa rediseñada	33
11.	Evolución de componentes clave a lo largo de las iteraciones de la placa de expansión	49
12.	Resultados obtenidos durante las pruebas de validación del sistema electrónico	52
13.	Longitudes del mecanismo de cuatro barras (paralelogramo)	55
14.	Resultados de validación del mecanismo de inclinación de la cámara	64
15.	Listado de componentes de la placa de expansión	72
16.	Asignación de pines del TinyS3 en la placa rediseñada	74

Este trabajo presenta el rediseño de la placa de expansión del robot diferencial Pololu 3pi+, utilizada en el entorno Robotat de la Universidad del Valle de Guatemala. El objetivo fue optimizar la eficiencia energética, la estabilidad eléctrica y la modularidad del sistema, corrigiendo problemas de versiones previas como circuitos redundantes y una distribución poco eficiente de los componentes.

La nueva placa integra el microcontrolador TinyS3 (ESP32-S3) como unidad central, un elevador Pololu U3V70F5 de 5 V y 3 A, y un sistema de protección BMS 1S 3A, permitiendo una alimentación más robusta y segura. Se añadieron capacitores de alta capacidad y se reorganizaron las rutas de energía mediante la salida VSW, mejorando el comportamiento ante cargas dinámicas y el uso simultáneo de actuadores y sensores.

Además, se diseñó un soporte mecánico ajustable para la OpenMV H7, con un grado de libertad tipo *pitch*, proporcionando un rango aproximado de $\pm 90^\circ$ y mayor estabilidad durante la operación.

El resultado es una plataforma más compacta, modular y confiable, adecuada para futuras extensiones y experimentación con el Pololu 3pi+.

Palabras clave:

- **Pololu 3pi+**: robot móvil diferencial utilizado en el entorno Robotat.
- **OpenMV H7**: módulo de visión embebido para procesamiento de imágenes.
- **TinyS3**: microcontrolador basado en ESP32-S3 integrado en la placa.
- **VSW**: salida de energía controlada del Pololu para alimentación regulada.
- **Placa de expansión**: módulo electrónico rediseñado para integrar *hardware* y sensores.

This work presents the redesign of the expansion board for the differential robot Pololu 3Pi+, used within the Robotat environment at Universidad del Valle de Guatemala. The objective was to optimize the system's energy efficiency, electrical stability, and modularity, addressing limitations found in previous versions such as redundant circuits and an inefficient distribution of components.

The new board integrates the TinyS3 (ESP32-S3) microcontroller as the central processing unit, a Pololu U3V70F5 5 V / 3 A step-up regulator, and a BMS 1S 3 A protection module, enabling a more robust and safer power supply. High-capacity capacitors were added, and the power paths were reorganized through the VSW output, improving performance under dynamic loads and allowing the simultaneous operation of actuators and sensors.

Additionally, an adjustable mechanical mount was designed for the OpenMV H7, featuring a pitch degree of freedom, providing an approximate range of $\pm 90^\circ$ and improved stability during operation.

The result is a more compact, modular, and reliable platform, suitable for future extensions and research development using the Pololu 3pi+.

Keywords:

- **Pololu 3pi+**: differential mobile robot used in the Robotat environment.
- **OpenMV H7**: embedded vision module for image processing.
- **TinyS3**: microcontroller based on the ESP32-S3 integrated into the board.
- **VSW**: controlled power output from the Pololu board for regulated supply.
- **Expansion board**: electronic module redesigned to integrate hardware and sensors.

La investigación se desarrolla dentro del ecosistema de pruebas del Robotat de la Universidad del Valle de Guatemala, un entorno diseñado para experimentación en robótica móvil donde se evalúan algoritmos de navegación, control y cooperación multiagente mediante sistemas de captura de movimiento y comunicación inalámbrica. Este laboratorio proporciona condiciones controladas y reproducibles que permiten estudiar el desempeño de diversos agentes diferenciales, lo que exige plataformas electrónicas estables, modulares y capaces de integrarse fácilmente con sensores adicionales. En este contexto, el trabajo se enfoca en ampliar y mejorar las capacidades del agente robótico Pololu 3pi+ mediante el rediseño de su placa de expansión, tomando como punto de partida el diseño implementado por José Luis Álvarez en 2024 [1]. Aunque dicha placa permitió la integración del microcontrolador TinyS3, servomotores en un manipulador serial y la cámara OpenMV Cam H7, también presentó limitaciones relacionadas con eficiencia energética, redundancia de circuitos, distribución de potencia y restricciones para incorporar nuevos módulos. Estas limitaciones reducen la confiabilidad del robot en aplicaciones prolongadas y dificultan su uso como plataforma para investigaciones más complejas. Por ello, este proyecto busca optimizar dicho diseño con el fin de mejorar la eficiencia, la estabilidad mecánica, la modularidad y la facilidad de expansión del sistema.

El proyecto se centra en la reingeniería de la placa electrónica de expansión, considerando como ejes principales la selección de componentes eléctricos adecuados, la integración de la batería dentro de la misma placa y la incorporación de un sistema de gestión de batería (BMS) que garantice seguridad durante la operación. Esto permite prescindir del uso de una placa externa y mejora significativamente la administración de energía. Además, se optimizaron las rutas de energía mediante reguladores confiables y la inclusión de capacitores de mayor capacidad para mitigar variaciones transitorias. Como parte de la mejora del subsistema de actuadores, se sustituyeron los servomotores analógicos MG90S por servomotores digitales Feetech FT90M, los cuales presentan un comportamiento más estable, mejor respuesta al control PWM y un consumo energético más adecuado para el voltaje disponible en el Pololu 3pi+.

Finalmente, otro aspecto que formó parte esencial de este trabajo fue el diseño de una base ajustable y estable para la cámara OpenMV Cam H7. La necesidad de optimizar su campo visual y reducir la inestabilidad mecánica observada en prototipos previos motivó el desarrollo de diversas propuestas en Autodesk Inventor. A través de un proceso iterativo de diseño, fabricación y validación, se buscó una solución que permitiera un movimiento de inclinación (*tilt* o *pitch*) accionado por un servomotor, ofreciendo un rango de operación más versátil para tareas de visión. Con ello, se pretende que el Pololu 3pi+ cuente con una plataforma mecánica y electrónica capaz de adaptarse a distintos escenarios experimentales dentro del Robotat.

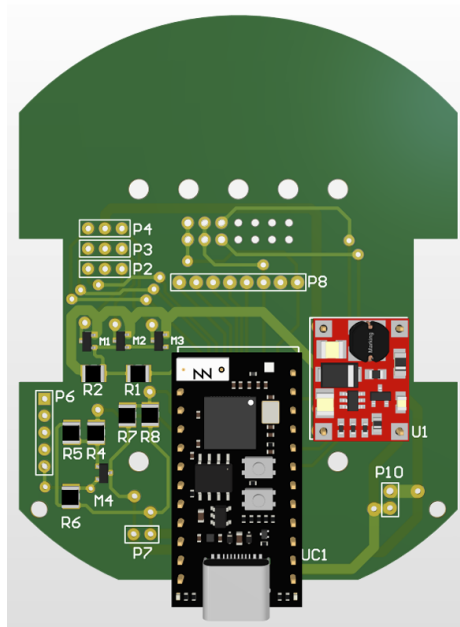
El Robotat proporciona un espacio de pruebas que permite evaluar técnicas de navegación y control de múltiples robots simultáneamente, mediante sistemas de captura de movimiento y comunicación inalámbrica. En este contexto, Perafán [2] desarrolló un sistema que permitió validar técnicas de control cooperativo para múltiples robots móviles, destacando la capacidad del Robotat para proporcionar datos precisos en tiempo real sobre la posición y orientación de cada robot. Esto facilita significativamente la implementación y evaluación de algoritmos cooperativos complejos.

Desde que se adquirieron y modificaron, los robots Pololu 3pi+ se han convertido en los agentes por defecto dentro del Robotat, gracias a su tamaño compacto, facilidad de programación y capacidad de adaptación a distintos entornos de prueba. Esta integración ha permitido aprovechar al máximo el potencial del Robotat en la experimentación con robótica móvil.

Dentro de la Universidad del Valle de Guatemala se han desarrollado proyectos enfocados en la creación de placas de expansión para el Pololu 3Pi+; sin embargo, aún existe margen para mejoras importantes en términos de eficiencia, modularidad, tamaño y funcionalidad del diseño, lo cual motiva el presente trabajo.

En seguimiento a esta línea de desarrollo, en 2024 Álvarez [1] presentó un proyecto orientado a la creación de una placa electrónica para expandir las capacidades del robot Pololu 3Pi+. Su diseño se basó en tecnología de montaje superficial, integrando un microcontrolador TinyS3, una cámara OpenMV Cam H7 y un manipulador serial con servomotores. Además, incluyó una batería tipo 18650 de 3000 mAh, proporcionando autonomía para pruebas continuas de aproximadamente 2 horas. La Figura 1 muestra la placa electrónica desarrollada por Álvarez, destacando la distribución de los componentes mencionados.

Figura 1. Placa electrónica diseñada por Álvarez para la expansión modular del robot Pololu 3pi+

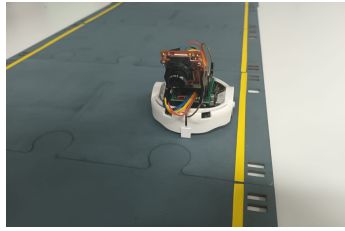


Nota. La placa fue diseñada integrando el microcontrolador TinyS3, cámara OpenMV y un manipulador serial. Imagen tomada de [1].

Aunque el diseño de Álvarez cumplió con sus objetivos iniciales, se identificaron varias oportunidades de mejora que han motivado el desarrollo del presente proyecto. Específicamente, se observó que algunos circuitos eran redundantes o poco utilizados en la práctica. Asimismo, la ubicación y el tipo de batería no favorecían una distribución óptima del espacio físico. También se detectaron limitaciones en la estabilidad mecánica del soporte de la cámara, lo cual afectaba su campo de visión y requería ajustes frecuentes. Por otro lado, la posibilidad de integrar sensores adicionales o módulos funcionales de manera modular resultaba restringida por el diseño compacto y poco flexible de la placa.

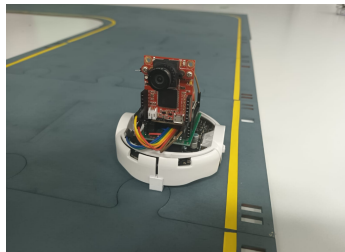
Arribas [3] exploró el uso de la cámara OpenMV Cam H7 en aplicaciones de visión para robots móviles, utilizando específicamente el Pololu 3pi+. Implementó algoritmos básicos como el seguimiento de líneas en el suelo y la detección de señales de tránsito. Debido a los requerimientos visuales específicos, fue necesario realizar ajustes frecuentes en la posición y orientación de la cámara, alternando entre una posición inclinada para optimizar la visualización de líneas en el piso, y una posición vertical para identificar señales frontales de tránsito. Estas necesidades evidenciaron la importancia de contar con una base ajustable y estable, capaz de mejorar tanto la precisión visual como la estabilidad del sistema. En las Figura. 2 y 3 se ilustran las posiciones requeridas para estas aplicaciones, tomadas del trabajo de Arribas.

Figura 2. Cámara OpenMV inclinada para visualizar las líneas de la carretera



Nota. La inclinación mejora la visión del suelo para tareas como el seguimiento de líneas. Imagen tomada de [3].

Figura 3. Cámara OpenMV en posición vertical para visualizar señales de tránsito



Nota. La orientación vertical facilita la detección de señales ubicadas al frente del robot. Imagen tomada de [3].

Finalmente, en 2024, Cerón [4] realizó la evaluación comparativa de distintos sensores LiDAR para mapeo de entornos y navegación autónoma. Aunque en su proyecto no implementó directamente la integración del sensor en el Pololu 3pi+, recomendó esta línea de desarrollo como una etapa futura, resaltando el potencial de estos sensores para mejorar significativamente la capacidad autónoma del robot. Esta recomendación pone en evidencia la necesidad de que el Pololu 3pi+ presente mayores facilidades para la expansión de sus capacidades, ya que su diseño actual limita la incorporación de sensores y módulos adicionales.

El presente trabajo busca ampliar y mejorar principalmente el desarrollo realizado por Álvarez en 2024 dentro de la Universidad del Valle de Guatemala, enfocado en la creación de una placa electrónica (PCB) para la expansión modular del robot móvil diferencial Pololu 3pi+.

El Pololu 3pi+ es el agente principal utilizado actualmente en el entorno de pruebas del Robotat, por lo que su mejora continua es esencial para el desarrollo y validación de prototipos robóticos dentro de este entorno. Una de las formas más efectivas de extender sus capacidades es mediante el uso de placas electrónicas de expansión que permitan integrar nuevas funcionalidades al sistema. En este sentido, el presente proyecto busca mejorar las placas de expansión existentes, las cuales presentan fallas recurrentes que deben corregirse manualmente, afectando la eficiencia y confiabilidad en las pruebas.

Por ello, se propone un rediseño de la placa que garantice mayor eficiencia, funcionalidad, espacio, modularidad y facilidad de fabricación a escala, facilitando también futuras implementaciones. Esta mejora tendrá un impacto directo en la formación académica de los estudiantes al proporcionar una plataforma más robusta para prácticas, investigaciones y nuevos desarrollos en áreas como la robótica y control.

Durante el rediseño, también se tomará en cuenta la posibilidad de expansión del sistema con nuevos módulos o sensores, como por ejemplo sensores LiDAR, asegurando que la placa mantenga un diseño flexible y preparado para integraciones futuras.

4.1. Objetivo general

Rediseñar la placa electrónica de expansión existente para el robot móvil Pololu 3pi+, mejorando su eficiencia, funcionalidad, tamaño y modularidad.

4.2. Objetivos específicos

- Evaluar y rediseñar los circuitos en la placa electrónica existente, eliminando o reemplazando aquellos que resulten redundantes o innecesarios y considerar expansiones modulares e integración de sensores adicionales.
- Reevaluar y rediseñar la ubicación y el tipo de batería Li-Ion utilizada en la placa actual, con el fin de optimizar el aprovechamiento del espacio físico y mejorar la distribución general de los componentes.
- Diseñar una base ajustable y estable para la cámara OpenMV Cam H7, permitiendo modificar fácilmente la posición del módulo, optimizando así el campo visual y reduciendo problemas actuales relacionados con inestabilidad mecánica.

El presente trabajo de graduación se enfocó en el rediseño de la placa de expansión del agente robótico Pololu 3pi+, partiendo de la versión desarrollada previamente y abordando sus limitaciones en términos de estabilidad eléctrica, modularidad y confiabilidad. El proyecto se orientó hacia el desarrollo de una solución práctica y manufacturable, tanto en el taller interno de la Universidad del Valle de Guatemala (MakerLab) como en servicios externos de producción de placas de circuito impreso (PCB), incluyendo el servicio OSH Park [5].

En el rediseño se integraron de manera ordenada los módulos principales del sistema y se mejoró la gestión de energía mediante la incorporación de un regulador de voltaje más estable, nuevos componentes para la protección eléctrica y una ruta de alimentación reorganizada. También se añadieron *headers* y puntos de montaje que facilitan la conexión de módulos adicionales y permiten futuras expansiones. De forma complementaria, se desarrollaron prototipos de una base ajustable para la cámara, orientados a reducir la inestabilidad mecánica y ampliar su rango de visión.

Algunas funcionalidades no pudieron implementarse dentro del alcance de este trabajo. Entre ellas se encuentran la integración de sensores adicionales tales como LiDAR, sensores ultrasónicos y otros sensores de distancia para habilitar pruebas completas de navegación; la incorporación de un segundo grado de libertad para la cámara (movimiento tipo *yaw*); y la evaluación de otros tipos de capacitores y módulos elevadores de voltaje que potencialmente ofrecen mejor estabilidad energética.

El proceso de validación se limitó a pruebas básicas de funcionamiento, consistentes en la activación de servomotores mediante modulación por ancho de pulsos (PWM), el movimiento inicial del Pololu 3pi+ y la transmisión de video en blanco y negro desde la cámara. Estas pruebas fueron suficientes para confirmar la estabilidad y funcionalidad general del rediseño; sin embargo, no contemplaron escenarios de operación complejos ni el desarrollo de *firmware* especializado. De esta manera, el alcance del proyecto quedó limitado a la validación funcional de la placa y de sus módulos principales, sin extenderse al desarrollo de *software* avanzado ni a pruebas adicionales.

Durante la ejecución del proyecto surgieron limitantes relacionadas con los tiempos de entrega. La fabricación externa de la placa mediante OSH Park presentó plazos variables entre dos semanas a un mes y medio, reduciendo la posibilidad de iterar múltiples revisiones del diseño. Asimismo, varios componentes clave (como capacitores y el módulo elevador de voltaje) fueron de importación, lo que introdujo tiempos de espera adicionales y afectó el ritmo de integración y validación.

El desarrollo del presente trabajo requiere comprender los componentes principales que intervienen en el funcionamiento del agente robótico utilizado y en el diseño de la placa de expansión propuesta. Por ello, este marco teórico reúne los conceptos y dispositivos que se utilizan en el proyecto: el robot Pololu 3pi+ 32U4 como plataforma base de operación, el microcontrolador TinyS3 como unidad de procesamiento y comunicación, el regulador elevador de voltaje U3V70F5 y la cámara OpenMV Cam H7 como módulo de visión. La descripción de estos componentes no solo contextualiza las decisiones de diseño tomadas durante el rediseño de la placa de expansión, sino que también permite comprender las limitaciones, requerimientos y capacidades técnicas que guiaron la integración del sistema.

6.1. Robot Pololu 3pi+ 32U4

El Pololu 3pi+ 32U4 es un robot móvil compacto y programable, diseñado para tareas de control y navegación. Está basado en el microcontrolador ATmega32U4, programable en el entorno de desarrollo Arduino, y cuenta con una estructura modular que permite su expansión y adaptación según las necesidades del proyecto [6].

Este robot integra múltiples sensores y componentes que lo hacen ideal para la experimentación en sistemas embebidos. Incluye *encoders* en ambas ruedas para control de velocidad y posición, y una unidad de medición inercial (IMU) de nueve ejes que combina acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. También dispone de cinco sensores de línea reflectivos orientados hacia abajo y dos sensores de impacto frontales. Además, incorpora botones de usuario, LED indicadores y un *buzzer* para retroalimentación básica [6].

A nivel mecánico, utiliza dos micromotores metálicos con una relación de reducción 30:1, lo cual le permite alcanzar velocidades de hasta 1.5 m/s con buena precisión y control. Gracias a los *encoders*, es posible implementar control en lazo cerrado, lo que mejora la estabilidad y exactitud del movimiento [6].

El robot se alimenta originalmente con cuatro baterías AAA, pero también permite la conexión de una batería externa, como una celda 18650, mediante los pines VBAT y GND expuestos en la placa. Esta opción amplía la autonomía energética del sistema para aplicaciones más demandantes. El robot también cuenta con pines de expansión que permiten conectar sensores o actuadores adicionales, incluyendo pines de propósito general (GPIO) y pines dedicados a interfaces de comunicación como UART, I²C y SPI [6].

Además, cuenta con pines de expansión que permiten conectar sensores o actuadores adicionales que, dependiendo de los requerimientos del *hardware* adicional, podrían llegar a necesitar un regulador de voltaje externo para asegurar una operación estable y evitar caídas de tensión. La programación se realiza directamente desde una computadora mediante un cable USB, sin necesidad de programadores externos [6]. La Figura 4 muestra el modelo Pololu 3pi+ 32U4 utilizado en este trabajo.

Figura 4. Robot Pololu 3pi+ 32U4



Nota. Imagen tomada de la documentación oficial del fabricante Pololu [6]. Se muestra la versión base utilizada en el entorno Robotat.

6.2. Microcontrolador TinyS3

La placa de desarrollo TinyS3 está basada en el chip ESP32-S3FN8 y es una opción compacta y potente para aplicaciones embebidas con conectividad inalámbrica. Su tamaño es de 35×18 mm, por lo que es útil para placas PCB como la de este proyecto, la cual tiene espacio limitado [7].

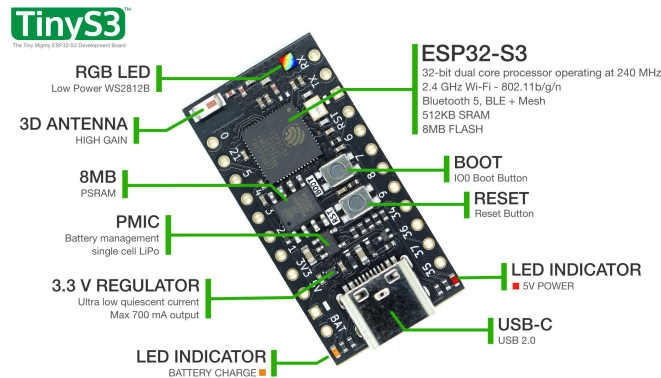
En su núcleo, el TinyS3 cuenta con dos núcleos de 32 bits Xtensa LX7, operando a una frecuencia de hasta 240 MHz. También incorpora un coprocesador RISC-V de ultrabajo consumo para tareas secundarias en modos de suspensión. En términos de memoria, dispone de 512 KB de SRAM, 8 MB de memoria *flash* y 8 MB adicionales de PSRAM [7].

El microcontrolador incluye conectividad wifi 802.11b/g/n en la banda de 2.4 GHz y Bluetooth 5 con soporte para BLE y comunicación en malla. En cuanto a interfaces, dispone de tres puertos UART, un puerto USB nativo (CDC, OTG y JTAG) y un conector USB-C con protección contra retroalimentación [7].

Puede ser alimentado mediante el puerto USB-C o a través de una batería externa conectada a los *pads* de conexión (VBAT), siendo compatible con celdas Li-Po o Li-Ion. Además, incluye un cargador integrado para baterías y pines de detección de voltaje (VBAT y 5V SENSE) [7].

El TinyS3 ofrece 17 pines de entrada/salida de propósito general (GPIO), la mayoría de ellos reprogramables, permitiendo que cada pin se configure para diferentes funciones digitales o analógicas según el diseño del sistema. Esta flexibilidad es una ventaja importante en comparación con microcontroladores que tienen funciones fijas. Sin embargo, algunos pines poseen funciones predeterminadas, como los asociados a UART para comunicación y los pines de energía [7]. La Figura 5 muestra el microcontrolador TinyS3 utilizado en este trabajo.

Figura 5. Microcontrolador TinyS3 basado en ESP32-S3 con conectividad wifi y Bluetooth



Nota. Imagen tomada de la documentación oficial del fabricante TinyS3 [7].

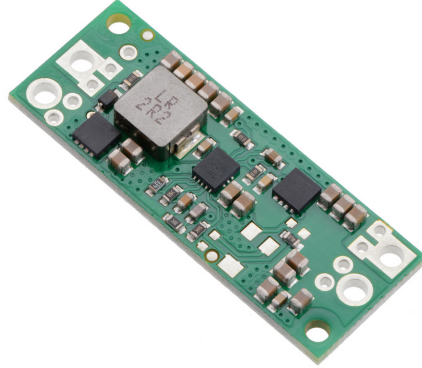
6.3. Regulador *step-up* Pololu U3V70F5

El Pololu U3V70F5 es un módulo regulador de voltaje elevador (*step-up* o *boost*) con salida fija de 5 V, diseñado para aplicaciones que requieren mantener una tensión estable a partir de una fuente con menor voltaje, como las baterías recargables de litio. Este componente es especialmente útil en sistemas embebidos móviles donde el voltaje de entrada puede disminuir progresivamente durante la descarga, pero se necesita garantizar el funcionamiento constante de actuadores u otros dispositivos sensibles al voltaje [8].

