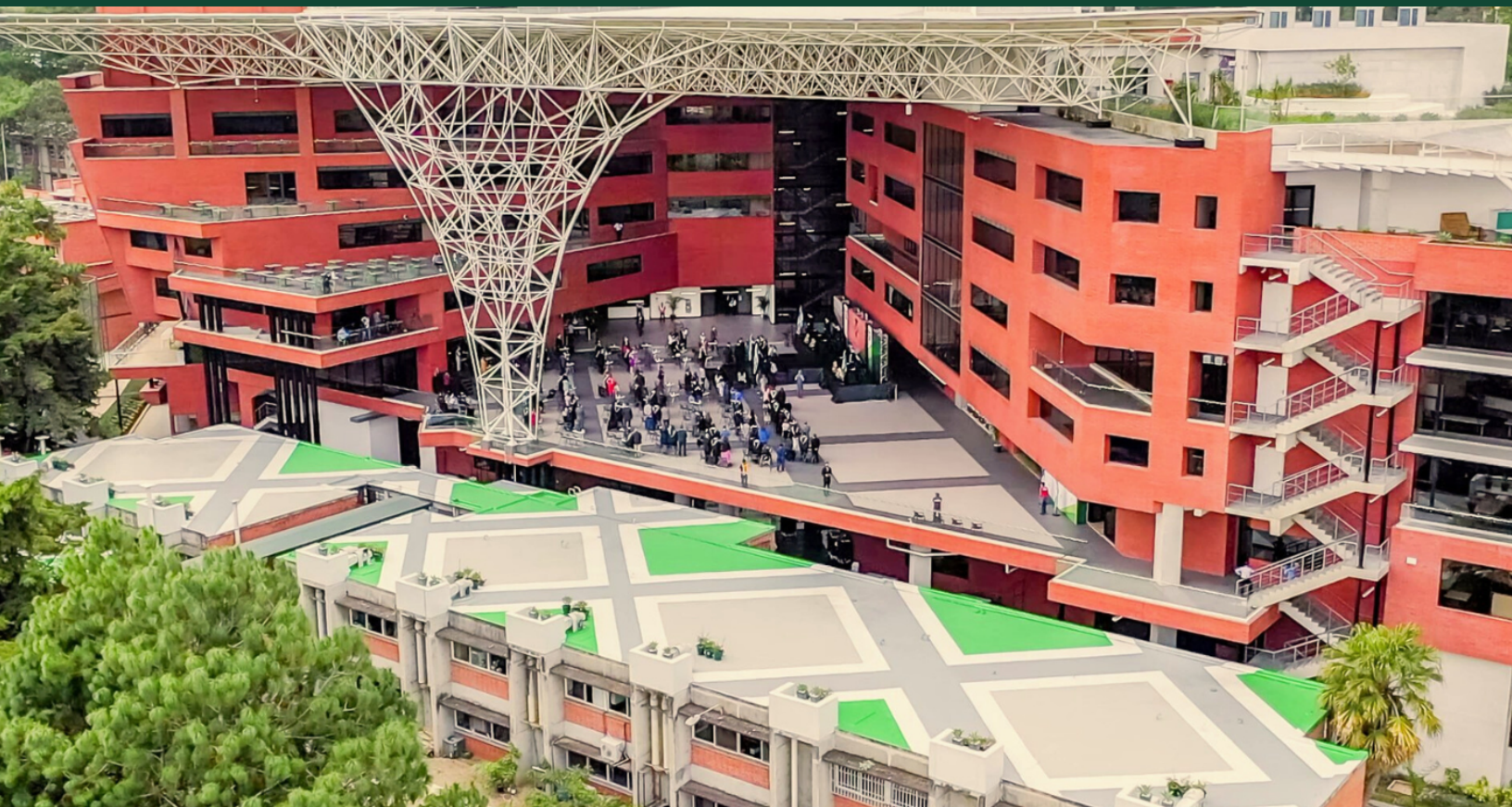

Desarrollo de un chasis de robot humanoide basado en el PPegasus-21

José Andres Najera Payes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Desarrollo de un chasis de robot humanoide basado en el
PPegasus-21**

Trabajo de graduación presentado por José Andres Najera Payes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Desarrollo de un chasis de robot humanoide basado en el
PPegasus-21**

Trabajo de graduación presentado por José Andres Najera Payes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 
MSc. Carlos Esquit

(f) 
Ing. Kurt Kellner

Este trabajo marca el cierre de un capítulo que no habría sido posible sin la presencia y el apoyo de quienes caminaron a mi lado. Agradezco, en primer lugar, a Dios, cuya guía ha sido luz constante, sostén en la incertidumbre y esperanza en cada paso de este recorrido.