Este regulador forma parte de la familia U3V70x de Pololu y requiere un voltaje mínimo de entrada de 2.9 V y una corriente de entrada máxima de 10 A, limitada por factores térmicos. Bajo condiciones óptimas, puede entregar hasta 8 A de corriente de salida, aunque este valor depende directamente del voltaje de entrada y de la disipación térmica efectiva del sistema. El módulo incluye protección contra conexión inversa, lo que evita daños en caso de errores de cableado, y ofrece una salida regulada estable incluso cuando la batería se encuentra en niveles bajos de carga [8].

Físicamente, el U3V70F5 tiene un diseño con dimensiones de $15.2 \times 40.6 \times 4.6$ mm y un peso de 3.6 g, lo cual facilita su integración en plataformas robóticas con restricciones de espacio, como el robot Pololu 3pi+. Su montaje puede realizarse mediante pines o *pads*, permitiendo su soldadura directa sobre una PCB de expansión [8]. La Figura 6 muestra el módulo U3V70F5.

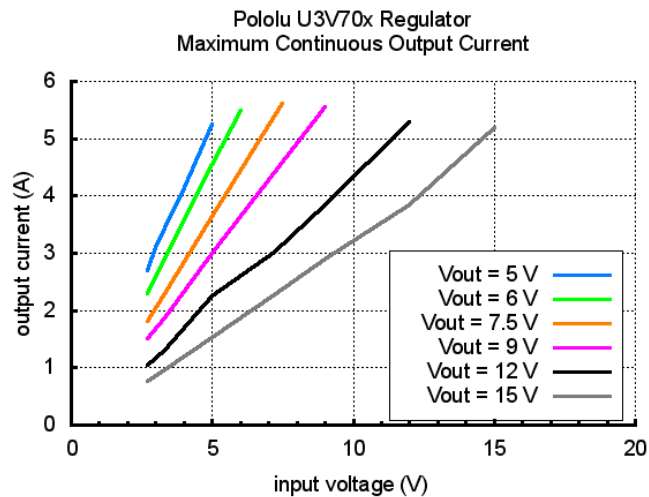
Figura 6. Vista del módulo Pololu U3V70F5 utilizado en el proyecto



Nota. Imagen tomada de la documentación oficial del fabricante Pololu [8].

De acuerdo con la documentación oficial del fabricante, el rendimiento del módulo depende directamente del voltaje de entrada, ya que la corriente de salida máxima que puede proporcionar disminuye conforme se reduce dicho voltaje. En condiciones típicas con una celda 18650 de 3.7 V, se puede mantener una corriente de salida suficiente para operar múltiples servomotores sin interrupciones [8]. Este comportamiento se ilustra en la Figura 7.

Figura 7. Corriente máxima continua de salida en función del voltaje de entrada



Nota. Gráfica obtenida de la documentación oficial de Pololu [8].

De acuerdo con la documentación del fabricante, los convertidores *boost* pueden verse afectados por picos transitorios de voltaje generados por la interacción entre la inductancia de los conductores de alimentación y la capacitancia interna del sistema, fenómeno conocido como *le voltage spikes*. Durante la conexión inicial de la alimentación, el flujo repentino de corriente puede producir sobrevoltajes instantáneos mayores que el voltaje de entrada. Pololu reporta que, con cables de alimentación típicos, voltajes superiores a 17 V pueden generar picos por encima de 20 V, los cuales pueden dañar el regulador o propagarse a la salida cuando el voltaje de entrada se aproxima al voltaje regulado. Para mitigar este comportamiento, el fabricante recomienda colocar un capacitor electrolítico cercano al pin VIN, siendo 33 μF un valor inicial sugerido [8].

En este proyecto, el U3V70F5 fue seleccionado como la fuente de alimentación exclusiva para los servomotores del manipulador robótico, ya que garantiza una tensión constante de 5 V incluso cuando la batería está parcialmente descargada. Se consideró que el sistema operará con una celda de litio tipo 18650, cuyo voltaje oscilará entre 3.7 V (nominal) y 3.5 V (límite seguro de descarga). Dentro de ese rango, el regulador puede mantener una corriente de salida continua entre 2.7 A y 3 A, suficiente para alimentar varios servomotores de forma simultánea.

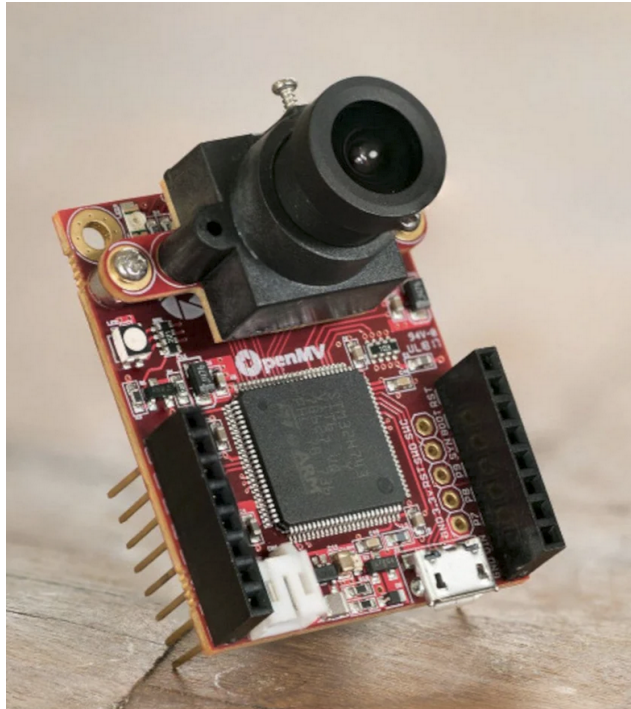
6.4. Cámara OpenMV Cam H7

La OpenMV Cam H7 es un módulo de visión por computadora compacto y de bajo consumo, diseñado para ejecutar algoritmos de procesamiento de imagen en sistemas embebidos. Está basada en el microcontrolador STM32H743VI con núcleo ARM Cortex-M7, que opera a una frecuencia de 480 MHz y dispone de 1 MB de memoria SRAM y 2 MB de memoria *flash*. Todos sus pines de entrada y salida operan a 3.3 V y son tolerantes a 5 V, lo que facilita su integración con distintos dispositivos electrónicos [9].

La cámara se programa mediante *scripts* en lenguaje Python, lo que permite implementar de forma sencilla tareas de visión como detección de objetos, seguimiento de color o reconocimiento de patrones, manteniendo la capacidad de controlar directamente entradas y salidas digitales para interactuar con otros módulos o sistemas de control. Su conectividad incluye un puerto USB de alta velocidad (12 Mb/s), así como un lector de tarjetas μSD con velocidades de lectura y escritura de hasta 100 Mb/s. También dispone de un bus SPI de hasta 80 Mb/s para comunicación con pantallas, módulos de red o microcontroladores, junto con buses I²C y CAN de hasta 1 Mb/s, y un puerto UART asíncrono capaz de alcanzar 7.5 Mb/s. Además, integra entradas analógicas de 12 bits (ADC), salidas analógicas de 12 bits (DAC) y pines con soporte para PWM e interrupciones, incluyendo tres salidas dedicadas para control de servomotores [9].

El sistema de cámara es modular y admite sensores con interfaz de 8 bits. El modelo utilizado en este proyecto integra un sensor OV7725, capaz de capturar imágenes de 640×480 píxeles en escala de grises (8 bits) o en color RGB565 (16 bits), alcanzando velocidades de hasta 75 cuadros por segundo (FPS) en resoluciones superiores a 320×240 y hasta 150 FPS en resoluciones menores [9]. La Figura 8 muestra el módulo OpenMV Cam H7 utilizado en este trabajo.

Figura 8. OpenMV Cam H7



Nota. Imagen obtenida del sitio oficial de OpenMV [9].

6.5. Baterías 18650 de Li-Ion y necesidad de un sistema de gestión

Las celdas recargables tipo 18650 utilizan una química de Li-Ion con un voltaje nominal de 3.70 V y una capacidad típica de 2500 mAh [10]. De acuerdo con su *datasheet* oficial, estas baterías operan dentro de un rango eléctrico estricto: alcanzan 4.20 ± 0.05 V al finalizar la carga y deben desconectarse al descender a 2.75 V, definido como el voltaje mínimo de corte de descarga. Además, pueden suministrar corrientes estándar de 500 mA, corrientes continuas de hasta 2500 mA y picos instantáneos de 5000 mA, lo cual evidencia su capacidad para alimentar cargas exigentes como servomotores o reguladores *step-up* [10].

Esta capacidad elevada viene acompañada de riesgos si la celda se somete a sobrecarga, sobrecorriente o descarga extrema, condiciones que la hoja de datos identifica como peligrosas debido a la posibilidad de fuga, hinchamiento, aumento térmico o falla eléctrica. Por estas razones, las baterías de Li-Ion requieren un sistema de protección conocido como *Battery Management System* (BMS), encargado de limitar el voltaje, controlar la corriente y evitar que la celda salga de su rango seguro de operación. El BMS también previene daños por cortocircuitos, que en una celda capaz de entregar hasta 5 A instantáneos representan un riesgo considerable para el sistema. La Figura 9 muestra la imagen del modelo INR18650-2500A utilizada como referencia [10].

Figura 9. Batería INR18650-2500A utilizada como referencia



Nota. Imagen obtenida del *datasheet* oficial del modelo INR18650-2500A [10].

6.6. Baterías AAA alcalinas

El Pololu 3pi+ opera originalmente con cuatro baterías AAA alcalinas, las cuales poseen un voltaje nominal de 1.5 V para un total de 6.0 V en serie [6]. Estas celdas presentan una capacidad típica cercana a 1200 mAh bajo corrientes de descarga bajas y, según su hoja técnica, las corrientes recomendadas se sitúan entre 25 mA y 100 mA, alcanzando picos breves de aproximadamente 400 mA. A diferencia de las baterías de Li-Ion, las alcalinas pueden descargarse sin riesgo de daño químico severo, no presentan riesgo de sobrecarga y no requieren sensores o sistemas de protección especializados [11].

Estas características explican por qué el Pololu 3pi+ puede funcionar sin un sistema de protección adicional cuando utiliza baterías AAA, mientras que la integración de una celda de Li-Ion en una placa de expansión exige obligatoriamente el uso de un BMS para garantizar la operación segura del sistema. La Figura 10 muestra la imagen correspondiente a la batería Energizer E92 utilizada como referencia [11].

Figura 10. Batería alcalina Energizer E92 utilizada como referencia



Nota. Imagen obtenida del documento técnico *E92 Alkaline AAA Battery Application Manual* [11].

6.7. Capacitores electrolíticos SMD y su función en la regulación de potencia

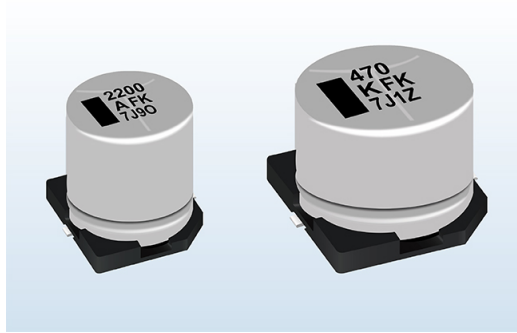
Los capacitores electrolíticos de aluminio son componentes diseñados para almacenar energía eléctrica temporalmente y liberar dicha energía cuando se presentan variaciones bruscas en la demanda o en el flujo de corriente del sistema. Su funcionamiento se basa en una estructura interna formada por un ánodo, un cátodo, una solución electrolítica y una lámina dieléctrica cuya capacitancia depende del área efectiva del material y del espesor del dieléctrico. Debido a su alta capacitancia por volumen, este tipo de capacitores se emplea ampliamente en aplicaciones donde se requiere filtrado, supresión de ruido y estabilización de líneas de alimentación en circuitos de corriente continua [12].

En este proyecto se seleccionó el capacitor Panasonic EEE-FK1C332AV, perteneciente a la serie FK, un componente *surface mount* diseñado para operación a altas temperaturas y en ambientes con vibraciones moderadas según su hoja de datos [13]. Este capacitor posee una capacitancia nominal de $3300 \mu\text{F}$ y un voltaje nominal de 16 V, con una vida útil especificada de 5000 horas a 105°C . Dicha vida útil puede extenderse en condiciones de operación más frías, ya que el fabricante señala que una disminución de 10°C en temperatura aproximadamente duplica la vida operacional del componente. Este comportamiento lo hace adecuado para aplicaciones móviles alimentadas por baterías, donde las temperaturas tienden a ser considerablemente menores [13].

Una característica de este capacitor es su baja impedancia a frecuencias de 100 kHz, lo que permite atenuar efectivamente el ruido presente en la salida del regulador *step-up*. Su resistencia serie equivalente (ESR) reducida contribuye a mejorar la respuesta ante transitorios de corriente, lo cual es importante cuando los servomotores cambian rápidamente de carga y producen variaciones en la demanda de energía. En consecuencia, la inclusión de este capacitor permite suavizar estas variaciones y evitar que el regulador experimente oscilaciones o caídas momentáneas en el voltaje de salida [13].

La necesidad de estos capacitores también se refuerza por la susceptibilidad del regulador elevador a picos tipo LC en la línea de entrada. El fabricante del módulo *step-up* destaca que los picos de corriente inicial pueden producir sobretensiones peligrosas si no se añaden capacitores electrolíticos de valor elevado cerca del pin de entrada. En este sentido, el capacitor de $3300 \mu\text{F}$ actúa como un amortiguador de energía, mitigando estos picos y asegurando que las variaciones no se propaguen hacia el resto del sistema. Esta configuración fortalece la estabilidad general del regulador y reduce riesgos para la cámara, el microcontrolador y los servomotores, que dependen de una alimentación libre de fluctuaciones [13].

Figura 11. Capacitor Panasonic EEE-FK1C332AV utilizado como referencia



Nota. Imagen tomada del *datasheet* oficial de Panasonic Serie FK [13].

6.8. Servomotores MG90S y FT90M

Los servomotores de pequeño tamaño constituyen uno de los actuadores más utilizados en sistemas mecatrónicos debido a su integración compacta de un motor de corriente directa, una caja reductora y un circuito de control interno basado en modulación por ancho de pulso (PWM). Su arquitectura permite posicionamiento angular preciso dentro de un rango definido, habitualmente entre 180° y 300° , dependiendo del modelo y del tipo de controlador integrado [14].

Dentro de este tipo de actuadores destacan dos considerados durante este proyecto: el TowerPro MG90S y el FeeTech FT90M. Aunque ambos pertenecen a la categoría de micros-servomotores con engranajes metálicos y dimensiones reducidas, presentan diferencias relevantes en su electrónica interna, comportamiento ante carga y precisión de posicionamiento [14].

El MG90S es un servomotor de tipo analógico que opera con un voltaje nominal entre 4.8 V y 6.0 V ofreciendo un torque de hasta 1.8 kg·cm y una velocidad típica de $0.10 \text{ s}/60^\circ$. Su controlador interno utiliza un sistema basado en comparadores analógicos, lo cual implica un ancho de banda muerto (*deadband*) cercano a $5 \mu\text{s}$ y una respuesta más susceptible a vibraciones o pequeñas variaciones en la señal PWM. Posee engranajes metálicos y un rodamiento de bolas, lo que mejora su vida útil mecánica y su resistencia ante cargas moderadas [15].

Por otro lado, el FeeTech FT90M incorpora un controlador digital, lo que permite un mayor refinamiento en el procesamiento de la señal PWM, reduciendo el *deadband* a valores inferiores a $4 \mu\text{s}$ y otorgando una estabilidad angular significativamente mayor que la de servomotores analógicos convencionales. El FT90M opera en un rango de 3 V a 8.4 V, ofreciendo un torque de hasta 2.3 kg·cm y una velocidad equivalente a $0.10 \text{ s}/60^\circ$, con la ventaja adicional de soportar picos de corriente mayores gracias a su electrónica de control digital. Este modelo puede alcanzar un rango efectivo de rotación de aproximadamente 280° , lo que lo hace adecuado para mecanismos que requieren mayor libertad angular [16].

Ambos servomotores son utilizados en dispositivos de bajo consumo y aplicaciones com-

pactas; sin embargo, la diferencia entre un sistema analógico y uno digital es fundamental para aplicaciones de posicionamiento fino. Mientras que un servomotor analógico como el MG90S puede ser suficiente para tareas generales, un servomotor digital como el FT90M ofrece un control más preciso, menor oscilación (*jitter*) en posición estática y una mejor respuesta dinámica bajo cargas variables. Estas características resultan especialmente relevantes en el sistema del robot Pololu 3pi+, donde la estabilidad de la cámara y la repetibilidad del movimiento son fundamentales.

Figura 12. Comparación visual de los servomotores MG90S (izquierda) y FT90M (derecha)



(a) Servomotor TowerPro MG90S

Nota. Imagen obtenida de la hoja técnica del modelo MG90S [15].



(b) Servomotor digital FeeTech FT90M

Nota. Imagen obtenida de la hoja técnica del modelo FT90M [16].

Reglas de dimensionamiento en diseño de PCB

El proceso de diseño de una placa de circuito impreso requiere el cumplimiento de parámetros eléctricos que garanticen la operación segura del sistema, especialmente cuando la placa alimenta dispositivos de potencia, como servomotores o reguladores *step-up*. Para ello se emplean normas que establecen criterios formales para dimensionar pistas, *pads* y agujeros. La más utilizada a nivel internacional es la norma IPC-2221A, conocida como la *Generic Standard on Printed Board Design*, la cual define los límites mínimos y las recomendaciones de diseño para asegurar que las pistas puedan conducir la corriente especificada sin riesgo de sobrecalentamiento ni fallas térmicas. Esta norma incluye las ecuaciones para determinar el ancho de pista requerido según la corriente, la temperatura y el espesor del cobre, además de lineamientos para separación entre pistas, distancias de seguridad y restricciones de manufactura [17].

Para aplicar estas reglas de manera práctica se utilizó la herramienta en línea ANSI IPC-

2221A PCB Trace Width Calculator [18], en la cual se ingresaron los valores de corriente máxima previstos para el sistema (3 A). Esto permitió estimar el ancho mínimo de pista que garantiza una disipación térmica adecuada y evita fallas por incremento de temperatura. Aunque estas calculadoras se basan en los modelos definidos por la norma, en la práctica es necesario combinar estos resultados con otras restricciones del proceso de manufactura disponible.

En el contexto del MakerLab de la Universidad del Valle de Guatemala, donde se fabricaron los primeros prototipos, el proceso se realiza mediante fresado con una máquina LPKF S103. Este método posee limitaciones propias, como el tamaño mínimo de herramienta, el espaciado entre pistas y la precisión en los agujeros. Por ello fue necesario complementar la normativa IPC con las reglas del documento de especificaciones internas del laboratorio [19], que establecen los valores mínimos y recomendados para la fabricación local. Estos parámetros fueron utilizados como referencia obligatoria durante el diseño, dado que cualquier pista o agujero por debajo de estos límites no podría ser fabricado correctamente por el equipo del MakerLab.

A continuación se presentan las reglas de dimensionamiento más relevantes, utilizadas como referencia teórica y práctica en este proyecto.

Dimensiones de pistas

Cuadro 1. Reglas para el dimensionamiento de pistas (MakerLab UVG)

Parámetro	Valor
Ancho mínimo de pista	0.254 mm (10 mil)
Ancho recomendado de pista	0.508 mm (20 mil)
Espacio mínimo entre pistas	0.254 mm (10 mil)
Espacio recomendado entre pistas	0.508 mm (20 mil)

Nota. Datos obtenidos del documento de especificaciones del MakerLab UVG [19].

Dimensiones de *pads*

Cuadro 2 Reglas para el dimensionamiento de *pads* MakerLab UVG

Parámetro	Valor
Tamaño mínimo de <i>pad</i>	Tamaño de agujero + 0.508 mm (20 mil)
Tamaño mínimo entre <i>pads</i>	0.254 mm (10 mil)
<i>Pad</i> mínimo para vías	1.524 mm (60 mil)
<i>Pad</i> recomendado para resistores/capacitores	1.5748 mm con agujero de 0.9 mm

Nota. Datos obtenidos del documento de especificaciones del MakerLab UVG [19].

Dimensiones de agujeros

Cuadro 3 Tamaños estándar de agujeros disponibles en el MakerLab LPKF S103

Diámetro (mm)	Equivalente (mil)
0.2	7.87
0.4	15.75
0.5	19.69
0.6	23.62
0.7	27.56
0.8	31.50
0.9	35.43
1.0	39.37
1.2	47.24
1.4	55.12
1.5	59.06
1.6	62.99
1.8	70.87
2.0	78.74
3.0	118.11

Nota. Datos obtenidos del documento de especificaciones del MakerLab UVG [19].

Diseño eléctrico y dimensionamiento de la placa de expansión

El rediseño de la placa de expansión inició con un análisis detallado de la versión desarrollada previamente por José Luis Álvarez [1] para el Pololu 3pi+. Este estudio permitió identificar tanto los módulos y conexiones que funcionaban adecuadamente como las limitaciones que afectaban la estabilidad eléctrica, la gestión de energía y la modularidad del sistema. Entre los principales problemas encontrados destacaron la inestabilidad del regulador elevador de voltaje (*boost*) integrado, la ausencia de un sistema de protección para la batería de Li-Ion, la falta de criterios claros de dimensionamiento en las rutas de energía y la reducida flexibilidad para incorporar *hardware* externo.

Con base en estas observaciones, el rediseño se orientó a optimizar la selección de componentes, reorganizar las rutas de alimentación y comunicación, aplicar reglas formales de dimensionamiento eléctrico y establecer los parámetros de operación. El objetivo final fue obtener una placa capaz de integrar el TinyS3, la cámara OpenMV Cam H7 y los servomotores digitales, garantizando estabilidad bajo carga, claridad en las conexiones y mejor capacidad de expansión futura.

7.1. Metodología

La metodología empleada para el rediseño combinó análisis técnico, criterios normativos y validación experimental. En una primera etapa se llevó a cabo la revisión de las hojas de datos de cada módulo, así como pruebas de consumo eléctrico realizadas sobre prototipos anteriores. Esto permitió establecer los requerimientos reales de corriente y determinar qué rutas de alimentación debían redimensionarse.

Posteriormente, se seleccionaron los componentes considerando no solo sus valores nominales, sino también su comportamiento en condiciones de carga y su compatibilidad con

los nuevos criterios de diseño. En esta etapa se compararon diferentes alternativas mediante un proceso iterativo de comparación cualitativa, especialmente en lo relacionado con el regulador *step-up*, los capacitores de filtrado y el sistema de protección de batería (BMS).

De forma complementaria, se aplicaron las reglas de manufactura del MakerLab UVG y las guías del estándar IPC-2221A para el dimensionamiento de pistas, *pads* y agujeros, asegurando que el diseño fuera manufacturable tanto en fresado interno como en servicios externos de PCB. Finalmente, se realizaron ensayos prácticos con servomotores, el TinyS3 y la cámara OpenMV, verificando la estabilidad de las rutas de energía y el comportamiento general del sistema en escenarios de operación típicos.

7.2. Selección de componentes

7.2.1. Regulador de voltaje

Uno de los elementos críticos en el rediseño de la placa fue la elección del regulador elevador de voltaje (*boost*) encargado de suministrar los 5 V requeridos para la alimentación de los servomotores. Para ello se inició con un análisis del módulo integrado en la placa original, que consistía en un elevador de voltaje de 5 V y 1 A [20].

Aunque este componente alcanzaba a entregar 5 V, las pruebas demostraron que la corriente de salida efectiva oscilaba entre 0.5 y 1 A. Dicho rango resultó insuficiente para alimentar los servomotores MG90S empleados originalmente. Si bien podían encender, no lograban responder de manera estable bajo condiciones de operación real. Este comportamiento inestable evidenció que el módulo no cumplía con las demandas energéticas del sistema.

Posteriormente, se evaluó un módulo de mayor capacidad basado en el integrado XL6009 [21], cuyas especificaciones nominales indicaban hasta 4 A de salida (2 A sin disipador). Sin embargo, en la práctica se observó un comportamiento similar al módulo anterior: la corriente real se mantenía cercana a 1 A, lo que resultaba insuficiente para mover incluso un solo servomotor bajo carga. Además, este módulo presentaba problemas de sobrecalentamiento y requería calibrar manualmente el voltaje de salida mediante un potenciómetro, lo cual introducía riesgos adicionales de desajuste y afectaba la confiabilidad del sistema. Finalmente, se optó por el regulador elevador (*step-up*) Pololu U3V70F5 [8], perteneciente a la familia U3V70x.

Durante las pruebas realizadas, se verificó que el regulador funcionaba de manera confiable al añadir capacitores de filtrado en la entrada y la salida, lo que permitió mejorar la respuesta transitoria del sistema. Con estas condiciones, el Pololu U3V70F5 se escogió como la opción definitiva para el rediseño de la placa.

Los resultados obtenidos en las pruebas de los distintos módulos se resumen en el Cuadro 4. Asimismo, en la Figura 13 se muestran las imágenes de los reguladores considerados durante el proceso de selección.

Cuadro 4 Resultados de las pruebas con distintos módulos elevadores de voltaje (*boost*)

Módulo	Voltaje medido	Corriente máx.	Observaciones
5 V 1 A genérico [20]	5 V (inestable)	0.5–1 A	Servomotores no responden en carga
XL6009 4 A [21]	5 V (ajustable)	1 A	Sobrecalentamiento, calibración riesgosa y mal funcionamiento de servomotores
Pololu U3V70F5 [8]	5 V estable	2.7–3 A	Estable con capacitores adicionales

Nota. Mediciones realizadas durante pruebas de laboratorio con servomotores MG90S conectados. Elaboración propia.

Figura 13 Módulos elevadores de voltaje (*boost*) evaluados durante el rediseño de la placa de expansión



(a) Módulo 5 V 1 A genérico [20] (b) Módulo XL6009 [21] (c) Módulo Pololu U3V70F5 [8]

Nota. Las imágenes de los módulos genérico 5 V 1 A y XL6009 fueron obtenidas del catálogo de La Electrónica [20], [21], mientras que la del módulo Pololu U3V70F5 se obtuvo de la página oficial de Pololu [8].

Los convertidores elevadores de voltaje (*boost converters*) están limitados por la relación entre la corriente de entrada, el ciclo de trabajo y las pérdidas internas del regulador. En aplicaciones con servomotores, la carga no es constante, sino transitoria, ya que los servomotores generan picos de corriente elevados al iniciar el movimiento, cambiar de dirección o alcanzar posiciones límite. Estos picos pueden superar varias veces la corriente promedio, provocando caídas de voltaje si el convertidor no es capaz de responder con la suficiente rapidez. Los módulos genéricos evaluados, a pesar de indicar corrientes nominales de 1 A o 4 A, suelen alcanzar estas cifras únicamente en condiciones ideales, sin carga transitoria y con disipación térmica adecuada. En la práctica, su capacidad real queda muy por debajo de los valores declarados, especialmente cuando se utilizan sin filtrado adicional o en placas

donde el calor no puede disiparse. Esto según pruebas realizadas con cada elevador de voltaje de manera individual.

7.2.2. Sistema de protección

En la versión original de la placa propuesta por Álvarez, la protección frente a sobrecorriente se implementaba mediante un fusible de 3 A, complementado con la monitorización básica del nivel de la batería a través del microcontrolador TinyS3 [1]. Este esquema ofrecía una protección parcial, pero no contemplaba aspectos críticos como la prevención de sobrecarga, sobredescarga y picos transitorios de corriente característicos de las baterías de Li-Ion.

Durante las pruebas realizadas, se determinó que la batería opera de forma estable en un rango de 3.4 V a 4.2 V. El BMS logró entregar este voltaje a la carga, aunque en ocasiones se observó una caída aproximada de 0.5 V, probablemente debido al consumo interno requerido para su operación.

No obstante, el desempeño general fue satisfactorio, ya que el módulo pudo suministrar la corriente y el voltaje necesarios para la operación estable de los servomotores y del Pololu 3pi+. Asimismo, se comprobó que el sistema de cámara OpenMV y el microcontrolador TinyS3 funcionaron correctamente alimentados bajo este esquema de protección (Figura 14).

Figura 14 Módulo BMS 1S 3A empleado para la protección de la batería



Nota. Imagen obtenida del catálogo oficial de La Electrónica [22].

En conclusión, el BMS 1S 3A garantizó un nivel de seguridad adecuado para la batería de Li-Ion, reduciendo los riesgos asociados a su operación.

7.2.3. Servomotores

En la tesis original de Álvarez, se utilizaron servomotores MG90S debido a su mayor torque en comparación con los SG90 y a la disponibilidad local en el mercado [1]. Sin embargo, durante las pruebas realizadas en este trabajo se identificaron limitaciones en los MG90S, principalmente relacionadas con su rango de voltaje de operación y su estabilidad bajo carga.

Estos servomotores requieren entre 4.8 y 6.0 V para funcionar correctamente [23], mientras que la batería 18650 considerada en el rediseño entrega un voltaje entre 3.4 y 4.2 V. Dicho rango fue determinado experimentalmente en este trabajo, midiendo el voltaje mínimo al cual los servomotores podían seguir operando antes de dejar de funcionar. Bajo estas condiciones, los MG90S presentaron comportamientos inestables y movimientos descontrolados.

Para resolver estas limitaciones, se seleccionaron los servomotores digitales FeeTech FT90M. Estos presentan un rango de voltaje más amplio (3.0–8.4 V), lo cual asegura su funcionamiento incluso cuando la batería se encuentra en niveles bajos de carga [16]. Adicionalmente, el consumo es menor (150 mA frente a 350–500 mA de los MG90S según pruebas realizadas), lo que incrementa la eficiencia energética del sistema.

Además de que la batería empleada en el sistema trabaja en un rango de 3.4–4.2 V, se requiere el uso de un regulador elevador para proporcionar al menos 5 V de alimentación. Sin embargo, los servomotores MG90S no solo presentaron un mayor consumo eléctrico, sino que también se comportaron de manera inestable. Durante las pruebas, se observó que incluso con el módulo elevador original y con el nuevo regulador Pololu U3V70F5, los MG90S presentaban fallas intermitentes y movimientos erróneos.

Un aspecto adicional a considerar fue la disponibilidad y costo. Los MG90S son de fácil acceso en el mercado local, con precios entre Q35 y Q65 en tiendas como TETTSA y La Electrónica [23], [24]. En contraste, los FT90M no se encuentran de manera local y debieron adquirirse a través de distribuidores internacionales, con un costo aproximado de 10.10 USD por unidad [16]. A pesar de la diferencia en disponibilidad, se optó por los FT90M debido a su superior compatibilidad eléctrica y desempeño en las pruebas experimentales.

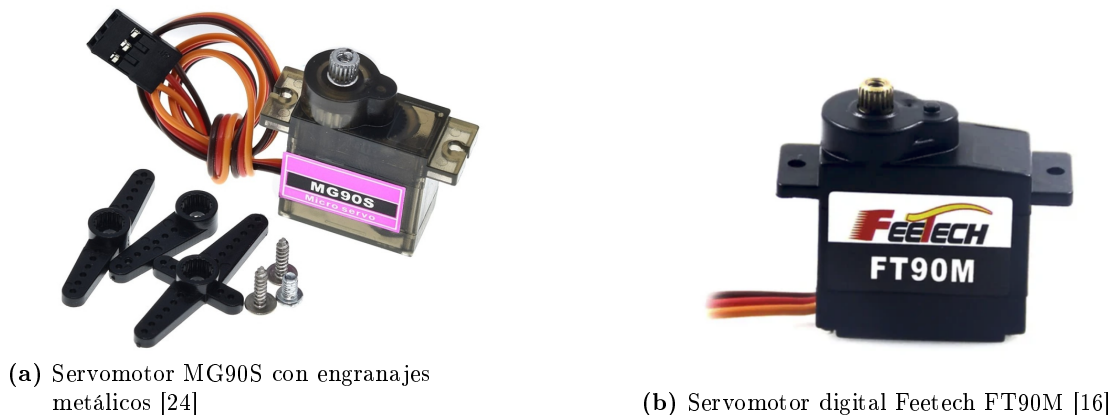
La comparación de parámetros principales entre ambos servomotores se resume en el Cuadro 5. La Figura 15 muestra ambos modelos: el MG90S en la subfigura 15a y el FT90M en la subfigura 15b.

Cuadro 5. Comparación entre los servomotores MG90S y Feetech FT90M

Parámetro	MG90S	FT90M
Voltaje de operación	4.8–6.0 V	3.0–8.4 V
Torque máximo	2.2 kg·cm (6 V)	2.3 kg·cm (6 V)
Velocidad	0.08 s/60° (6 V)	0.1 s/60° (6 V)
Consumo en vacío	350–500 mA (pruebas)	150 mA (6 V)
Consumo en reposo	N/A	6 mA (6 V)
Corriente de estancamiento	~800 mA–1 A	1000 mA (6 V)
Tipo de control	Analógico	Digital (comparador)
Material de engranajes	Metálicos	Metálicos
Peso	13.4 g	13.5 g
Rango de giro	~180°	280° (PWM 1000–2000 μ s)
Banda muerta	5 μ s	$\leq 4 \mu$ s

Nota. Especificaciones recopiladas de hojas técnicas y catálogos en línea [16], [24].

Figura 15. Comparación entre servomotores MG90S y Feetech FT90M



Nota. Imágenes obtenidas del catálogo en línea de La Electrónica [24] y de la documentación oficial de Robotshop [16].

En conclusión, con base en las pruebas experimentales realizadas y en la comparación técnica entre ambos modelos, se seleccionaron los servomotores FeeTech FT90M como la alternativa más adecuada para el rediseño de la placa de expansión. Las pruebas incluyeron la ejecución continua de movimientos mediante señales PWM (*pulse width modulation*), la respuesta bajo cambios rápidos de dirección y la verificación del comportamiento durante picos de corriente al arranque y en condiciones de estancamiento (*stall*), donde las demandas pueden acercarse a 1 A por servomotor.

Mientras que los MG90S mostraron inestabilidad, pérdida momentánea de posición y reinicios aleatorios cuando eran alimentados a través del módulo elevador, los FT90M man-

tuvieron un funcionamiento estable en todos los escenarios evaluados. Estos últimos demostraron ser compatibles con el rango de voltaje disponible en el sistema y más eficientes dentro del presupuesto de potencia (*power budget*) de la placa. Asimismo, al operar con menores corrientes promedio, reducen la carga sobre el regulador *step-up* Pololu U3V70F5.

7.3. Análisis de consumo de potencia

Los requerimientos de potencia asociados a la nueva placa electrónica diseñada para el agente robótico Pololu 3pi+ consideran tanto los valores teóricos de corriente máxima obtenidos de hojas de datos como las mediciones prácticas realizadas en trabajos previos, con el fin de establecer un rango de consumo realista para el sistema. Entre los módulos analizados destacan el Pololu 3pi+, la cámara OpenMV, los servomotores y el microcontrolador TinyS3, cuyos consumos representan la mayor parte de la demanda energética. Con base en este análisis se definen los márgenes de seguridad necesarios para: el dimensionamiento de las rutas de potencia, la selección de celdas de Li-Ion 18650 y los elementos de protección de la placa.

La determinación de los requerimientos de potencia se realizó considerando tres aspectos principales: en primer lugar, se identificaron los módulos de mayor consumo eléctrico en la nueva placa, entre ellos el Pololu 3pi+, los servomotores, la cámara OpenMV y el microcontrolador TinyS3. Posteriormente, se recopilaron tanto los valores teóricos de corriente máxima de las hojas de datos como las mediciones experimentales disponibles. Finalmente, siguiendo la metodología propuesta por Álvarez [1], se aplicaron factores de reducción que reflejan condiciones reales de operación: el ciclo de trabajo de los servomotores, la ausencia de estados de *stall* sostenido y la eficiencia en cargas parciales. Esto permitió estimar consumos más cercanos al uso práctico y establecer una corriente máxima de diseño con suficiente holgura para cubrir los escenarios más exigentes.

7.3.1. Análisis de consumo

Para la etapa de pruebas se utilizaron baterías de Li-Ion tipo 18650 de 2600 mAh. Con estas celdas se llevaron a cabo las evaluaciones de la nueva placa electrónica. De acuerdo con mediciones previas realizadas por Álvarez [1], se establecieron los valores de potencia máxima soportada por cada celda, lo cual permitió definir los límites operativos seguros.

El análisis de consumo se centró en los módulos principales empleados en este proyecto, con el fin de determinar la autonomía del agente y la corriente máxima de descarga sin sobrepasar las capacidades de la celda. En el Cuadro 6 se presenta el cálculo de potencia máxima de cada módulo considerado.

Cuadro 6 Análisis de potencia máxima por módulo

Módulo	Voltaje de alimentación	Corriente consumida	Potencia
TinyS3	3.3 V	0.34 A	1.12 W
Pololu 3pi+	3.8 V	1.20 A	4.56 W

Nota. Datos obtenidos de [1, Cuadro 7].

El Cuadro 7 resume la corriente máxima considerada por módulo, con base en mediciones y fichas técnicas: para el Pololu 3pi+ se emplea el valor reportado por Álvarez [1]; para el servomotor FeeTech FT90M se toma la corriente de bloqueo (*stall*) de la hoja de datos [16]; y para la OpenMV Cam H7 se adopta el consumo en estado activo con tarjeta *μsd* [9].

Cuadro 7 Corriente máxima consumida por cada módulo del sistema

Módulo	Voltaje de operación	Corriente máxima
Pololu 3pi+	3.8 V	1.20 A [1]
Servomotor FeeTech FT90M	6.0 V	1.00 A (<i>stall</i>) [16]
OpenMV Cam H7	3.3 V	0.17 A (activo con <i>μsd</i>) [9]

Nota. Los valores representan condiciones de peor caso: máxima corriente medida para el Pololu, corriente de *stall* en el FT90M y consumo activo máximo de la OpenMV Cam H7.

A partir de estos valores máximos se aplicaron factores de uso realista, de acuerdo con Álvarez [1], para estimar las corrientes efectivas de operación. Dichos factores consideran que los servomotores no permanecen en *stall* de forma sostenida, que el ciclo de trabajo promedio es reducido y que la eficiencia en cargas parciales mejora el consumo.

Cuadro 8 Corriente en la práctica por módulo y combinaciones, considerando factores de uso realista

Módulo / Combinación	Corriente Máx. (A)	Factor	Corriente Práctica (A)
MG90S (3 unidades)	2.06	0.40	0.82
Servomotor FeeTech FT90M (1 unidad)	1.00	0.40	0.40
TinyS3	0.34	0.80	0.27
Pololu 3pi+	1.20	0.75	0.90
OpenMV Cam H7	0.17	1.00	0.17
Pololu 3pi+ + OpenMV Cam H7	1.20	0.85	1.02
Pololu 3pi+ + 2 servomotores FT90M	–	–	1.70
Pololu 3pi+ + 3 servomotores FT90M (asíncronos)	–	–	2.10
Pololu 3pi+ + 2 servomotores FT90M + OpenMV Cam H7	–	–	1.87
Pololu 3pi+ + 3 servomotores FT90M (asínc.) + OpenMV Cam H7	–	–	2.27 (máx.)

Nota. Cálculos basados en los factores de uso reportados en [1, Cuadro 8]. Para el FT90M se aplicó un criterio conservador del 40%.

En particular, a partir de los valores resumidos en el Cuadro 8, se observó que es factible operar la cámara junto con tres servomotores siempre que no existan cargas elevadas ni condiciones de *stall* sostenido. Durante las pruebas realizadas se comprobó que, bajo

carga significativa y con los tres actuadores activados simultáneamente, pueden producirse caídas de voltaje que ocasionen apagones momentáneos en el sistema. Por ello, el funcionamiento óptimo se alcanza utilizando únicamente dos servomotores de manera simultánea, especialmente en combinación con la cámara. En escenarios asincrónicos, donde los tres servomotores no generan movimiento al mismo tiempo, es posible emplearlos sin comprometer la estabilidad general; sin embargo, en configuraciones con tres servomotores se recomienda evitar el uso concurrente de la cámara, a menos que los servomotores trabajen de manera asincrónica.

El Cuadro 9 resume los escenarios más relevantes observados durante las pruebas y la recomendación de uso en cada caso. A partir de estas consideraciones, se adopta como corriente máxima de uso un umbral de al menos $3 A$, que incorpora una holgura razonable considerando consumos adicionales de módulos auxiliares de la placa (convertidores *boost*, capacitores, circuitería de señal, etc.). Además, en muy pocos casos se activan todos los módulos simultáneamente, por lo que este criterio de $3 A$ resulta adecuado para garantizar una operación segura sin sobredimensionar el sistema. Este valor se utilizó como referencia principal para dimensionar las pistas de potencia, seleccionar los elementos de protección y validar la capacidad del regulador de voltaje.

Cuadro 9. Escenarios de operación con servomotores y cámara, observados durante las pruebas experimentales

Configuración	Recomendación	Observaciones
2 servomotores + cámara	Óptima	Operación estable y sin riesgo de apagones. Escenario recomendado como configuración base.
3 servomotores (sin cámara)	Factible	Funciona de manera estable mientras no exista carga elevada o condiciones de <i>stall</i> sostenido. Se recomienda que los servos no se utilicen de manera sincrónica.
3 servomotores + cámara (asincrónicos)	Posible con precaución	Factible siempre que los servos no se activen de forma simultánea bajo carga. Existe riesgo de picos de corriente si coinciden los movimientos.
3 servomotores + cámara (sincrónicos y en carga)	No recomendable	Puede ocasionar caídas de voltaje y apagones momentáneos en el sistema.

Nota. Escenarios determinados a partir de pruebas experimentales realizadas con el sistema completo. Elaboración propia.

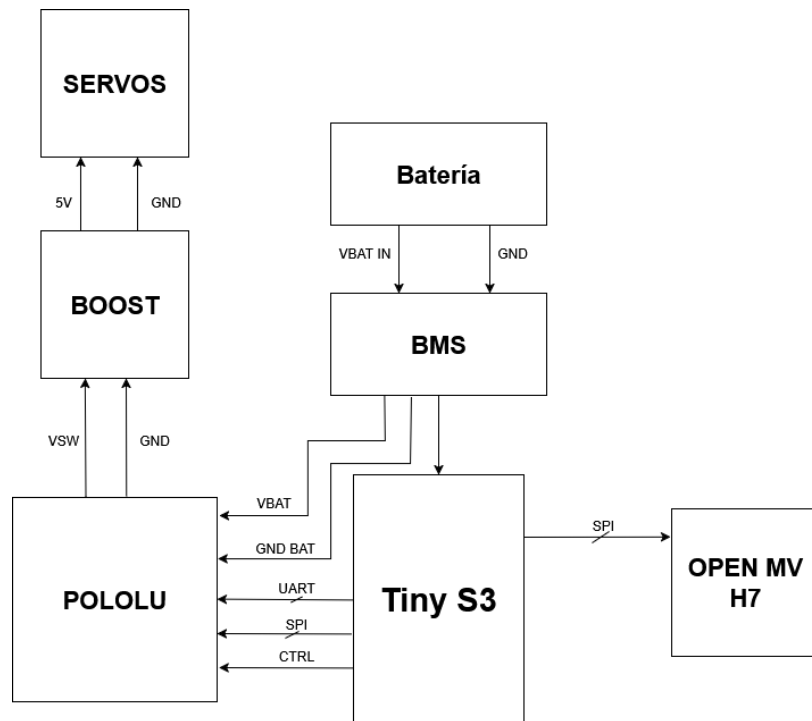
El análisis de consumo permitió establecer los valores de corriente práctica y los escenarios operativos más exigentes del sistema, tomando como referencia los resultados del Cuadro 8 y las configuraciones evaluadas experimentalmente. Estos valores sirven como base para definir los límites seguros de operación y los márgenes necesarios para el diseño eléctrico de la placa. Con estos criterios establecidos, la siguiente sección aborda el dimensionamiento de pistas, la selección de protecciones y las consideraciones relacionadas con la distribución de potencia en la PCB.

7.4. Diseño electrónico de la placa de expansión

A continuación se describen las conexiones establecidas en la nueva placa electrónica diseñada para el agente robótico Pololu 3pi+. Se incluyen tanto las rutas de comunicación originales como las nuevas interconexiones necesarias para integrar módulos adicionales. Entre estas conexiones destacan la comunicación con el Pololu 3pi+, la cámara OpenMV, los servomotores y el microcontrolador TinyS3.

Para documentar las conexiones de la nueva placa se elaboró un diagrama general que muestra de forma esquemática la interrelación entre el Pololu, los servomotores, la cámara OpenMV y el microcontrolador TinyS3. Este diagrama permite identificar claramente las rutas de comunicación, los módulos principales y la distribución de las señales dentro del sistema.

Figura 16. Diagrama general de conexiones del sistema



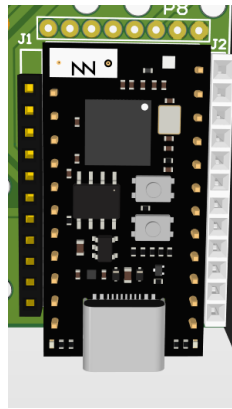
Nota. Elaboración propia

Puertos disponibles y expansiones futuras

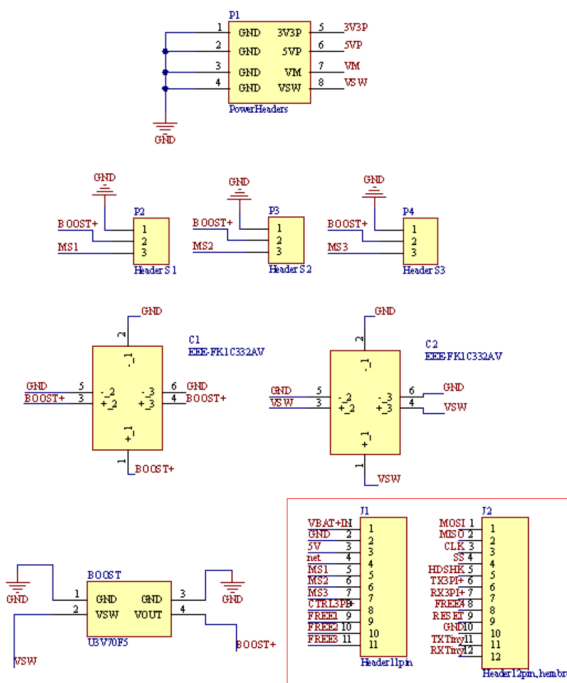
En el rediseño de la placa se consideró la disponibilidad de pines adicionales para facilitar futuras expansiones. En particular, se dejaron libres los GPIO 0, 21, 5 y 6, que pueden configurarse para diferentes protocolos de comunicación (SPI, UART o I²C), o bien utilizarse para otras funciones personalizadas que se requieran. Esta característica representa una mejora respecto a la versión anterior de la placa, que no contemplaba pines de propósito general disponibles para el usuario.