A mi familia, le debo más de lo que cualquier página puede contener. Su amor, sus sacrificios silenciosos y la fe inquebrantable que depositaron en mí hicieron posible avanzar incluso cuando el camino se volvió cuesta arriba. Este logro es tan suyo como mío.

Mi gratitud se extiende profundamente a la Fundación Juan Bautista Gutiérrez. Su apoyo no solo abrió las puertas para que este sueño académico fuera alcanzable, sino que iluminó mi formación con oportunidades que transformaron mi vida.

A mis amigos —los de siempre, los del colegio, y aquellos que la universidad y la Fundación entrelazaron en mi historia— gracias por las risas que aligeraron las cargas, por las conversaciones que renovaron fuerzas y por la compañía que convirtió dificultades en aprendizajes. Su presencia hizo que este trayecto fuera más humano y más significativo.

A cada persona que aportó, alentó o simplemente estuvo: gracias. Este trabajo es también un reflejo de ustedes.

Prefacio	I
Índice de figuras	IV
Resumen	V
Abstract	VI
1. Introducción	1
2. Antecedentes	3
3. Justificación	6
4. Objetivos	7
5. Alcance	8
6. Marco teórico	9
6.1. Fabricación aditiva por modelado por deposición fundida (FDM) . . .	9
6.2. Fabricación aditiva por estereolitografía (SLA)	10
6.3. Comunicación en cadena (<i>Daisy-Chain</i>)	10
6.4. Resina ABS-Like de SUNLU	11
6.5. Comparación entre FDM y SLA	11
6.6. Comunicación serial	12
6.7. Servomotores Hiwonder HTD-45H	13
6.8. Controlador de servomotores Hiwonder	14
7. Diseño asistido por computadora	15
7.1. Enfoque general del diseño	15
7.2. Herramientas y recursos	16
7.3. Procedimiento de modelado CAD	16

7.4. Diseño por subsistemas	19
8. Prototipado	22
8.1. Criterios de prototipado	22
8.2. Prototipado de piernas	23
8.3. Prototipado de brazos	25
8.4. Prototipado del torso	26
8.5. Prototipado de cintura	27
9. Integración	29
9.1. Integración mecánica	30
9.2. Integración electrónica y control	31
9.3. Validación funcional	33
10. Porta fuente móvil	34
11. Conclusiones	36
12. Recomendaciones	37
13. Referencias	38

Índice de figuras

1.	Prototipo P Pegasus-21	4
2.	Combinación de impresión 3D y vertido de resina	5
3.	Resina ABS-Like de SUNLU empleada en el proyecto	11
4.	Resistencia a la Flexión FDM vs SLA	12
5.	Servomotor Hiwonder HTD-45H	13
6.	Controlador serial Hiwonder	14
7.	Ensamblaje CAD general del nuevo chasis	19
8.	Ensamblaje CAD de las piernas	19
9.	Ensamblaje CAD de los brazos	20
10.	Ensamblaje CAD del torso	20
11.	Ensamblaje CAD de la cintura	21
12.	Prototipo del tobillo	23
13.	Prototipos de tibia derecha e izquierda.	24
14.	Prototipos de fémur derecho e izquierdo	24
15.	Prototipado de los brazos	25
16.	Prototipos del torso	26
17.	Prototipo de la cintura	27
18.	Prototipo final de la cintura fabricado en resina.	27
19.	Prototipo completo tras la integración	30
20.	Esquemático del circuito impreso auxiliar con un ESP32 Devkit 1	31
21.	Diseño y enrutamiento del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1	32
22.	Visualización 3D del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1	32
23.	Implementación física del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1	32
24.	Modelo CAD del porta fuente móvil	35
25.	Prototipo físico del porta fuente móvil	35

El proyecto consistió en el rediseño y la construcción de un chasis humanoide destinado a investigación académica en robótica. La motivación principal surgió de las limitaciones del modelo predecesor, el PPegasus-21, cuyo número reducido de articulaciones y restricciones geométricas impedían alcanzar configuraciones de mayor movilidad. Con base en estos antecedentes, se definió como objetivo general desarrollar un chasis de nueva generación que incrementara los grados de libertad, mejorara la integración con servomotores inteligentes y mantuviera compatibilidad con los ecosistemas de experimentación como el robotat de la Universidad del Valle de Guatemala.