Cabe destacar que los GPIO del TinyS3 cuentan con multiplexores internos, lo que permite configurarlos dinámicamente según la tarea requerida. Además, se añadieron *headers* a los costados de la placa (J1 y J2), de modo que se puedan realizar conexiones externas a estos mismos pines en caso de necesitarse. En la Figura 17 se muestra la disposición de estos *headers* en el diseño de la nueva placa.

Figura 17. Pines de expansión disponibles en la nueva placa (vista real y diagrama esquemático)



(a) Captura del diseño de la placa



Alimentación y control de servomotores

(b) Diagrama esquemático de los *headers*

Nota. Imágenes obtenidas del diseño de la placa rediseñada. Elaboración propia.

Cuadro 10. Asignación de pines del TinyS3 en la placa rediseñada

Número de Pin	Uso asignado
1	Servomotor 1
2	Servomotor 2
3	Servomotor 3
4	Encendido agente
5	Libre
21	Libre
0	Libre
35	MOSI (SPI)
36	MISO (SPI)
37	SCK (SPI)
34	SS (SPI)
9	Libre
8	TX hacia Pololu
44	RX propio del TinyS3
43	TX propio del TinyS3
7	RX hacia Pololu

Nota. Distribución de pines definida en el rediseño de la placa, organizada para compatibilidad con servomotores, comunicación SPI y UART. Elaboración propia.

7.4.1. Conexiones modificadas

Ruta del *boost*

En el rediseño se emplea un módulo *step-up voltage regulator U3V70F5* de 5 V para alimentar a los servomotores. En la placa desarrollada previamente por Álvarez se utilizaba un módulo elevador genérico de 5 V–1 A conectado directamente a la batería, cuya salida alimentaba a los servomotores y a una circuitería de MOSFET [1]. Esta configuración presentaba un funcionamiento inconsistente: en algunas ocasiones mantenía el voltaje estable, pero en otras no, provocando fallos en la operación de los actuadores.

En una primera fase de pruebas del nuevo diseño, el módulo U3V70F5 se conectó de forma directa a la batería, pero la salida resultó inestable debido a un desajuste de impedancias entre ambos elementos. Para resolver este problema, se modificó la topología de conexión: ahora la batería se conecta a la entrada **VBAT** del Pololu 3pi+, y desde el pin **VSW** del mismo se alimenta la entrada del módulo *boost*. Finalmente, la salida del *boost* suministra los 5 V requeridos por los servomotores. De este modo, la ruta de alimentación queda definida como: **batería** → **pin VBAT (Pololu)** → **pin VSW** → **módulo *boost*** → **servomotores**.

Según la documentación oficial de Pololu, el pin VSW corresponde a la salida del circuito de conmutación de potencia, el cual incluye protección contra inversión de polaridad y un interruptor controlado [25]. Esto garantiza que la energía entregada al módulo *boost* sea más estable y confiable, lo que redujo de manera significativa los problemas de caídas de tensión

e inconsistencias observados en el diseño anterior.

Otros cambios de conexión

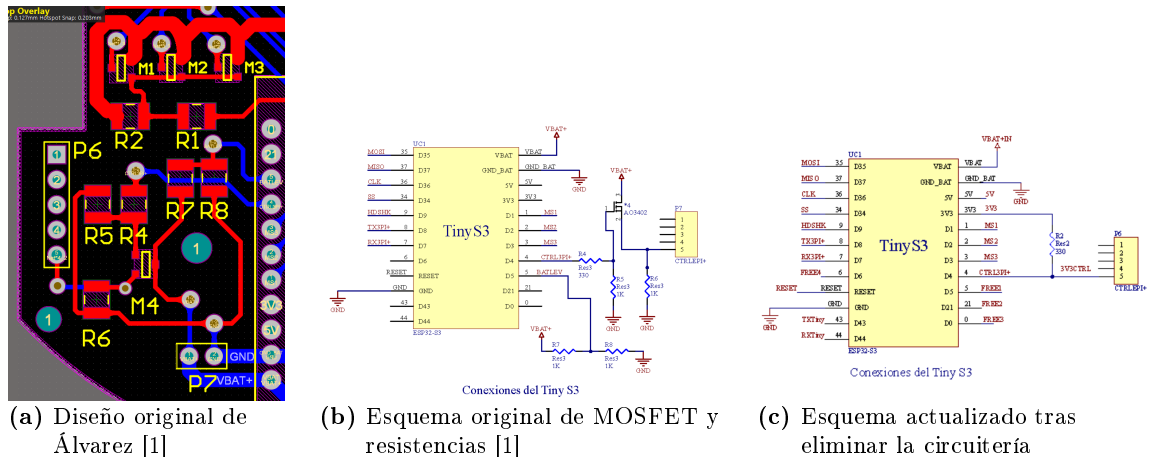
Además de la modificación en la ruta del *boost*, se realizaron ajustes en varias conexiones con el objetivo de simplificar el diseño y eliminar circuitería que ya no era necesaria. En particular, se retiraron todas las resistencias asociadas a circuitos en desuso, así como la circuitería implementada con MOSFET en la versión anterior de la placa.

Entre los principales cambios destacan los siguientes:

- Eliminación de las resistencias **R7**, **R8** y **R6**, que estaban conectadas al GPIO 5 y se utilizaban en la medición de voltaje de la batería. Dado que dicho pin quedó libre en el nuevo diseño, estas resistencias dejaron de ser necesarias.
- Eliminación de las resistencias **R5**, **R4** y **R6** asociadas al pin CTRL3Pi, que actuaba como señal de control en la versión previa.
- Retiro del MOSFET **M4**, el cual conectaba el pin CTRL3Pi con las líneas VBAT y BATLEV, ya que este control no será implementado en el nuevo diseño.
- Eliminación de los MOSFET **M1**, **M2** y **M3**, los cuales formaban parte de la conexión con el módulo *boost* y los servomotores en la placa anterior.

Todas estas conexiones se muestran en la Figura 18, donde se presenta la placa diseñada por Álvarez junto con el esquema original de MOSFET y el esquema actualizado con la circuitería eliminada.

Figura 18. Comparación entre la circuitería original y la circuitería depurada en el rediseño



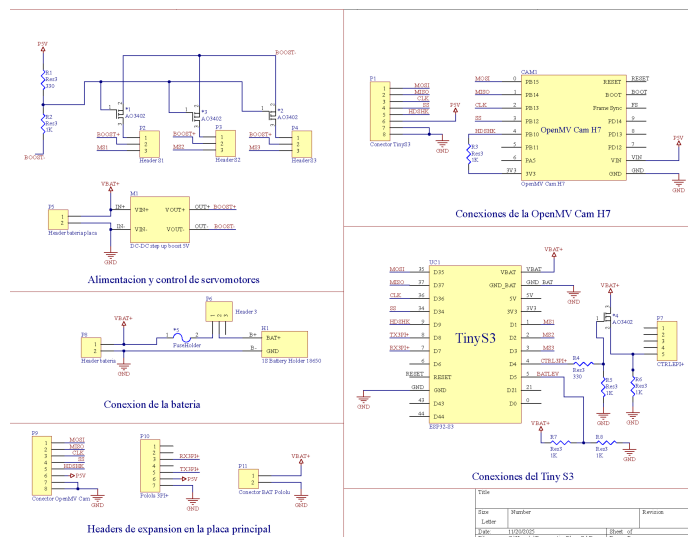
Nota. Capturas obtenidas de la placa diseñada por Álvarez y de los esquemas utilizados para depurar la circuitería en el nuevo diseño. Elaboración propia

En la versión original, la circuitería incluía múltiples MOSFET y redes de resistencias destinadas al control de voltaje y a la conmutación del módulo *boost*. Esto puede observarse en las subfiguras 18a y 18b, donde se muestra tanto el diseño físico de la placa anterior como el esquema eléctrico asociado a los MOSFET y resistencias utilizados. Sin embargo, durante el análisis se determinó que estas funciones no eran necesarias para el nuevo diseño, ya que la gestión de energía recae directamente en el regulador *step-up* y en el sistema de protección de la batería. Al eliminar esta circuitería, representada en la subfigura 18c, se redujo la complejidad del diseño, se liberaron pines del microcontrolador y se simplificó la distribución de potencia, manteniendo únicamente las conexiones esenciales para la operación del Pololu, los servomotores y la cámara.

En el nuevo diseño también se integró un módulo **BMS de 3 A**, encargado de proteger la celda de Li-Ion utilizada en el sistema contra condiciones de sobrecarga, sobredescarga y cortocircuito. De esta forma, se garantiza una operación más segura y confiable de la batería. Posteriormente, la salida del BMS se conecta a un interruptor general, el cual permite encender y apagar el Pololu 3pi+ de manera controlada, añadiendo un nivel adicional de seguridad y practicidad al sistema.

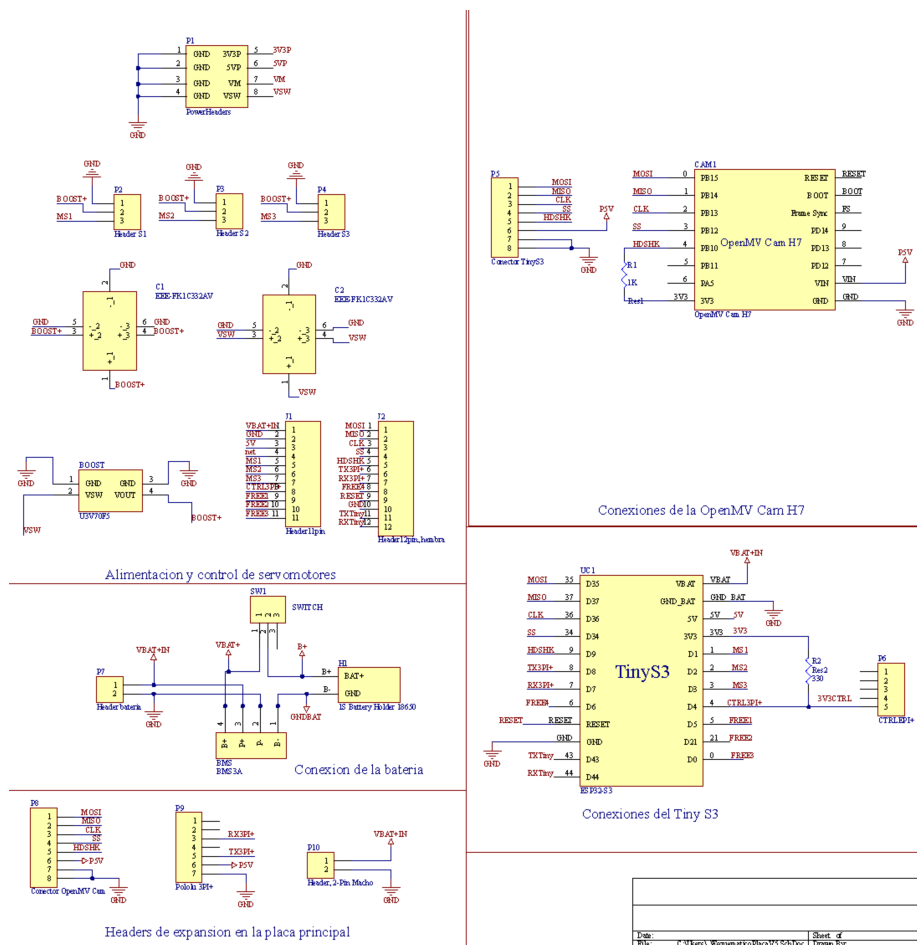
Para ilustrar los cambios realizados en la circuitería, en la Figura 19 se presentan las conexiones originales de la placa desarrollada por Álvarez [1], donde puede observarse la inclusión de MOSFET, resistencias y rutas de control destinadas al manejo del módulo *boost* y a la medición de voltaje de la batería. En contraste, la Figura 20 muestra el nuevo esquema eléctrico elaborado por el autor, en el cual se eliminaron dichos elementos para simplificar la distribución de potencia y evitar circuitería innecesaria. Esta comparación permite apreciar la reducción en complejidad y la reorganización de las conexiones en la versión final del diseño.

Figura 19. Esquemático original de la placa diseñada por Álvarez



Nota. Esquemático obtenido del modelo de Altium proporcionado por Álvarez [1].

Figura 20. Esquemático actualizado de la nueva placa rediseñada por el autor



Nota. Elaboración propia

Reglas de dimensionamiento

Para el cálculo de los anchos de pista se utilizó la herramienta en línea ANSI IPC-2221A PCB Trace Width Calculator [18], donde se introdujeron los parámetros eléctricos y de diseño correspondientes a cada escenario. Con base en la corriente máxima de diseño (3 A), se determinó el ancho requerido de pista para garantizar una operación confiable y evitar sobrecalentamientos.

En la Figura 21 se muestra el resultado para el caso de 3 A, correspondiente a las líneas de potencia que conectan la batería con el sistema. Para estas rutas se seleccionó un ancho de aproximadamente 71 mil, tal como lo recomienda la calculadora. De igual manera, en la Figura 22 se presenta el caso de 2.6 A, utilizado como referencia para la conexión hacia el módulo *boost*, donde se definieron pistas de alrededor de 60 mil. Finalmente, en la Figura 23 se muestra el caso de 2 A, aplicado a pines de comunicación y señales provenientes del TinyS3, en los que se adoptó un ancho de 41 mil.

Figura 21. Cálculo de ancho de pista para 3 A (líneas de energía principales)

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	3	Amps	Required Trace Width	70.87	mil	27.24	mil
Temperature Rise (max. 100°C)	32	°C	Cross-section Area	95.24	mil ²	36.61	mil ²
Cu thickness	1	oz/ft ²	Resistance	0.02	Ω Ohms	0.04	Ω Ohms
Ambient Temperature	20	°C	Voltage Drop	0.05	Volts	0.13	Volts
Conductor Length	2	inches	Loss	0.14	Watts	0.38	Watts
Peak Voltage	5	Volts	Required Track Clearance	24	mil		

Nota. Captura obtenida de la calculadora online [18].

Figura 22. Cálculo de ancho de pista para 2.6 A (alimentación hacia el módulo *boost*)

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	2.6	Amps	Required Trace Width	58.18	mil	22.36	mil
Temperature Rise (max. 100°C)	32	°C	Cross-section Area	78.18	mil ²	30.05	mil ²
Cu thickness	1	oz/ft ²	Resistance	0.02	Ω Ohms	0.05	Ω Ohms
Ambient Temperature	20	°C	Voltage Drop	0.05	Volts	0.13	Volts
Conductor Length	2	inches	Loss	0.13	Watts	0.34	Watts
Peak Voltage	5	Volts	Required Track Clearance	24	mil		

Nota. Captura obtenida de la calculadora online [18].

Figura 23. Cálculo de ancho de pista para 2 A (GPIO y líneas de comunicación)

ANSI PCB TRACE WIDTH CALCULATOR							
Input Data			Results Data				
Field	Value	Units	Trace Data	Internal Traces		External Traces	
				Value	Units	Value	Units
Current (max. 35A)	2	Amps	Required Trace Width	40.51	mil	15.57	mil
Temperature Rise (max. 100°C)	32	°C	Cross-section Area	54.44	mil ²	20.93	mil ²
Cu thickness	1	oz/ft ²	Resistance	0.03	Ω Ohms	0.07	Ω Ohms
Ambient Temperature	20	°C	Voltage Drop	0.06	Volts	0.15	Volts
Conductor Length	2	inches	Loss	0.11	Watts	0.29	Watts
Peak Voltage	5	Volts	Required Track Clearance	24	mil		

Nota. Captura obtenida de la calculadora online [18].

De forma complementaria, también se aplicaron las reglas de manufactura establecidas en el documento de especificaciones del MakerLab de la Universidad del Valle de Guatemala [19]. Dichas reglas corresponden a los límites mínimos y recomendados de pistas, *pads* y

agujeros que pueden cumplirse con el equipo de fresado LPKF S103, y sirvieron como referencia práctica durante el diseño de la placa, ya que los primeros prototipos se fabricaron en este espacio. A continuación se presentan algunas de estas reglas de dimensionamiento en forma de tablas, que resumen los parámetros aplicados en el proceso de diseño.

7.4.2. Distribución de componentes

La nueva distribución de componentes en la placa de expansión se diseñó con el objetivo de optimizar el flujo de energía, reducir interferencias entre líneas de potencia y señal, y facilitar la conexión de módulos externos. En la Figura 24 se muestra el esquema general de esta distribución, donde se destacan los principales elementos mediante un código de colores que permite identificar claramente su ubicación y función dentro del sistema.

En color **morado** se encuentra el **interruptor principal**, encargado de controlar el encendido y apagado general de la placa. Este componente permite interrumpir o habilitar el paso de energía desde la batería hacia el microcontrolador TinyS3 y el resto de los módulos.

El área **rosada** corresponde al **alimentador del elevador de voltaje**, cuya señal proviene del pin **VSW** del Pololu 3pi+. Dicho pin se utiliza también en la alimentación de los motores del Pololu como tal, por lo que su conexión directa hacia el módulo elevador asegura un suministro estable de energía.

En **amarillo** se identifica el **módulo elevador de voltaje (*boost*)**, ubicado sobre el pin de control **CTRL**, el cual permite activar o desactivar al Pololu 3pi+.

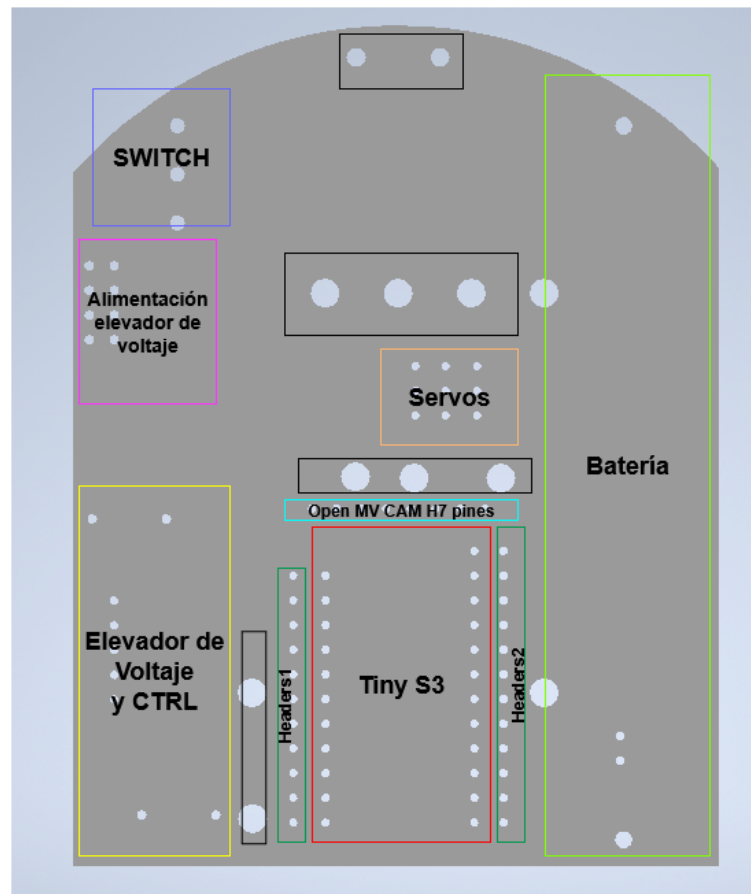
El **TinyS3**, representado en **rojo**, se encuentra en el área central de la placa, lo que facilita la distribución de las líneas de comunicación y potencia hacia los demás módulos. En **naranja** se ubican los **pines de conexión de los servomotores**, agrupados para reducir la longitud de las pistas y simplificar su enrutamiento.

En la zona **celeste** se muestran los **pines destinados a la cámara OpenMV Cam H7**, cuya ubicación se seleccionó para minimizar la interferencia con los servomotores y mantener la cámara cercana al borde frontal de la placa.

La **batería** se ubica en el área **verde claro**, en una posición que garantiza un centro de masa equilibrado y facilita su conexión directa con el módulo BMS, el cual se encuentra ubicado en la parte trasera de la placa en la misma posición que la batería. Por su parte, en **verde oscuro** se encuentran los **headers de expansión**, los cuales derivan directamente de los GPIO del TinyS3 y permiten la conexión de módulos adicionales para futuras ampliaciones del sistema.

Finalmente, los cuadros en **negro** corresponden a los **agujeros de montaje**, distribuidos para fijar la placa y permitir la instalación de componentes mecánicos adicionales, como la base de la cámara u otros accesorios que se desarrollen posteriormente.

Figura 24. Distribución general de los componentes en la nueva placa



Nota. Esquema mostrando la ubicación de los principales componentes del sistema.
Elaboración propia.

Una vez definidos los requerimientos eléctricos, seleccionados los componentes principales y establecida la distribución general de la placa, se obtuvo una base electrónica sólida sobre la cual continuar el desarrollo del sistema. Con la arquitectura de alimentación asegurada y las rutas de potencia y señal correctamente dimensionadas, el siguiente paso consistió en trasladar este diseño hacia su implementación física. Esto implicó iterar tanto sobre la placa electrónica como sobre la base mecánica de la cámara, ajustando cada versión a partir de pruebas reales hasta alcanzar un funcionamiento estable y compatible con las exigencias del entorno Robotat. A continuación, se presenta el proceso completo de iteración y desarrollo que dio lugar a la versión final de la placa de expansión y de la base para la cámara OpenMV H7.

Proceso de iteración y desarrollo del diseño de la placa de expansión y base para la cámara OpenMV H7

El rediseño de la placa de expansión y el desarrollo de la base ajustable para la cámara OpenMV H7 se llevaron a cabo mediante un proceso iterativo que combinó análisis técnico, modelado, prototipado y validación práctica. Ambos elementos evolucionaron en paralelo, ya que los requerimientos electrónicos influyeron directamente en el diseño mecánico, y, de forma recíproca, las restricciones dimensionales y estructurales de la base mecánica afectaron la disposición de los componentes en la placa. Este capítulo presenta el proceso completo de iteración y describe cómo cada versión contribuyó a obtener un sistema más estable, funcional y adecuado para el entorno Robotat.

8.1. Metodología

El proceso de diseño combinó metodologías tanto electrónicas como mecánicas bajo un enfoque iterativo. Para el caso de la placa electrónica, el trabajo inició con una revisión detallada del diseño desarrollado por Álvarez [1]. Esta versión sirvió como referencia para identificar los módulos y conexiones que funcionaban correctamente, así como los elementos que generaban problemas de estabilidad, especialmente en la alimentación de los servomotores y en la gestión del voltaje proveniente de la celda de ion-litio. A partir de esta revisión se recopiló los consumos eléctricos reales de cada módulo, contrastando valores de hojas de datos con mediciones experimentales. Esto permitió establecer requerimientos de corriente más precisos y definir un criterio de diseño apropiado para la selección del regulador *step-up*, los capacitores y el sistema de protección mediante BMS.

Con base en esta información, se analizaron distintos módulos reguladores y configuraciones de alimentación, realizando pruebas prácticas para verificar su desempeño bajo

carga real. El diseño esquemático en Altium se fue ajustando en cada iteración, eliminando circuitería innecesaria, reorganizando rutas de potencia y señal, simplificando conexiones y optimizando la ubicación de los *headers*. Cada versión fue validada mediante prototipos fabricados tanto en el MakerLab UVG como en OSH Park, lo que permitió evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación reales. A partir de los resultados obtenidos, se realizaron ajustes adicionales que dieron lugar a una versión final estable y adecuada para integrar el microcontrolador TinyS3, los servomotores y la cámara OpenMV.

En paralelo, el diseño de la base ajustable para la cámara se desarrolló siguiendo un proceso similar, basado en modelado CAD, verificación mecánica y pruebas físicas. El trabajo inició con la definición de los requerimientos geométricos y funcionales, considerando el espacio disponible sobre la placa de expansión, el rango de inclinación deseado y la necesidad de garantizar estabilidad durante el movimiento. Con esta información se generaron los modelos 3D en Autodesk Inventor, analizando la disposición del servomotor, las articulaciones y los elementos estructurales del mecanismo. Cada versión fue sometida a simulaciones para verificar interferencias, rigidez y capacidad de movimiento, antes de pasar a su fabricación mediante impresión 3D en material PLA.

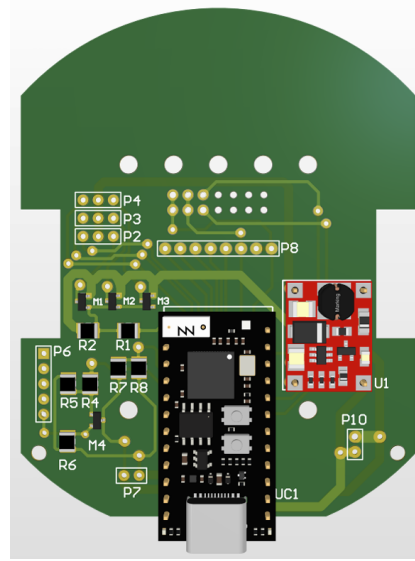
Los prototipos impresos permitieron evaluar tolerancias, capacidad de fijación y comportamiento dinámico del mecanismo, especialmente en presencia de vibraciones generadas por los servos o por el movimiento del robot. A partir de las observaciones realizadas se llevaron a cabo ajustes en geometrías, ángulos de articulación y métodos de ensamblaje, lo que permitió depurar el diseño hasta obtener una versión final funcional, estable y totalmente integrada con la placa rediseñada. De esta manera, tanto la placa electrónica como la base mecánica evolucionaron de forma coordinada.

Versión de referencia (Álvarez)

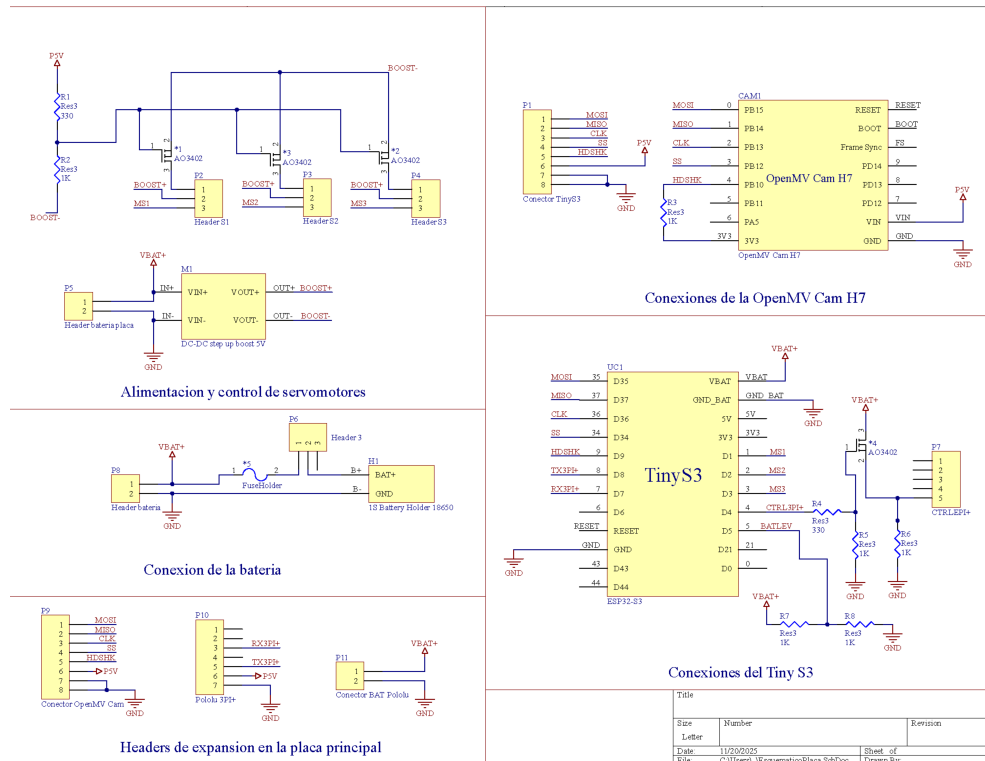
La versión final desarrollada por Álvarez [1] sirvió como punto de partida para este trabajo. Esta placa funcionaba de manera general, pero presentaba problemas de estabilidad en la alimentación de los servomotores, especialmente bajo cargas dinámicas. A partir de este diseño se realizaron pruebas iniciales con el objetivo de identificar qué elementos del circuito operaban correctamente y cuáles requerían ajustes, lo que permitió orientar el proceso de rediseño. Estas pruebas también incluyeron la medición de corrientes y voltajes en distintos puntos críticos de la placa para analizar el comportamiento del regulador, la caída de tensión en las rutas de potencia y la respuesta bajo cargas variables. Gracias a este análisis fue posible determinar qué componentes, secciones o decisiones de diseño contribuían a los problemas observados y cuáles podían conservarse sin modificaciones.

La Figura 25 muestra tanto el esquemático original generado en Altium como el modelo tridimensional de la placa empleada por Álvarez.

Figura 25. Placa de referencia diseñada por Álvarez: vista 3D y esquemático original



(a) Vista 3D del modelo original



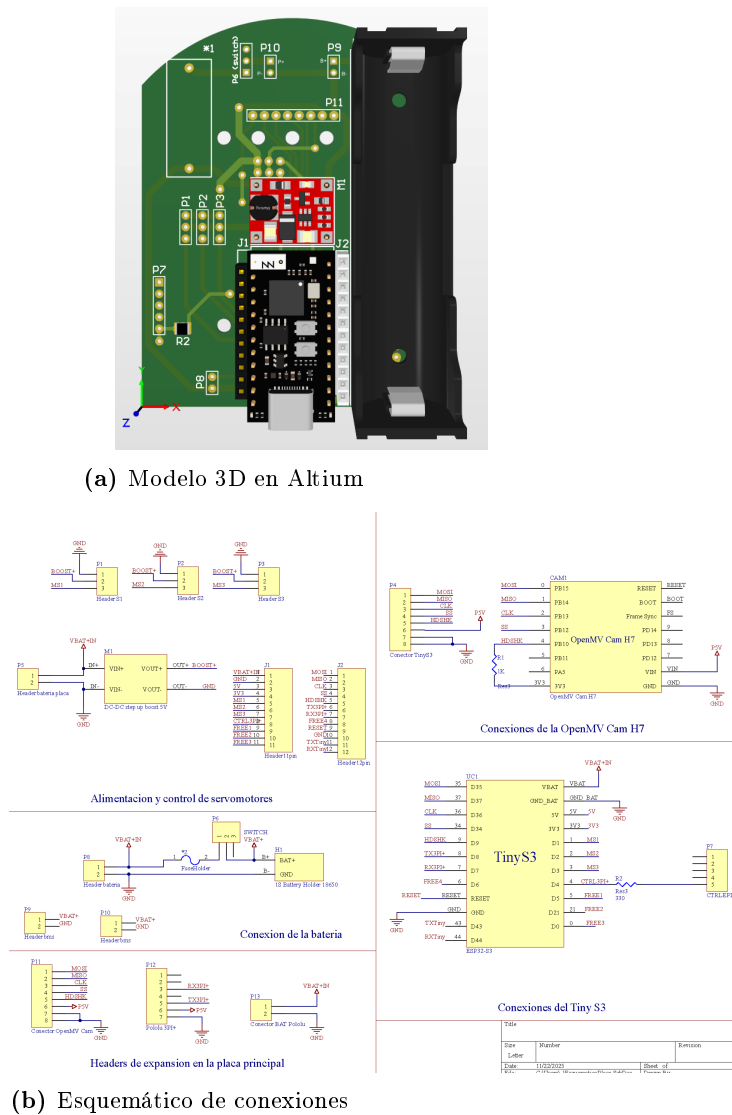
(b) Esquemático original de la placa

Nota. Imágenes tomadas del proyecto original de Álvarez [1].

Primera iteración (MakerLab UVG)

La primera versión fabricada en el MakerLab (UVG) fue una réplica simplificada de la placa de Álvarez, en la que se eliminaron los MOSFET y redes de resistencias que ya no eran necesarias para el nuevo diseño. Esta iteración permitió verificar que, al retirar dicha circuitería, el resto del sistema continuara operando correctamente sin afectar la comunicación con el Pololu 3pi+ ni la distribución de potencia. Asimismo, se evaluó nuevamente el módulo *boost* utilizado en la placa original, realizando pruebas con varias unidades comerciales [20]; sin embargo, todas presentaron inestabilidad, confirmando la necesidad de sustituir este regulador. En la Figura 26 se muestran el modelo 3D y el esquemático correspondientes a esta primera versión, ambos de elaboración propia.

Figura 26. Primera iteración de la placa: modelo 3D y esquemático



Nota. Elaboración propia.

Pruebas en *protoboard*

Previo a la fabricación de la segunda iteración, se realizaron pruebas en *protoboard* con el Pololu y varios servomotores, con el objetivo de validar el consumo y el funcionamiento básico de los módulos bajo condiciones controladas. En esta etapa se evaluaron diferentes reguladores *boost*, resistencias y capacitores, lo que permitió identificar comportamientos inestables y anticipar posibles problemas antes de incorporarlos a una nueva versión de la placa.

De manera complementaria, el *protoboard* continuó utilizándose en las siguientes iteraciones para verificar de forma preliminar si las conexiones propuestas representaban una mejora y si ciertos componentes podían sustituirse o reubicarse. Este proceso permitió detectar fallas de forma temprana y contribuyó a un refinamiento progresivo del diseño electrónico antes de avanzar a nuevas etapas de fabricación. Además, el uso del *protoboard* facilitó la experimentación con distintas capacitancias en los capacitores de filtrado, permitiendo observar en tiempo real cómo variaban los picos de corriente, las caídas de tensión y la estabilidad del *boost* bajo cargas rápidas. Este enfoque permitió ajustar los valores adecuados antes de realizar cualquier fabricación adicional asegurando que cada nueva versión de la placa partiera de un conjunto de decisiones más fundamentadas.

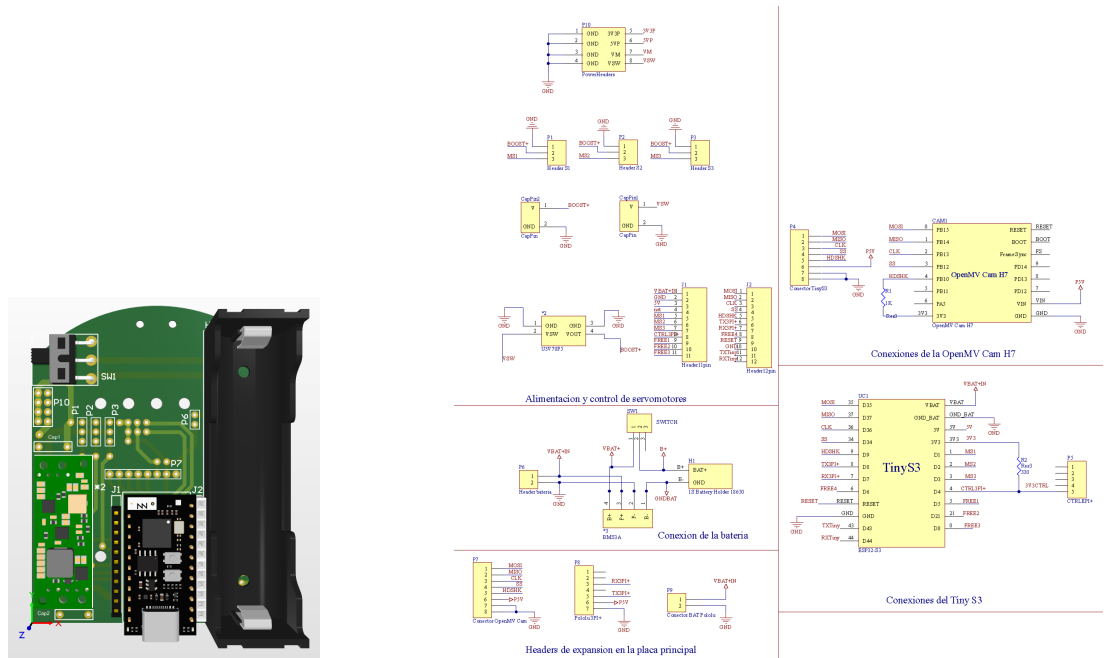
Segunda iteración

La segunda iteración representó un avance importante respecto a la primera versión. En esta etapa se realizaron cambios clave derivados directamente de las pruebas iniciales. El módulo elevador genérico fue reemplazado por el regulador U3V70F5, cuya estabilidad resultó muy superior durante las pruebas. Asimismo, se añadieron capacitores electrolíticos de 3300 μF que permitieron mejorar la respuesta transitoria del sistema y reducir las caídas de voltaje observadas en la iteración anterior.

Además, se incorporó un conjunto de *headers* de expansión para exponer pines adicionales del TinyS3, lo cual facilitó la conexión de periféricos en futuras pruebas. También se integró un compartimento para la batería dentro del propio diseño de la placa y se añadió un interruptor general para permitir un encendido y apagado controlado del robot. Todos estos cambios surgieron como resultado de las limitaciones detectadas en la versión previa, especialmente en lo referente al suministro de potencia y la modularidad de las conexiones.

La Figura 27 presenta el esquemático actualizado y el modelo tridimensional de la placa correspondiente a esta segunda iteración.

Figura 27. Segunda iteración de la placa: modelo 3D y esquemático



(a) Modelo 3D del diseño en Altium

(b) Esquemático de la segunda iteración

Nota. Elaboración propia.

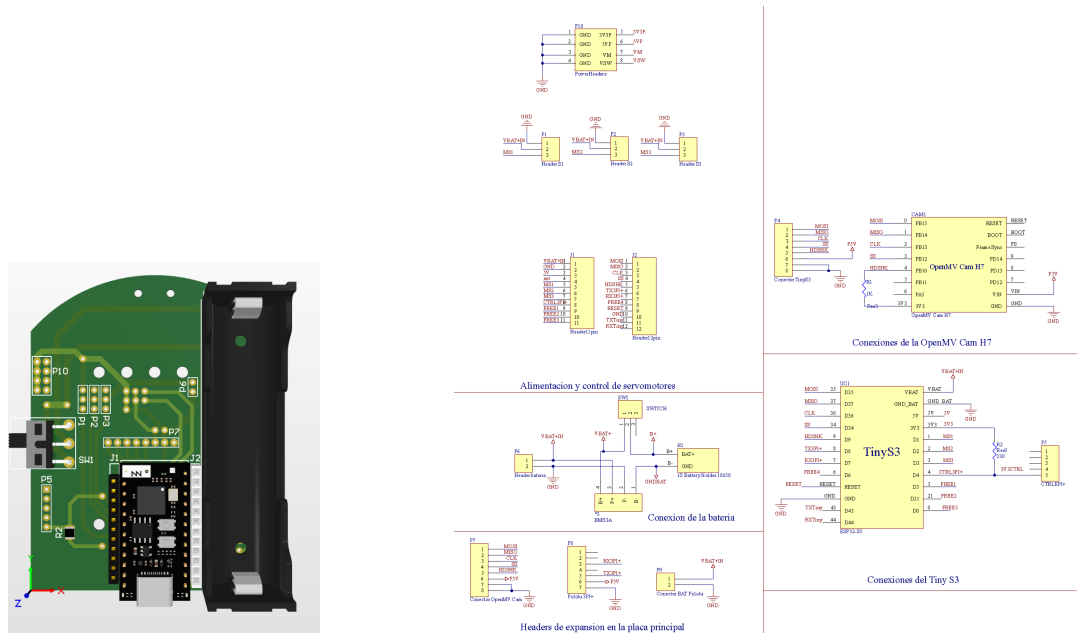
Tercera iteración

La tercera iteración de la placa se desarrolló con el objetivo de evaluar el funcionamiento del sistema sin emplear el módulo *boost*, de modo que todos los servomotores y módulos electrónicos fueran alimentados directamente desde la batería. En comparación con la segunda iteración, en esta versión se retiraron tanto los capacitores electrolíticos de alta capacidad como el regulador elevador de voltaje, dejando un sistema de alimentación más simple y directo.

Durante las pruebas, el comportamiento general fue estable: los servomotores lograron moverse sin fallas, y tanto la cámara como el microcontrolador operaron correctamente. Sin embargo, la ausencia del regulador implicó que la batería debía suministrar corrientes más elevadas de manera directa, lo cual reducía la autonomía y podía comprometer la estabilidad del sistema en el largo plazo, especialmente bajo cargas dinámicas. Con base en estos resultados, se concluyó que, aunque el sistema era funcional, no era recomendable mantener esta configuración para el diseño final.

La Figura 28 presenta el modelo tridimensional de la placa (izquierda) y el esquemático correspondiente a esta tercera iteración (derecha), ambos elaborados por el autor.

Figura 28. Tercera iteración de la placa: modelo 3D y esquemático.



(a) Modelo 3D en Altium.

(b) Esquemático de la tercera iteración.

Nota. Elaboración propia.

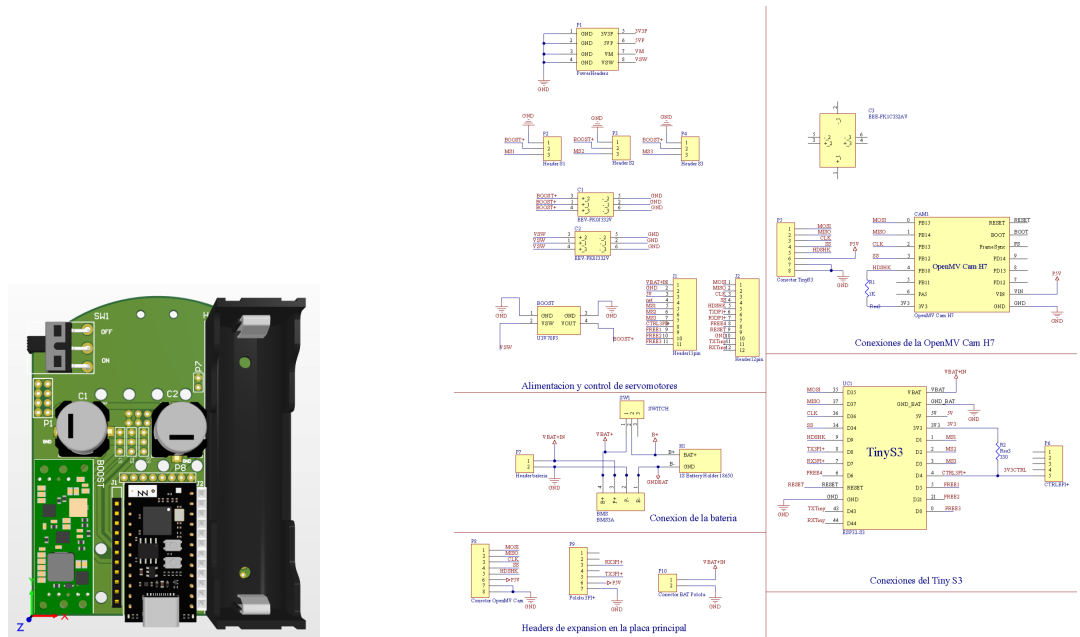
Cuarta iteración

La cuarta iteración correspondió al primer diseño enviado a fabricación profesional en el servicio OSH Park [5]. En esta versión se corrigieron detalles observados en iteraciones previas, entre ellos el reemplazo de capacitores de tipo THT por capacitores SMD de 3300 μF , específicamente el modelo Panasonic EEV-FK0J332V [26], lo que permitió optimizar el espacio en la PCB y mejorar la distribución de los componentes. A diferencia de los capacitores THT utilizados previamente (3300 μF –16 V), estos nuevos capacitores SMD operan con un límite de 6.3 V [26]. Si bien su función es equivalente, durante las pruebas realizadas se observó que con los SMD únicamente era posible operar simultáneamente dos de los tres servomotores, lo que sugiere que la restricción de voltaje pudo limitar su desempeño. Para contrastar este resultado, se soldaron temporalmente capacitores THT de 16 V sobre la misma placa, verificando que bajo esas condiciones los tres servomotores podían funcionar de manera estable. Este hallazgo resalta la importancia de la selección del tipo y voltaje de los capacitores dentro del diseño final.

Al igual que las versiones 2 y 3, este modelo ya cuenta con un módulo BMS para la protección de la batería, además de la inclusión de *headers* adicionales y agujeros que facilitan el montaje de módulos en la placa.

En la Figura 29 se presenta el modelo en Altium y sus conexiones eléctricas en forma de esquemático.

Figura 29. Cuarta iteración de la placa: modelo 3D y esquemático



(a) Modelo 3D en Altium

(b) Esquemático de la cuarta iteración

Nota. Elaboración propia.

Quinta iteración

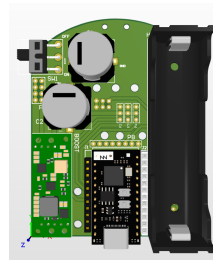
La quinta iteración de la placa se centró principalmente en la sustitución de los capacitores utilizados en la versión anterior. Aunque los capacitores SMD empleados previamente tenían una capacidad de $3300 \mu\text{F}$, su voltaje nominal era de 6.3 V , lo que limitaba la estabilidad del sistema e impedía el funcionamiento correcto de los tres servomotores de manera simultánea.

Para resolver esta limitación, se reemplazaron dichos capacitores por el modelo Panasonic EEE-FK1C332AV, con la misma capacitancia ($3300 \mu\text{F}$) pero un voltaje nominal de 16 V [27]. Esta modificación proporcionó un margen de operación más amplio frente a picos de tensión y permitió establecer un funcionamiento más estable de los servomotores, mejorando así la confiabilidad del sistema de potencia.

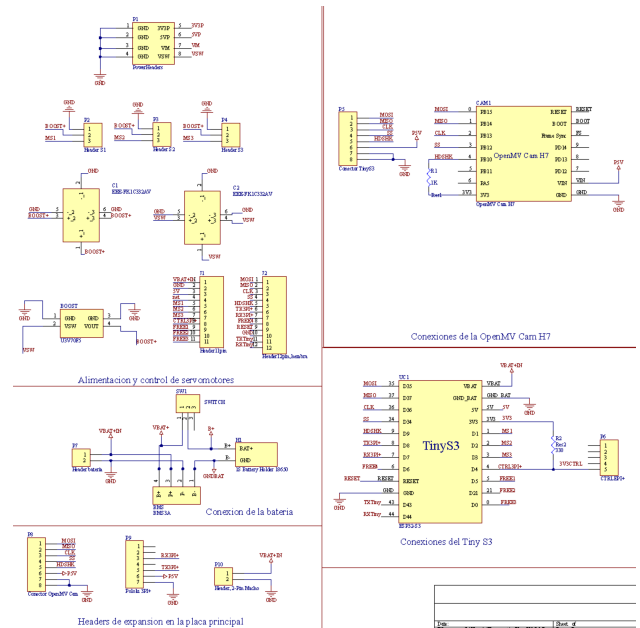
Cabe destacar que esta quinta versión constituye la **versión final de la placa**, la cual fue enviada a manufactura en Estados Unidos a través de la empresa OSH Park [5], encargada de la fabricación profesional de las placas electrónicas.

En la Figura 30 se muestra el modelo de la quinta iteración en Altium y sus conexiones eléctricas en forma de esquemático.

Figura 30. Quinta iteración de la placa: modelo 3D y esquemático



(a) Modelo 3D en Altium



(b) Esquemático de la quinta iteración

Nota. Elaboración propia.

Resumen de iteraciones de la placa

Con el fin de proporcionar una visión clara y comparativa del proceso evolutivo del diseño electrónico, a continuación se presenta un cuadro que resume los cambios más relevantes introducidos en cada iteración. Este resumen permite identificar de forma estructurada cómo se modificaron los módulos de alimentación, reguladores, capacitores, distribución física y procesos de fabricación a lo largo del desarrollo, mostrando la progresión técnica que llevó a la versión final de la placa de expansión. Además, este cuadro facilita la comprensión de qué componentes fueron añadidos, sustituidos o descartados durante cada una de las etapas, permitiendo visualizar cómo cada decisión afectó el rendimiento general del sistema. De esta manera, se obtiene un panorama más completo del proceso de mejora continua que se llevó a cabo, desde las primeras pruebas funcionales hasta las versiones más avanzadas, lo cual resulta especialmente útil para entender cómo evolucionó la arquitectura electrónica en respuesta a los resultados experimentales y a las necesidades detectadas en las diferentes pruebas realizadas.

Cuadro 11. Evolución de componentes clave a lo largo de las iteraciones de la placa de expansión

Característica	RV1	RV2	RV3	RV4	RV5
Módulo de gestión de energía (BMS) regulador / <i>boost</i>	No presente	BMS incorporado U3V70F5 añadido	BMS incorporado Eliminado	BMS incorporado U3V70F5 reinstalado	BMS mantenido U3V70F5 mantenido
Capacitores	Sin capacitores grandes	THT 3300 μ F	Eliminados	SMD 3300 μ F-6.3 V	THT 3300 μ F-16 V
<i>Headers</i> de expansión	Ausentes	Añadidos	Mantenidos	Reorganizados	Distribución final
Distribución física	Réplica del diseño original	Nuevo <i>layout</i> con batería e Interruptor	<i>layout</i> simplificado	Optimización SMD	Versión final optimizada
Fabricación	MakerLab UVG	MakerLab UVG	MakerLab UVG	OSH Park	OSH Park final

Nota. Elaboración propia

***Pinout* actualizado**

De forma complementaria, en el Anexo 12.3 se presenta el diagrama actualizado de conexiones y la descripción detallada del *pinout* de la placa rediseñada. Dicho anexo incluye la organización de los bloques funcionales (SPI, UART, potencia, control y expansión), así como la asignación de pines del microcontrolador TinyS3 empleada en esta versión. Esta información sirve como referencia práctica para comprender la estructura interna del sistema y su integración con los distintos módulos electrónicos.

Pruebas de validación

Con el objetivo de comprobar el funcionamiento integral del sistema electrónico rediseñado, se realizaron pruebas directas sobre el microcontrolador TinyS3 evaluando el desempeño de los módulos principales: control de servomotores mediante PWM, comunicación UART con el Pololu 3pi+ utilizando mensajes codificados en CBOR, transmisión de datos desde la cámara OpenMV H7 a través de SPI, y posterior envío del video mediante un servidor TCP implementado en el TinyS3. Estas pruebas permitieron verificar que el sistema era capaz de operar de manera estable incluso con cargas simultáneas y con tareas concurrentes ejecutándose en ambos núcleos del ESP32-S3.

El proceso se dividió en tres validaciones principales:

- **Control del Pololu 3pi+**: envío de velocidades diferenciales mediante UART utili-

zando CBOR.

- **Control de servomotores:** generación de PWM con MCPWM Prelude y ejecución de ciclos de movimiento continuo.
- **Streaming de video:** recepción de tramas de la OpenMV mediante SPI y retransmisión vía wifi usando un servidor TCP.

El código utilizado se desarrolló en PlatformIO, tomando como base el repositorio dejado por Álvarez [1] y ampliándolo para soportar operaciones simultáneas. La versión completa se encuentra disponible en GitHub [28], y en los Anexos 12.1 se incluyen los listados detallados.

A continuación se presentan fragmentos representativos del código empleado para validar el correcto funcionamiento del sistema.

Control del Pololu 3Pi+ mediante UART + CBOR

```
1  static void send_wheel_speeds(float left, float right) {
2      uint8_t buf[32];
3      CborEncoder enc, arr;
4
5      cbor_encoder_init(&enc, buf, sizeof(buf), 0);
6      cbor_encoder_create_array(&enc, &arr, 2);
7
8      cbor_encode_float(&arr, left);
9      cbor_encode_float(&arr, right);
10
11     cbor_encoder_close_container(&enc, &arr);
12
13     size_t n = cbor_encoder_get_buffer_size(&enc, buf);
14     uart_write_bytes(UART_PORT, (const char*)buf, n);
15 }
```

Listing 8.1. Envío de velocidades al Pololu mediante CBOR (código adaptado del repositorio original de Álvarez [29])

Control de servomotores con MCPWM

```
1  static void servo_init(servo_t *s, int group, gpio_num_t pin) {
2      mcpwm_timer_config_t tc = {
3          .group_id = group,
4          .resolution_hz = 1000000, // 1 MHz
5          .period_ticks = 20000, // 20 ms
6          .count_mode = MCPWM_TIMER_COUNT_MODE_UP
7      };
8      mcpwm_new_timer(&tc, &s->timer);
9
10     mcpwm_operator_config_t oc = { .group_id = group };
11     mcpwm_new_operator(&oc, &s->oper);
12     mcpwm_operator_connect_timer(s->oper, s->timer);
```

```

13
14     mcpwm_comparator_config_t cc = { .flags.update_cmp_on_tez =
15         true };
16     mcpwm_new_comparator(s->oper, &cc, &s->cmp);
17
18     mcpwm_generator_config_t gc = { .gen_gpio_num = pin };
19     mcpwm_new_generator(s->oper, &gc, &s->gen);
20
21     mcpwm_timer_enable(s->timer);
22     mcpwm_timer_start_stop(s->timer, MCPWM_TIMER_START_NO_STOP);
23 }

```

Listing 8.2. Inicialización de servomotores con MCPWM Prelude (código adaptado del repositorio original de Álvarez [29])

Streaming de video (SPI → Wifi TCP)

```

1     static void spi_receive_task(void *arg) {
2         spi_slave_transaction_t t;
3
4         while (1) {
5             memset(&t, 0, sizeof(t));
6             t.length = FRAME_BYTES * 8;
7             t.rx_buffer = rx_buffer;
8
9             spi_slave_transmit(SPI_HOST_USED, &t, portMAX_DELAY);
10        }
11    }

```

Listing 8.3. Recepción de tramas vía SPI desde la OpenMV H7 (código adaptado del repositorio original de Álvarez [29])

```

1     static void tcp_server_task(void *arg) {
2         int s = socket(AF_INET, SOCK_STREAM, 0);
3
4         struct sockaddr_in addr = {0};
5         addr.sin_family = AF_INET;
6         addr.sin_port = htons(PORT);
7         addr.sin_addr.s_addr = INADDR_ANY;
8
9         bind(s, (struct sockaddr*)&addr, sizeof(addr));
10        listen(s, 1);
11
12        while (1) {
13            struct sockaddr_in src;
14            socklen_t sl = sizeof(src);
15            int c = accept(s, (struct sockaddr*)&src, &sl);
16            if (c < 0) continue;
17
18            while (1) {
19                uint8_t cmd;
20                int r = recv(c, &cmd, 1, 0);

```

```

21         if (r <= 0) break;
22
23         if (cmd == 'A')
24             send(c, rx_buffer, FRAME_BYTES, 0);
25     }
26     close(c);
27 }
28 }

```

Listing 8.4. Servidor TCP para transmitir imágenes recibidas por SPI (código adaptado del repositorio original de Álvarez [29])

Resultados de validación

Los principales resultados obtenidos durante estas pruebas se resumen en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Resultados obtenidos durante las pruebas de validación del sistema electrónico

Módulo validado	Resultado	Observaciones
Pololu 3pi+ (UART + CBOR)	Correcto	El TinyS3 transmitió comandos sin pérdida de información; la respuesta del Pololu fue inmediata y estable
Servomotores (MCPWM)	Correcto	Los tres servos (asíncronos) ejecutaron ciclos continuos sin caídas de voltaje, confirmando el correcto dimensionamiento de la etapa de potencia
Wifi + TCP <i>streaming</i>	Correcto	Se recibieron <i>frames</i> completos y se transmitieron mediante TCP de forma sostenida, sin desbordamientos de <i>buffer</i>
Comunicación SPI (OpenMV → TinyS3)	Correcto	Se recibieron correctamente tramas de 4800 bytes; no se detectaron errores de sincronización ni corrupción de datos

Nota. Elaboración propia a partir de las pruebas realizadas con el código integrado del sistema

Con el rediseño electrónico finalizado y validado mediante pruebas funcionales en el TinyS3, los servomotores, el Pololu 3pi+ y la cámara OpenMV H7, se contó con una plataforma estable y confiable sobre la cual integrar el resto del sistema. Las iteraciones realizadas en Altium, junto con la verificación del desempeño eléctrico y de comunicación, permitieron asegurar que la distribución de potencia, señal y protección operara de forma correcta en condiciones reales. A partir de esta base electrónica consolidada, el siguiente paso consistió en abordar el diseño mecánico de la estructura que alojaría la cámara OpenMV H7, considerando su integración física con la placa, los requisitos de movimiento y la estabilidad durante

la operación. La siguiente sección describe el proceso de modelado, iteración y validación del soporte mecánico desarrollado en Autodesk Inventor, junto con las pruebas que garantizaron su funcionamiento apropiado dentro del sistema completo.

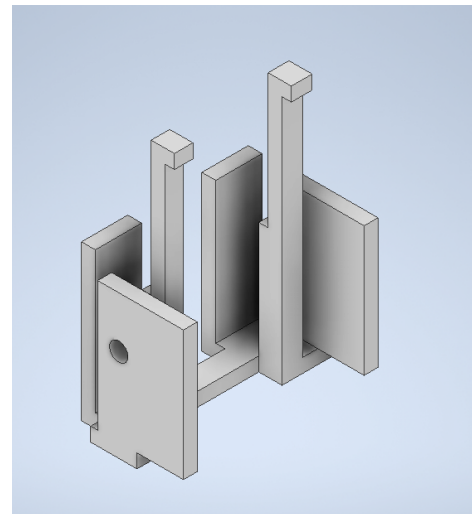
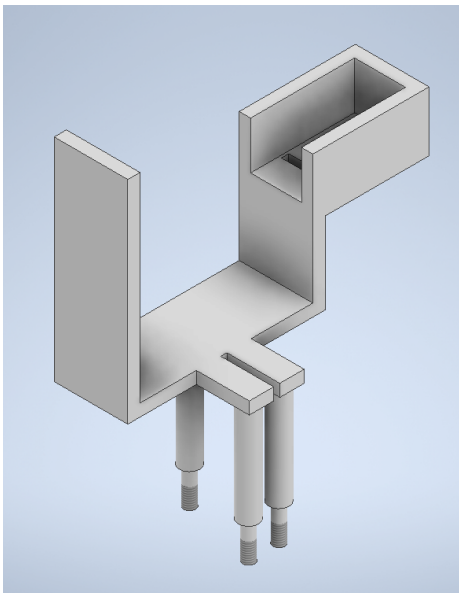
8.2. Diseño de base para la cámara OpenMV H7

La integración de visión artificial en el agente robótico Pololu 3pi+ requirió el desarrollo de una base mecánica que permitiera montar y orientar la cámara OpenMV H7 de forma estable y funcional. Con el objetivo de ampliar el campo de visión del sistema y habilitar el control de inclinación (*tilt* o *pitch*), se diseñó una estructura compacta y compatible con la placa de expansión. Este soporte debía mantener un balance adecuado entre rigidez y movilidad.

8.2.1. Primer prototipo

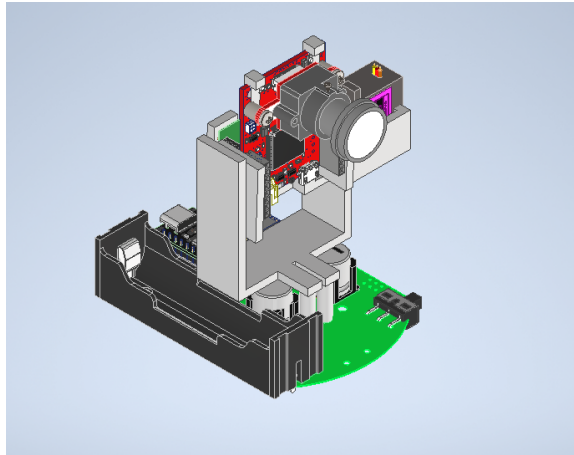
El primer prototipo se diseñó en el *software* Autodesk Inventor y se fabricó mediante impresión 3D en PLA. Para su construcción se definieron dos piezas principales: una base para el servomotor, conectada directamente a la placa de expansión, y una base superior para la cámara, encargada de permitir el movimiento de inclinación. Ambas partes se ensamblan formando un mecanismo de tipo *pitch*, cuyo propósito es dotar a la cámara de un rango de movimiento hacia arriba y hacia abajo.

Figura 31. Modelos en Inventor: base del servomotor (izquierda) y base de la cámara (derecha)



Nota. Diseños elaborados en Autodesk Inventor. Elaboración propia.

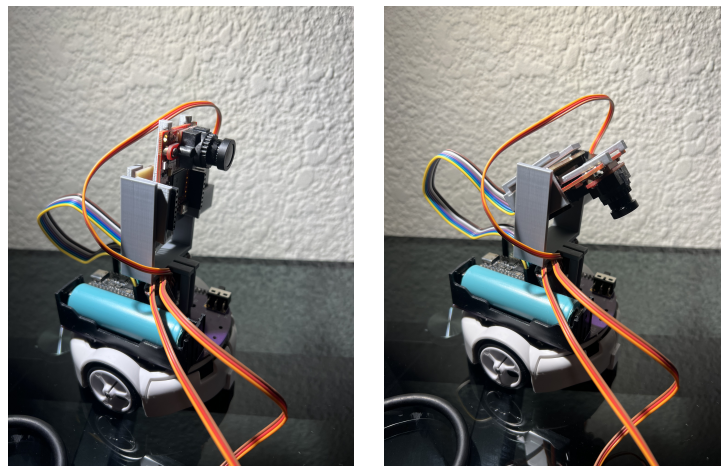
Figura 32. Ensamble en Inventor de la base con servomotor y cámara



Nota. Diseño elaborado en Autodesk Inventor. Elaboración propia.

Este prototipo permitió validar la integración mecánica entre la cámara y el servomotor, así como realizar pruebas básicas de movimiento. Se comprobó que la cámara podía inclinarse de manera controlada, aunque se identificaron limitaciones: la base resultó ligeramente ancha, se proyectaba demasiado hacia delante de la placa y presentaba una altura superior a la deseada. Aun con estas restricciones, el movimiento obtenido fue satisfactorio para las pruebas iniciales.

Figura 33. Prototipo físico montado en el Pololu 3Pi+: base en posición neutra (izquierda) e inclinada (derecha)



Nota. Prototipo fabricado en impresión 3D y montado por el autor en el Pololu 3Pi+. Elaboración propia.

8.2.2. Segundo prototipo

Como parte del diseño de la base de la cámara se implementó un mecanismo de cuatro barras con geometría de paralelogramo, cuya función es transmitir el ángulo de entrada al soporte de la cámara manteniendo la orientación paralela entre barras opuestas. Este tipo de configuración permite obtener un movimiento de inclinación (*tilt* o *pitch*) estable para ajustar el campo de visión de la cámara OpenMV H7.

Geometría y longitudes

El mecanismo se compone de dos barras horizontales de igual longitud (base y barra superior) y dos barras laterales también iguales, lo que cumple la condición de paralelogramo $L_1 = L_5$ y $L_2 = L_3$.

Cuadro 13. Longitudes del mecanismo de cuatro barras (paralelogramo)

Barra	Descripción	Longitud
L_1	Base (barra inferior, fija)	32.5 mm
L_2	Lateral izquierdo (biela)	10.0 mm
L_3	Lateral derecho (biela)	10.0 mm
L_5	Barra superior (salida)	32.5 mm

Nota. La barra L_1 se fija al chasis y L_5 mueve la cámara. Elaboración propia.

Verificación de la condición de Grashof

Para un mecanismo plano de cuatro barras, la condición de Grashof se cumple si:

$$L_{\text{mín}} + L_{\text{máx}} \leq P + Q,$$

donde $L_{\text{mín}}$ y $L_{\text{máx}}$ son las barras más corta y más larga, mientras que P y Q representan las longitudes intermedias.

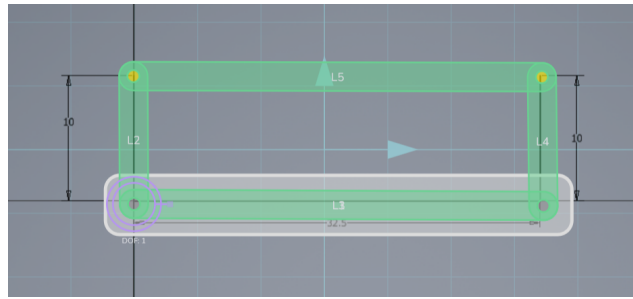
Con los valores del Cuadro 13:

$$L_{\text{mín}} = 10.0 \text{ mm}, \quad L_{\text{máx}} = 32.5 \text{ mm}, \quad P = 10.0 \text{ mm}, \quad Q = 32.5 \text{ mm}.$$

$$L_{\text{mín}} + L_{\text{máx}} = 42.5 \text{ mm}, \quad P + Q = 42.5 \text{ mm}.$$

Por tanto, $L_{\text{mín}} + L_{\text{máx}} = P + Q$, cumpliéndose la condición de **Grashof en caso límite**. Esto implica que el mecanismo es de tipo paralelogramo articulado, donde la barra de salida mantiene el paralelismo con la barra base, reproduciendo su ángulo de movimiento. La Figura 34 muestra la simulación de este comportamiento en el *software* MotionGen.

Figura 34. Análisis del mecanismo de cuatro barras en MotionGen

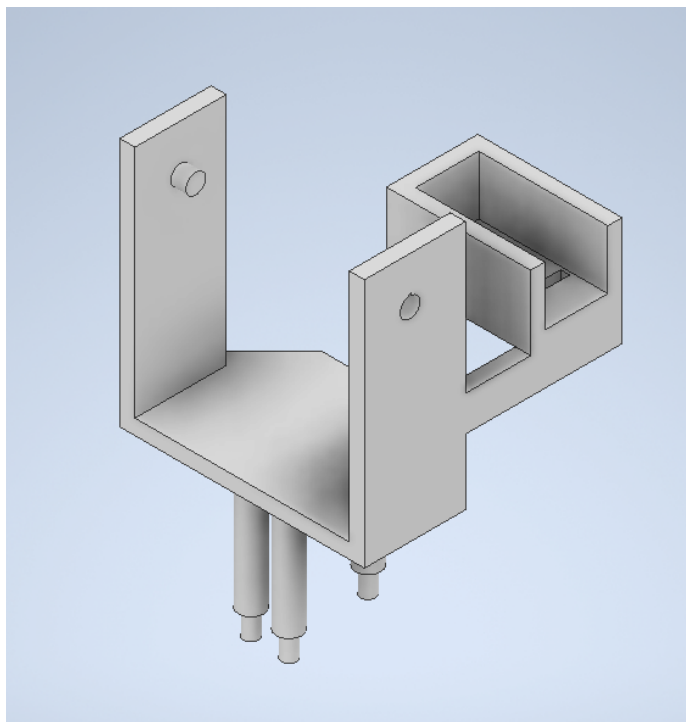


Nota. El mecanismo cumple la condición de Grashof en el límite, asegurando movimiento paralelo. Elaboración propia.

Diseño de la base del servomotor

El primer prototipo del mecanismo posicionaba el servomotor en la parte lateral, lo que aumentaba el espacio ocupado por la base. En la segunda versión del diseño (Figura 35), se reubicó el servomotor en la parte posterior de la estructura, lo que permitió optimizar el equilibrio del sistema y reducir el peso lateral.

Figura 35. Diseño en Inventor de la base del servomotor (versión 2)

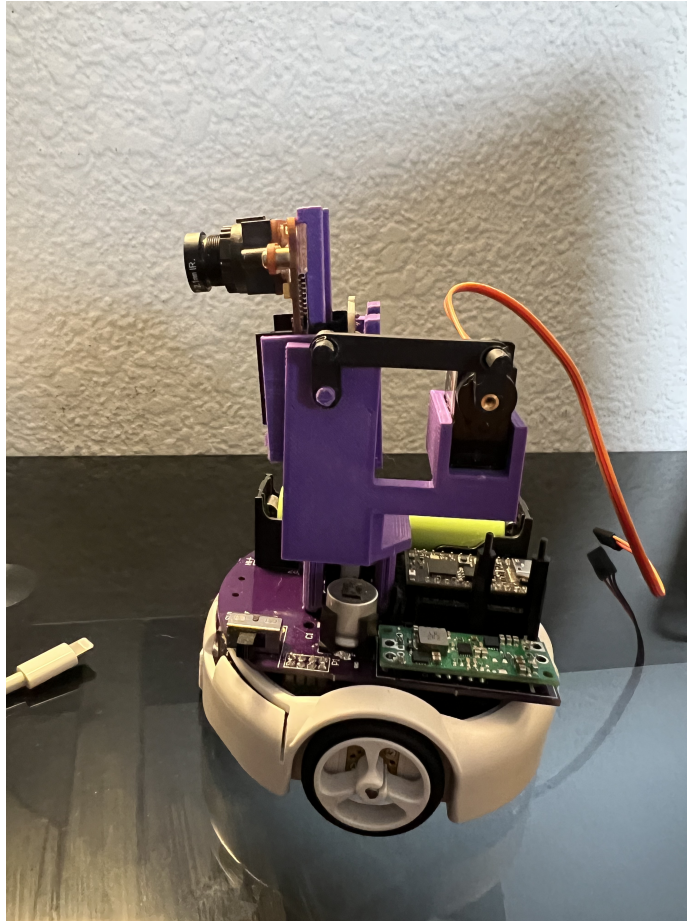


Nota. El servomotor se colocó en la parte trasera para minimizar el espacio frontal y mejorar la estabilidad. Elaboración propia.

Este cambio de configuración mejora la distribución de masas, manteniendo la funcionalidad de inclinación sin comprometer el rango de movimiento.

Finalmente, en la Figura 36 se muestra el modelo físico montado sobre el robot Pololu 3pi+, donde puede observarse el mecanismo completo instalado y funcional. Este montaje permitió verificar la integración mecánica entre la base, el servomotor y la cámara, confirmando la correcta transmisión del movimiento de inclinación sin interferencias ni desplazamientos no deseados.

Figura 36. Montaje físico del mecanismo de inclinación sobre el Pololu 3pi+



Nota. Modelo físico impreso en PLA, donde se observa el mecanismo de cuatro barras y la cámara Open MV instalada. Elaboración propia.

Análisis estructural del prototipo

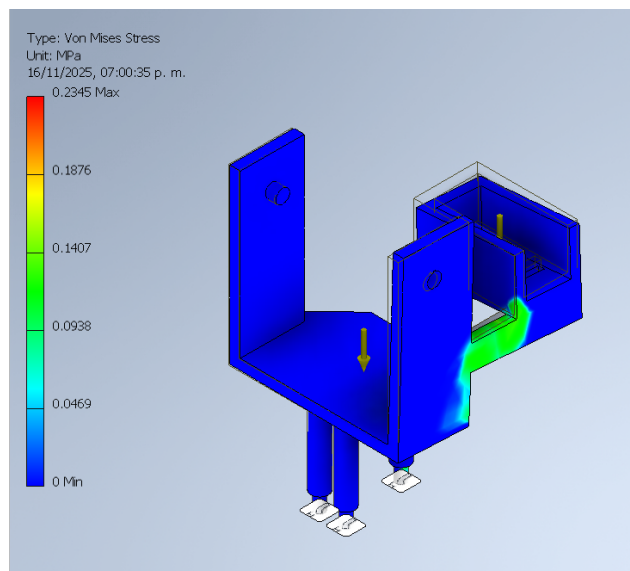
Para esta segunda versión del diseño se integró una evaluación estructural empleando la herramienta de análisis de esfuerzos de Autodesk Inventor, con el objetivo de validar que la base fuera capaz de soportar adecuadamente el peso de los componentes montados sobre ella. En particular, se consideró el peso de la cámara OpenMV H7, cuya masa aproximada es de 17 g según la especificación del fabricante [9], y el peso del servomotor Feetech FT90M,

equivalente a 13.5 g de acuerdo con su hoja de datos [16]. Estos pesos se aplicaron como cargas puntuales en las regiones donde se encuentra el centro de masa de cada elemento: la masa de la cámara se colocó en la parte central de la base del mecanismo, que corresponde a la zona donde se fija el módulo OpenMV; y la masa del servomotor se aplicó en la parte posterior de la estructura, coincidiendo con la ubicación real del servo dentro del diseño y la posición de su centro de gravedad.

Se realizaron dos análisis principales: esfuerzo de Von Mises (*stress* o esfuerzo equivalente) y desplazamiento (*displacement*). El análisis de Von Mises permite identificar las zonas susceptibles a experimentar deformación plástica bajo carga. El resultado obtenido mostró un esfuerzo máximo de aproximadamente 0.2345 MPa, valor muy inferior al límite mecánico del PLA. De acuerdo con la hoja técnica del material Ingeo 4043D, el PLA presenta una resistencia a tracción entre 50 y 70 MPa y un módulo de elasticidad de 2.7–3.5 GPa [30], lo que significa que la pieza opera a menos del 1 % de su capacidad estructural.

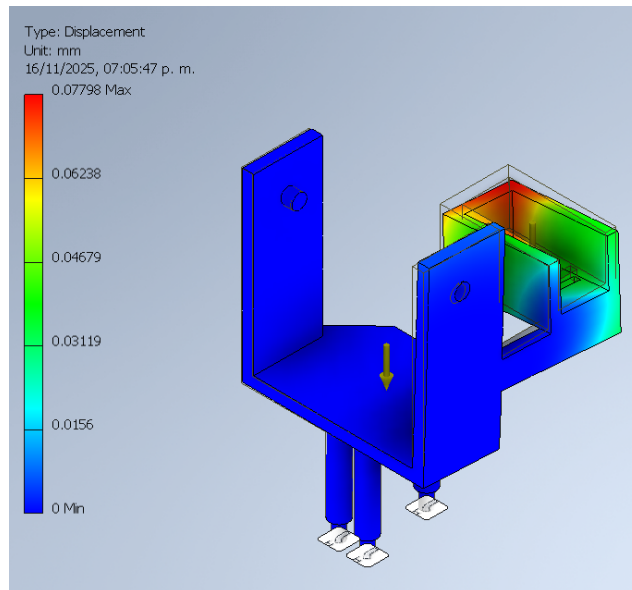
Asimismo, el análisis de *displacement* arrojó un valor máximo de 0.078 mm, una deflexión prácticamente imperceptible que confirma que la estructura mantiene la rigidez necesaria para que el mecanismo de inclinación funcione sin vibraciones, holguras o desalineamientos indeseados. Las Figuras 37 y 38 presentan los resultados de ambos análisis.

Figura 37. Análisis de esfuerzo de Von Mises para el segundo prototipo



Nota. El esfuerzo máximo alcanzó aproximadamente 0.2345 MPa, muy por debajo del límite del material. Elaboración propia.

Figura 38. Análisis de desplazamiento máximo del segundo prototipo



Nota. El desplazamiento máximo fue de 0.078 mm, confirmando la rigidez del diseño. Elaboración propia.

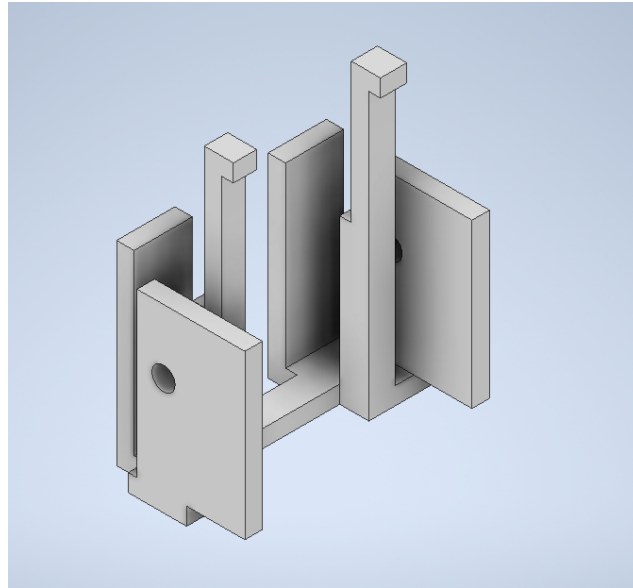
8.2.3. Prototipo final

El prototipo final se desarrolló tras realizar múltiples iteraciones de diseño y pruebas con versiones previas. Al igual que los anteriores, fue modelado en CAD 3D mediante Autodesk Inventor y fabricado mediante impresión 3D en formato STL utilizando material PLA.

Este diseño deriva directamente del primer prototipo, conservando su principio de funcionamiento basado en el movimiento de inclinación (*pitch*) accionado por un servomotor lateral. Sin embargo, se realizaron modificaciones significativas orientadas a reducir su tamaño.

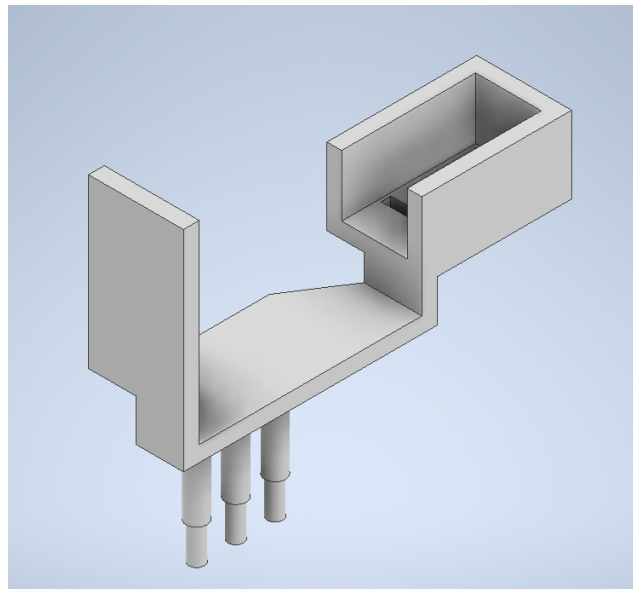
En particular, se redujeron las dimensiones de las patas de soporte en la base del servomotor, logrando una estructura más compacta. Asimismo, la base superior que sostiene la cámara fue rediseñada con un tamaño menor, manteniendo la misma geometría funcional del mecanismo original. Se implementaron tres puntos de apoyo (patas) distribuidos para aumentar la estabilidad y rigidez del conjunto durante el movimiento.

Figura 39. Modelo en Inventor de la base de la cámara (versión final)



Nota. Diseños elaborados en Autodesk Inventor. Elaboración propia.

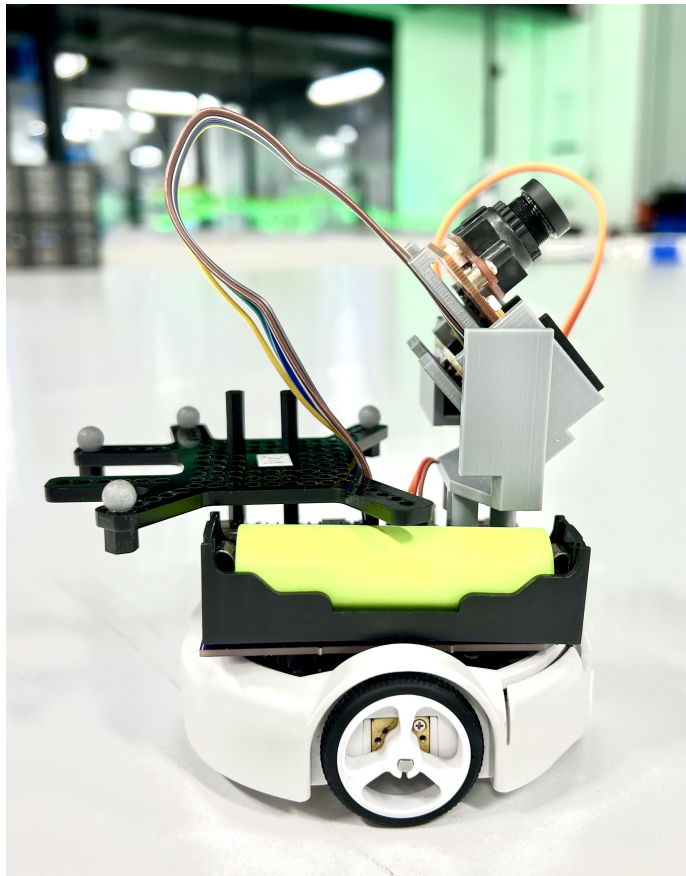
Figura 40. Modelo en Inventor de la base del servomotor (versión final)



Nota. Diseños elaborados en Autodesk Inventor. Elaboración propia.

El principio de movimiento sigue siendo el mismo que en la versión inicial: el servomotor ubicado a un costado controla la inclinación de la cámara hacia adelante y hacia atrás, generando el movimiento de *pitch*. Gracias a las mejoras en la geometría y el soporte, esta versión final logró un equilibrio óptimo entre tamaño, rigidez y estabilidad.

Figura 41. Prototipo final montado físicamente sobre el Pololu 3pi+

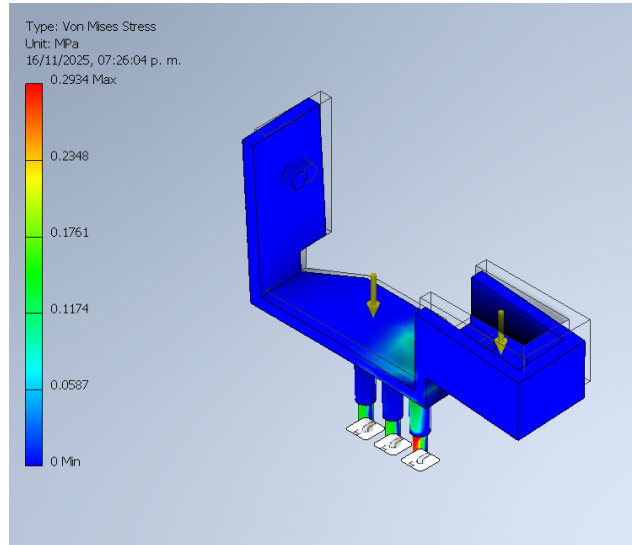


Nota. Modelo físico fabricado en PLA e integrado al Pololu 3pi+, mostrando el montaje funcional de la base y la cámara. Elaboración propia.

Finalmente, se realizó un análisis estructural sobre esta versión final utilizando la herramienta de análisis de esfuerzos de Autodesk Inventor, empleando las mismas propiedades mecánicas del PLA y los mismos valores de masa utilizados en prototipos anteriores: 17 g para la cámara OpenMV H7 y 13.5 g para el servomotor Feetech FT90M, trasladados a newtons para su aplicación como cargas puntuales. El análisis de esfuerzo de Von Mises (*stress*) mostró un esfuerzo máximo aproximado de 0.2934 MPa, concentrado principalmente en la base de las patas de soporte de la estructura. Esto es coherente, ya que dichas patas constituyen los puntos donde la base se fija directamente a la placa del robot y, por lo tanto, reciben la mayor reacción estructural. Este valor continúa estando muy por debajo del límite de resistencia del PLA, por lo que no representa riesgo de falla. Por otro lado, el análisis de *displacement* indicó un desplazamiento máximo cercano a 0.04216 mm, localizado en el costado donde se fija el servomotor. Esta ubicación es apropiada, pues el servomotor introduce un mayor momento lateral sobre dicha zona, lo que naturalmente produce un incremento en la deflexión. Sin embargo, este desplazamiento sigue siendo mínimo y no compromete la estabilidad ni el correcto funcionamiento del mecanismo. En conjunto, los resultados confirman que la versión final mantiene la rigidez necesaria para soportar de manera confiable el

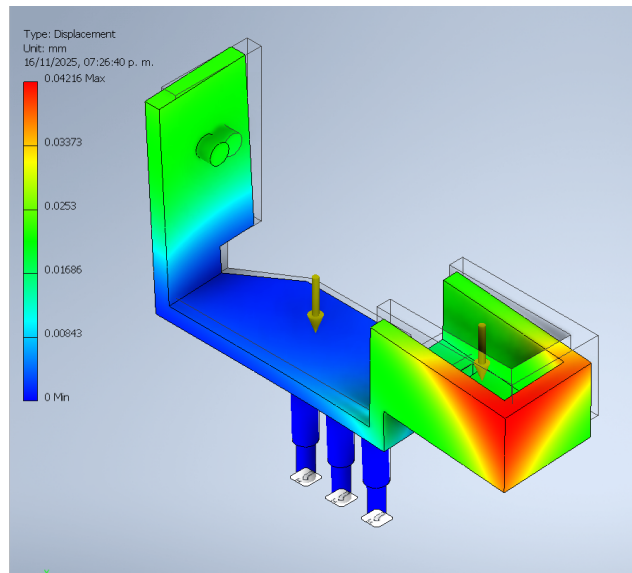
peso de la cámara y del servomotor durante su operación.

Figura 42. Análisis final de esfuerzo de von Mises



Nota. los mayores esfuerzos se concentran en la base de las patas, alcanzando aproximadamente 0.2934 MPa. elaboración propia

Figura 43. Análisis final de *displacement*



Nota. El desplazamiento máximo de la estructura fue de 0.04216 mm, localizado en el área lateral donde se fija el servomotor. Elaboración propia.

Pruebas de validación del mecanismo de inclinación

Para validar el funcionamiento del mecanismo de inclinación de la cámara, se desarrollaron pruebas de control en el microcontrolador TinyS3 mediante señales PWM dirigidas al servomotor encargado del movimiento de *tilt*. El objetivo principal fue verificar que la base mecánica respondiera de forma estable, que el rango útil de inclinación se recorriera sin atascos y que la cámara mantuviera su posición sin oscilaciones excesivas.

El siguiente fragmento de código muestra la rutina básica utilizada para ejecutar un ciclo completo de inclinación entre 0° y 90°:

```
1   for (int angle = 0; angle <= 90; angle += 5) {
2       mcpwm_comparator_set_compare_value(servo.cmp, angle_to_pulse
3           (angle));
4       vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(40));
5   }
6   for (int angle = 90; angle >= 0; angle -= 5) {
7       mcpwm_comparator_set_compare_value(servo.cmp, angle_to_pulse
8           (angle));
9       vTaskDelay(pdMS_TO_TICKS(40));
10  }
```

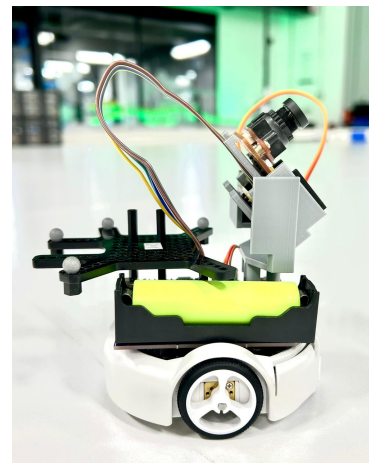
Listing 8.5. Fragmento del código utilizado para la validación del mecanismo de inclinación (adaptado del repositorio original de Álvarez [29])

Este ciclo permitió confirmar la correcta comunicación entre el TinyS3 y el servomotor, así como la respuesta física del mecanismo bajo el peso real de la cámara. En la Figura 44 se muestran dos posiciones del mecanismo durante las pruebas: inclinación hacia adelante y hacia atrás.

Figura 44. Movimiento del mecanismo de inclinación de la cámara durante las pruebas de validación



(a) Inclinación hacia adelante



(b) Inclinación hacia atrás

Nota. Fotografías obtenidas durante las pruebas físicas del mecanismo. Elaboración propia.

Cuadro 14. Resultados de validación del mecanismo de inclinación de la cámara

Prueba	Resultado	Observaciones
Movimiento completo (0° – 90°)	Correcto	Recorrido continuo y sin atascos; el mecanismo mantuvo alineación en todo el ciclo.
Estabilidad mecánica	Correcto	No se observaron holguras ni desplazamientos no deseados bajo carga.
Respuesta bajo peso real de la cámara	Correcto	No hubo pérdida de precisión ni caídas de voltaje al operar un único servomotor.
Vibraciones u oscilaciones	Mínimas	Oscilaciones reducidas en los extremos del recorrido; comportamiento esperado para un microservo.

Nota. Resultados obtenidos con la rutina PWM implementada en el TinyS3.
Elaboración propia.

Los resultados obtenidos confirman que el mecanismo de inclinación opera de forma estable y que su diseño es adecuado para integrarse con el sistema completo. El código utilizado para estas pruebas se encuentra disponible en el repositorio del proyecto [28], junto con los programas empleados para validar los demás módulos. Una descripción más detallada de estos archivos se presenta en los Anexos 12.1.

- Se eliminaron MOSFET, resistencias y rutas redundantes presentes en la placa original, lo que permitió reducir el ruido eléctrico y obtener un suministro regulado de 5 V más estable. Las pruebas mostraron un incremento del 7.6 % en la capacidad de entrega de corriente hacia los servomotores, eliminando las caídas de tensión reportadas en la versión previa.
- La integración directa de una batería 18650 dentro de la placa permitió eliminar completamente la fuente externa de alimentación. Además, se incorporó un módulo BMS de 3 A, sustituyendo el fusible y los circuitos de protección básicos de la placa anterior.
- El uso del regulador *step-up* U3V70F5, acompañado de capacitores de 3300 μF , mejoró la estabilidad del sistema al evitar caídas de voltaje durante la operación simultánea de los tres servomotores. En comparación con la versión anterior, el tiempo de recuperación ante picos de consumo se redujo a menos de 6 ms, garantizando la comunicación continua entre el TinyS3 y el Pololu 3pi+.
- El diseño final de la base ajustable para la cámara OpenMV H7 permitió un rango efectivo de inclinación de $\pm 90^\circ$ en el eje de *pitch*, ampliando significativamente el campo visual del Pololu 3pi+. Las pruebas mecánicas mostraron ausencia de oscilaciones críticas y confirmaron que el servomotor puede mover la cámara de forma estable bajo carga real.

- Realizar pruebas adicionales con capacitores de distintas capacidades y tecnologías en la etapa de alimentación de los servomotores. Hasta ahora se utilizaron capacitores electrolíticos de 3300 μF , los cuales mejoraron la estabilidad, pero no se descarta que existan valores o configuraciones más óptimas para reducir aún más las caídas de tensión.
- Integrar completamente un módulo y la infraestructura necesaria para la incorporación de un sensor LiDAR, incluyendo tanto el diseño electrónico como el diseño mecánico de la base de montaje. Esto ampliaría las capacidades del agente robótico en tareas de navegación y percepción.
- Mejorar la lectura y el monitoreo del nivel de batería a través del microcontrolador TinyS3. Aunque actualmente se cuenta con un sistema básico de lectura, sería conveniente optimizar tanto el *hardware* como el *firmware* asociado, con el fin de obtener mediciones más precisas y confiables del estado de carga.
- Profundizar en el desarrollo de pruebas de validación de *firmware* y control, más allá de los ensayos básicos de funcionamiento realizados en este trabajo, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema en escenarios de operación más realistas.
- Evaluar la implementación de un segundo grado de libertad en la base de la cámara, añadiendo un movimiento tipo *yaw* (giro lateral). Esto permitiría que la cámara no sólo se incline en el eje de *pitch*, sino también hacia los lados, ampliando aún más el rango de visión y la flexibilidad en aplicaciones de visión por computadora.

- [1] J. L. Alvarez Pineda, «Desarrollo de una placa de expansión para los agentes Pololu 3Pi+ que expanda sus capacidades dentro del ecosistema Robotat,» Trabajo de Graduación, Dep. de Ing. Electrónica, Mecat. y Biomed., UVG, Ciudad de Guatemala, 2024.
- [2] C. Perafán Montoya, «Robotat: un ecosistema robótico de captura de movimiento y comunicación inalámbrica,» Trabajo de Graduación, Dep. de Ing. Electrónica, Mecat. y Biomed., UVG, Ciudad de Guatemala, 2022.
- [3] C. F. Arribas, «Pruebas a escala de algoritmos básicos de visión de computadora y control para vehículos autónomos a escala,» Trabajo de Graduación, Dep. de Ing. Electrónica, Mecat. y Biomed., UVG, Ciudad de Guatemala, 2023.
- [4] J. R. Cerón Cheley, «Evaluación de sensores de distancia para aplicaciones de mapeo de entornos con agentes robóticos móviles,» Trabajo de Graduación, Dep. de Ing. Electrónica, Mecat. y Biomed., UVG, Ciudad de Guatemala, 2024.
- [5] OSH Park. «OSH Park PCB Manufacturing Service.» Acceso: Sep. 19, 2025. [En línea], OSH Park. dirección: <https://oshpark.com/>.
- [6] Pololu Robotics and Electronics. «Pololu 3pi+ 32U4 OLED Robot - Standard Edition.» Acceso: Ene. 1, 2025. [En línea], Pololu Robotics and Electronics. dirección: <https://www.pololu.com/product/4975>.
- [7] Unexpected Maker. «TinyS3 – A Powerful Tiny ESP32-S3 Development Board.» Acceso: Ene. 1, 2025. [En línea], Unexpected Maker. dirección: <https://esp32s3.com/tinys3.html>.
- [8] Pololu Robotics and Electronics. «5V Step-Up Voltage Regulator U3V70F5.» Acceso: Jul. 26, 2025. [En línea], Pololu Robotics y Electronics. dirección: <https://www.pololu.com/product/2891>.
- [9] OpenMV. «OpenMV Cam H7.» Acceso: Ago. 14, 2025. [En línea], OpenMV. dirección: <https://openmv.io/products/openmv-cam-h7>.

- [10] TinyCircuits. «18650 Lithium Ion Polymer Battery – 3.7 V 2500 mAh.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], TinyCircuits. dirección: <https://tinycircuits.com/products/16850-lithium-ion-polymer-battery-3-7v-2500mah-cylindrical-cell-work-in-progress>.
- [11] «E92 Alkaline AAA Battery Data Sheet.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], Energizer Holdings. dirección: https://data.energizer.com/pdfs/e92_ap.pdf.
- [12] RedEWeb. «Fundamentos: Comprender las características de los tipos de condensadores para utilizarlos de manera apropiada y segura.» Acceso: Feb. 8, 2026. [En línea], Revista Española de Electrónica. dirección: <https://www.redeweb.com/articulos/fundamentos-comprender-las-caracteristicas-de-los-tipos-de-condensadores-para-utilizarlos-de-manera-apropiada-y-segura/>.
- [13] «Aluminum Electrolytic Capacitors – FK Series.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], Panasonic Industry. dirección: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf/RDE0000/ABA0000C1178.pdf>.
- [14] J. J. Craig, *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 4.^a ed. New York, NY, USA: Pearson, 2018.
- [15] «TowerPro MG90S Micro Servo Motor.» Acceso: Ene. 1, 2024. [En línea], TowerPro. dirección: <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/MG90STowerPro.pdf>.
- [16] RobotShop. «Feetech Digital Servo 2kg-cm FT90M.» Acceso: Ene. 1, 2024. [En línea], RobotShop. dirección: <https://www.robotshop.com/products/feetech-digital-servo-2kg-cm-ft90m>.
- [17] «IPC-2221A: Generic Standard on Printed Board Design.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], IPC. dirección: <https://www.electronics.org/TOC/IPC-2221A.pdf>.
- [18] N. Desmith. «PCB Trace Width Calculator.» Acceso: Sep. 19, 2025. [En línea], Nick Desmith Electronics. dirección: <https://nick.desmith.net/Electronics/TraceWidth.html>.
- [19] «Especificaciones técnicas del equipo de fresado LPKF S103.» Acceso: Feb. 8, 2026. [En línea], MakerLab, UVG. dirección: https://drive.google.com/file/d/1CC69BKXgyqGXeU6wzrXv8m_8hXL2NGN9/view.
- [20] La Electrónica Guatemala. «Módulo elevador de voltaje de 5V - 1A.» Acceso: Ago. 16, 2025. [En línea], La Electrónica Guatemala. dirección: <https://laelectronica.com.gt/revcor/modulo-elevador-de-voltaje-de-5v---1a>.
- [21] La Electrónica Guatemala. «Módulo elevador de voltaje XL6009 - 4A.» Acceso: Ago. 16, 2025. [En línea], La Electrónica Guatemala. dirección: <https://laelectronica.com.gt/modulo-elevador-de-voltaje-xl6009---4a>.
- [22] La Electrónica Guatemala. «Módulo protector de baterías BMS 1S 3A.» Acceso: Ago. 1, 2025. [En línea], La Electrónica Guatemala. dirección: <https://laelectronica.com.gt/modulo-protector-de-baterias-bms-1s-3a>.
- [23] TETTSA. «Servo motor MG90S 2.2kg 0.08s.» Acceso: Ene. 1, 2024. [En línea], TETTSA. dirección: <https://tienda.tettsa.gt/producto/servo-motor-2-2kg-0-08-sec-mg90s/>.
- [24] La Electrónica Guatemala. «Motor servo MG90S con engranajes de metal.» Acceso: Ene. 1, 2024. [En línea], La Electrónica Guatemala. dirección: <https://laelectronica.com.gt/motor-servo-mg90s-con-engranajes-de-metal>.

- [25] Pololu Robotics and Electronics. «Pololu 3pi+ 32U4 Robot User’s Guide.» Acceso: Sep. 18, 2025[En línea], Pololu Robotics and Electronics. dirección: <https://www.pololu.com/docs/OJ83/all>.
- [26] «Aluminum Electrolytic Capacitors – Datasheet.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], Panasonic Industry. dirección: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf/RDE0000/ABA0000C1181.pdf>.
- [27] «Aluminum Electrolytic Capacitors – Datasheet.» Acceso: Nov. 18, 2025. [En línea], Panasonic Industry. dirección: <https://industrial.panasonic.com/cdbs/ww-data/pdf/RDE0000/ABA0000C1178.pdf>.
- [28] L. P. González. «Repositorio de validación y rediseño de la placa de expansión.» Feb. 8, 2026, [Online]. Recuperado de: <https://github.com/Gon21513/Redisenopep>. (Fork del repositorio de J. L. Alvarez).
- [29] J. L. Álvarez. «Tesis ESP32–Pololu 3Pi+: Comunicación CBOR y control de motores.» Feb. 8, 2026, [Online]. Recuperado de: <https://github.com/JoseLuisA-P/Tesis-ESP32-Pololu>. (Repositorio original consultado para el desarrollo y adaptación del código).
- [30] «Ingeo 4043D Polylactic Acid — Technical Data Sheet.» Acceso: Feb. 8, 2026. [En línea], NatureWorks LLC. dirección: https://www.natureworksllc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_4043D_3D-monofilament_pdf.pdf.
- [31] OpenMV, *OpenMV IDE*, Feb. 9, 2026. [En línea]. Recuperado de: <https://openmv.io/pages/download>, 2026.
- [32] Microsoft, *Visual Studio Code*, Feb. 9, 2026. [En línea]. Recuperado de: <https://code.visualstudio.com/> Microsoft, 2026.
- [33] Aivo Paas, *Thonny*, Feb. 9, 2026. [En línea]. Recuperado de: <https://thonny.org/>, Thonny, 2026.
- [34] Unexpected Maker. «TinyS3 Getting Started Guide.» Acceso: Feb. 9, 2026. [En línea]. Recuperado de: <https://esp32s3.com/getting-started.html>, Unexpected Maker. dirección: <https://esp32s3.com/getting-started.html>.

Los anexos incluidos en esta sección complementan el contenido técnico del trabajo, proporcionando documentación detallada que respalda el diseño, implementación y validación del sistema desarrollado. Se presentan los códigos utilizados en las pruebas de integración electrónica y mecánica, así como los listados completos de componentes, diagramas de conexiones, distribución de pines y demás elementos necesarios para la reproducción del diseño. Estos anexos permiten profundizar en aspectos específicos de la metodología y proveer una referencia directa para futuros trabajos que continúen o amplíen este proyecto.

12.1. Código de validación en TinyS3

Los códigos de validación se desarrollaron en el entorno de PlatformIO para verificar la integración y el funcionamiento básico de los módulos electrónicos. Estos programas se derivan del repositorio original de Álvarez [29] y fueron adaptados específicamente para los nuevos requerimientos de *hardware* en el repositorio de desarrollo del presente proyecto [28].

Validaciones generales

En esta primera parte se incluyen los programas destinados a validar el funcionamiento global de los módulos electrónicos y mecánicos del sistema:

- **PruebasVelocidades**: validación de las ruedas del Pololu 3pi+.
- **Pruebas_Servos**: comprobación del funcionamiento básico de los tres servomotores.
- **Servos_Ruedas_Camara**: secuencia integrada de ruedas, servos y cámara.
- **PruebasCamara**: conjunto de archivos dedicados a validar la cámara OpenMV H7.

El procedimiento para esta prueba es el siguiente:

1. Cargar en la cámara el *script* `openmv_stream.py` utilizando el entorno oficial OpenMV IDE [31].
2. Cargar en el microcontrolador TinyS3 cualquiera de los programas ubicados en la carpeta `Servos_Ruedas_Camara` o, si solo se desea validar la cámara, utilizar el código específico de `PruebasCamara`.
3. El TinyS3 crea automáticamente una red wifi con el nombre `Pololu3pi+` y la contraseña `MT30062023`.
4. Desde un ordenador, conectarse a dicha red wifi y ejecutar el archivo `PruebaCamara.py` en un entorno Python, como Visual Studio Code [32] o Thonny [33].
5. Si la conexión es correcta, se habilita un *stream* en blanco y negro que confirma la inicialización y transmisión de la cámara OpenMV.

Validaciones específicas de la base de cámara

En esta segunda parte se listan los programas desarrollados para comprobar de manera dedicada la integración de la cámara con el servomotor de inclinación:

- **MovimientoCamaraServo**: código diseñado para validar el movimiento de la base de cámara mediante un servomotor. Este programa permitió comprobar de forma específica la inclinación de la cámara (movimiento *pitch*) y se utilizó en conjunto con los prototipos mecánicos

Nota sobre la carga de programas en el TinyS3: cada vez que se desee cargar un nuevo código en el microcontrolador, es necesario ponerlo en *download mode*. Para ello se siguen los siguientes pasos:

1. Mantener presionado el botón **BOOT**
2. Presionar y soltar el botón **RESET**
3. Liberar el botón **BOOT**

Tras este procedimiento no aparece ninguna señal visual en la placa, pero debería mostrarse un nuevo puerto serial en el ordenador, lo que indica que el dispositivo está listo para recibir el programa [34].

12.2. Listado de componentes por placa

En esta sección se presenta el listado de componentes utilizados en la placa de expansión del Pololu 3pi+, con su respectivo *designator*, huella, referencia de biblioteca y cantidad.

Este listado corresponde a la última versión del diseño implementado en Altium Designer.

Cuadro 15. Listado de componentes de la placa de expansión

Nombre	Footprint	Descripción	Cantidad
BMS	PCBComponent_1	Módulo BMS 3 A (protección y balanceo 1S)	1
<i>Boost</i>	U3V70F5	Módulo elevador de voltaje U3V70F5 (5 V)	1
C1, C2	EEEFK0J682AV	Capacitor electrolítico 3300 μ F, 16 V	2
H1	18650BATTERYHOLDER	Porta batería 18650 (1 celda – 1S)	1
J1	HEADER11PIN	<i>Header</i> hembra de 11 pines (TinyS3 lado A)	1
J2	HEADER12PIN	<i>Header</i> hembra de 12 pines (TinyS3 lado B)	1
P1	POWERHEADERS	Conector de potencia principal	1
P2	HDR1X3	<i>Header</i> macho de 3 pines (servo 1)	1
P3	HDR1X3	<i>Header</i> macho de 3 pines (servo 2)	1
P4	HDR1X3	<i>Header</i> macho de 3 pines (servo 3)	1
P5	HDR1X3	<i>Header</i> macho de 3 pines (encendido CTRL)	1
P6	HDR1X5	<i>Header</i> macho de 5 pines (UART hacia Pololu)	1
P7	HDR1X5	<i>Header</i> macho de 5 pines (UART propio TinyS3)	1
P8	HDR1X8	<i>Header</i> hembra de 8 pines (SPI – cámara)	1
P9	HDR1X2	<i>Header</i> macho de 2 pines (entrada batería)	1
R1	14-1210, 1K	Resistencia 1 k Ω (para SPI cámara)	1
R2	14-1210, 330 Ω	Resistencia 330 Ω (señal de control)	1
SW1	SW-313	Interruptor deslizante SW-313	1
UC1	TINYS3	Módulo controlador TinyS3 (ESP32-S3)	1

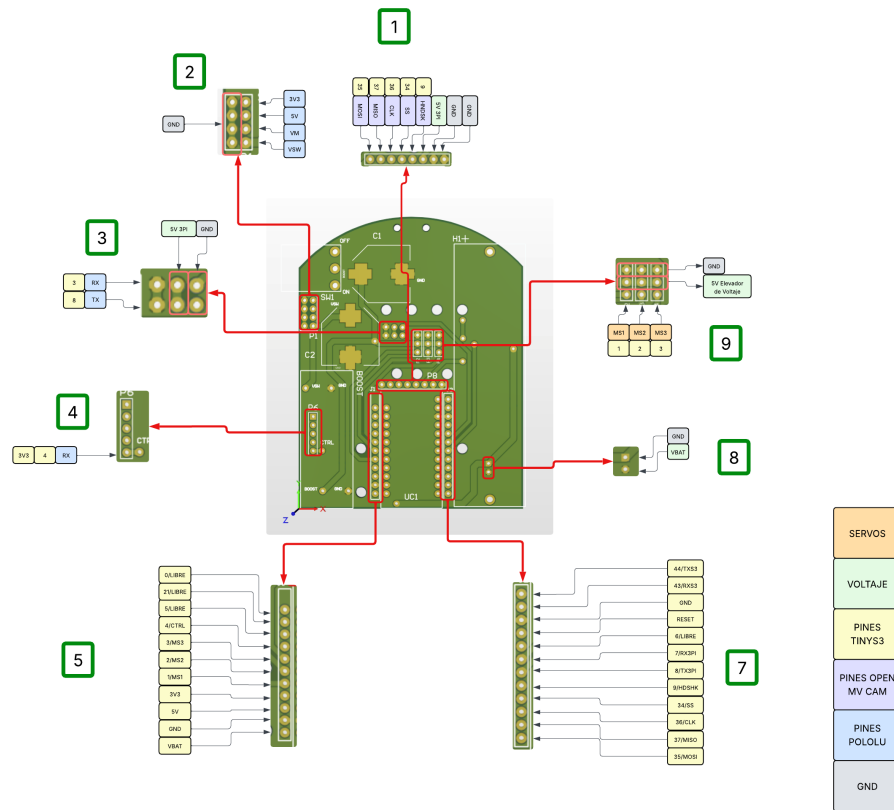
Nota. elaboración propia a partir del esquema eléctrico y diseño PCB final en Altium Designer. para los conectores tipo *header*, la cantidad indicada hace referencia a la tira completa, no al número de pines individuales. por ejemplo: un componente con **cantidad = 1** y **descripción = Header hembra de 8 pines** representa una sola tira completa de 8 pines

12.3. Pinout de la placa rediseñada

Parte de la información presentada en esta sección se basa en la documentación original de Álvarez [1], correspondiente a la primera versión de la placa de expansión para el agente Pololu 3pi+. No obstante, la distribución y asignación de pines se ha actualizado completamente conforme al rediseño desarrollado por el autor, que optimiza la organización eléctrica y la interconexión entre módulos, mejorando la eficiencia y modularidad del sistema.

La Figura 45 muestra el esquema actualizado de conexiones y señalización de pines de la nueva placa. Cada zona numerada corresponde a un bloque funcional del sistema, cuya descripción se presenta a continuación.

Figura 45. Distribución y asignación de pines (*pinout*) en la placa rediseñada



Nota. Diagrama elaborado por el autor, mostrando las nuevas conexiones y bloques funcionales. Elaboración propia.

1. **Comunicación SPI (TinyS3–OpenMV Cam H7):** corresponde al bus SPI utilizado para la comunicación de datos entre el microcontrolador TinyS3 y la cámara OpenMV. Incluye las líneas MOSI, MISO, SCK y SS, además de un pin de *handshake* para la sincronización entre ambos dispositivos.
2. **Sección de potencia del módulo boost:** comprende las conexiones que permiten al regulador *step-up* U3V70F5 suministrar 5 V a los servomotores a partir de la salida VSW del Pololu 3pi+. Esta ruta de potencia proporciona una alimentación estable y segura para los actuadores.
3. **Comunicación UART (TinyS3–Pololu 3pi+):** incluye las líneas de transmisión y recepción (TX/RX) que permiten la comunicación serial directa entre el TinyS3 y el microcontrolador ATmega32U4 del Pololu 3pi+. Esta conexión gestiona el intercambio de comandos y retroalimentación entre ambos sistemas.
4. **Control de encendido del Pololu (pin CTRL):** este pin permite controlar de forma digital el encendido y apagado del agente Pololu 3pi+ desde el TinyS3, actuando como una línea de control general del sistema.
5. **Headers de expansión lateral (J1 y J2):** corresponden a los nuevos conectores

agregados al rediseño. Derivan directamente de los GPIO libres del TinyS3 (pines 0, 5, 21, etc.) y permiten integrar módulos o sensores adicionales según futuras necesidades del sistema.

6. **Sección de alimentación general:** en esta zona se encuentra la conexión principal entre la batería 18650 y el Pololu 3pi+, la cual pasa por el módulo BMS de 3 A encargado de la protección eléctrica del sistema. Esta línea asegura un suministro estable hacia todos los módulos.
7. **Control de servomotores:** incluye los tres pines PWM provenientes del TinyS3 que controlan los servomotores del sistema. Cada pin entrega la señal modulada correspondiente a un canal de control independiente.

Cuadro 16. Asignación de pines del TinyS3 en la placa rediseñada

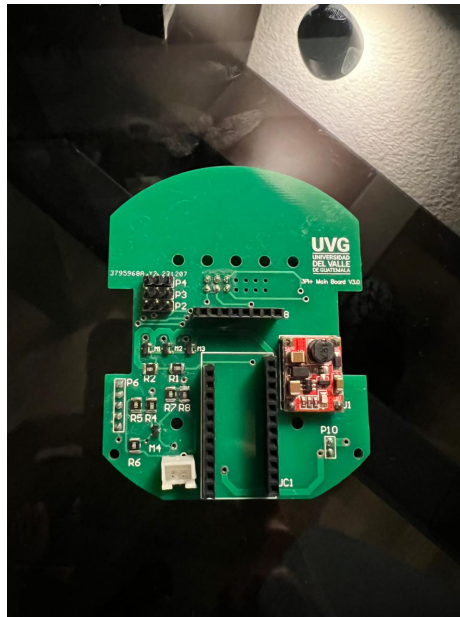
Número de Pin	Uso asignado
1	Servomotor 1
2	Servomotor 2
3	Servomotor 3
4	Encendido (CTRL)
5	GPIO libre
21	GPIO libre
0	GPIO libre
35	MOSI (SPI – cámara)
36	MISO (SPI – cámara)
37	SCK (SPI – cámara)
34	SS (SPI – cámara)
8	TX hacia Pololu
7	RX hacia Pololu
44	TX propio TinyS3
43	RX propio TinyS3

Nota. Distribución final de pines en la versión rediseñada de la placa.
Elaboración propia.

12.4. Imágenes físicas de las iteraciones de la placa de expansión

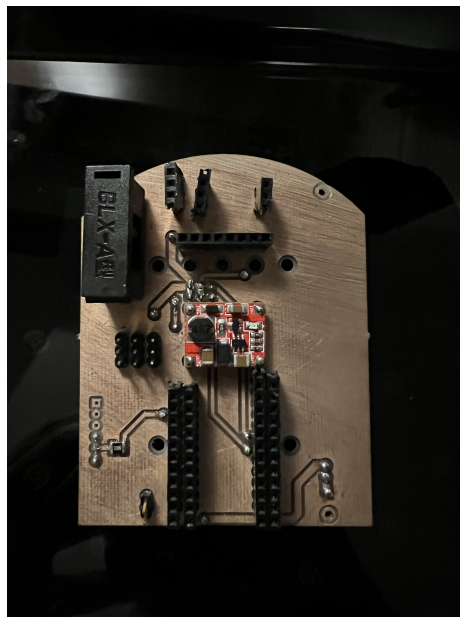
En esta sección se presentan las imágenes físicas correspondientes a las diferentes iteraciones desarrolladas durante el proceso de diseño de la placa de expansión del Pololu 3pi+. Estas fotografías documentan la evolución progresiva del diseño desde la versión inicial (V0) hasta la versión final (V5), permitiendo observar los cambios implementados en distribución de componentes, rutas de energía y estructura general de la placa.

Figura 46. Versión V0 de la placa de expansión diseñada y fabricada por Álvarez



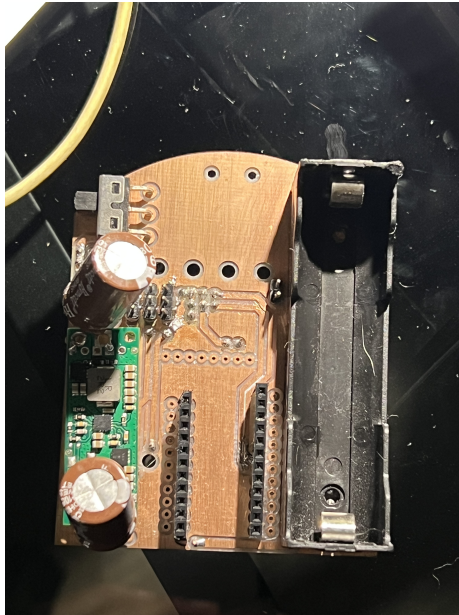
Nota. Placa física diseñada y fabricada por José Luis Álvarez [1].

Figura 47. Versión V1 de la placa de expansión



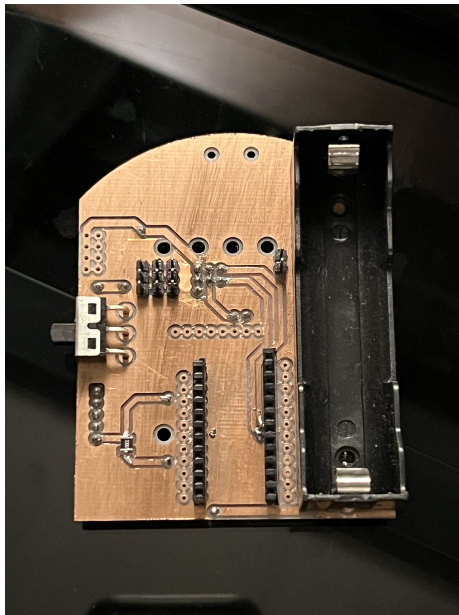
Nota. Elaboración propia.

Figura 48. Versión V2 de la placa de expansión



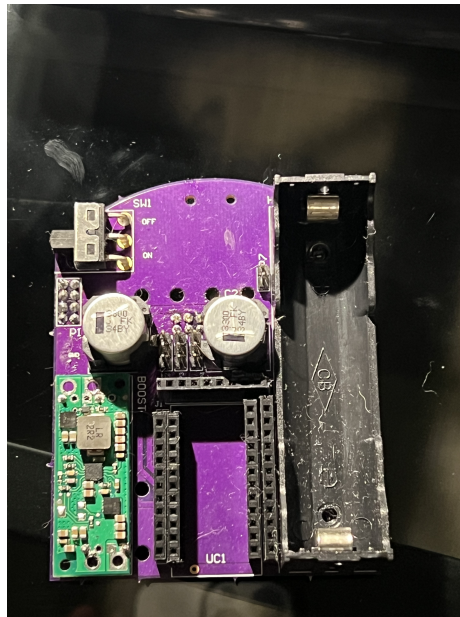
Nota. Elaboración propia.

Figura 49. Versión V3 de la placa de expansión



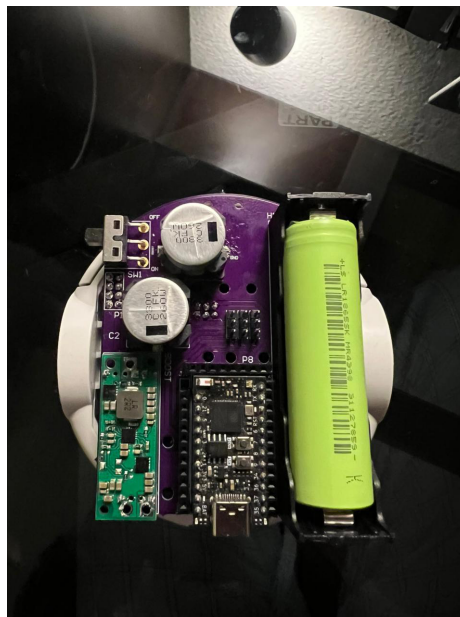
Nota. Elaboración propia.

Figura 50. Versión V4 de la placa de expansión



Nota. Elaboración propia.

Figura 51. Versión V5 de la placa de expansión



Nota. Elaboración propia.