El proceso de diseño se llevó a cabo mediante modelado tridimensional en un entorno CAD en línea, utilizando como punto de partida la estructura previa y adaptándola a las nuevas exigencias mecánicas. Se rediseñaron piezas clave para compensar la asimetría de los servomotores seleccionados y se empleó diseño en contexto de ensambles para garantizar alineación, movilidad y manufacturabilidad. Paralelamente, se fabricaron prototipos funcionales mediante tecnologías de impresión tridimensional, lo que permitió validar ajustes geométricos, tolerancias y comportamiento estructural antes de construir la versión final.

Como resultado, se obtuvo un chasis humanoide con 21 grados de libertad, cinco más que su antecesor, y completamente integrado con servomotores inteligentes y un sistema electrónico renovado que incluye un microcontrolador Esp32 con capacidad de conexión inalámbrica. Los ensambles finales cumplieron con las especificaciones de movilidad, rigidez y mantenimiento establecidas al inicio del proyecto.

El trabajo deja como línea futura la incorporación de un sistema de baterías autónomo, la implementación de control avanzado con cinemática inversa y la integración de una unidad inercial para mejorar la estabilidad y percepción del robot.

Palabras clave: robótica humanoide, diseño mecánico, prototipado, servomotores inteligentes, manufactura aditiva.

The project focused on redesigning and constructing a humanoid chassis intended for academic research in robotics. The main motivation stemmed from the limitations of the previous model, the PPegasus-21, whose reduced number of articulations (Degrees of freedom) and geometric constraints limited its ability to reach configurations requiring greater mobility. Based on these considerations, the general objective was to develop a new-generation chassis that increased the degrees of freedom, improved integration with intelligent servomotors, and remained compatible with experimental ecosystems such as Robotat at Universidad del Valle de Guatemala.

The design process was carried out through three-dimensional modeling in an online CAD environment, using the previous structure as a starting point and adapting it to new mechanical requirements. Key components were redesigned to compensate for the asymmetry of the selected servomotors, and context-based assembly modeling was employed to ensure alignment, mobility, and manufacturability. Functional prototypes were fabricated using three-dimensional printing technologies, allowing validation of geometric adjustments, tolerances, and structural behavior prior to constructing the final version.

As a result, the project achieved a humanoid chassis with 21 degrees of freedom—five more than its predecessor—and fully integrated with intelligent servomotors and a renewed electronic system that includes an ESP32 microcontroller with wireless communication capabilities. The final assemblies met the mobility, rigidity, and maintenance specifications established at the outset of the project.

Future work includes incorporating an autonomous battery system, implementing advanced control with inverse kinematics, and integrating an inertial measurement unit to enhance the robot's stability and perception.

Keywords: humanoid robotics, mechanical design, prototyping, intelligent servomotors, additive manufacturing.

La robótica humanoide constituye un campo de estudio dentro de la ingeniería mecatrónica que integra disciplinas como el diseño mecánico, la electrónica y los sistemas de control. Este ámbito busca replicar, de manera funcional, aspectos de la locomoción y manipulación humana mediante plataformas articuladas, con aplicaciones en investigación, educación y desarrollo tecnológico. Los avances en servomotores inteligentes, técnicas de fabricación aditiva y sistemas de control distribuido han ampliado las posibilidades para el diseño de robots humanoides más versátiles y accesibles.

El presente trabajo se centra en el rediseño del chasis del robot humanoide PPegasus-21, prototipo que sirve como base experimental para la Facultad de Ingeniería de la Universidad del Valle de Guatemala. La finalidad del proyecto es mejorar la estructura y el sistema electrónico del chasis, incorporando servomotores inteligentes con conexión en cadena (*daisy-chain*) y aumentando los grados de libertad en articulaciones clave. Estas modificaciones buscan facilitar el mantenimiento, aumentar la capacidad de movimiento y asegurar que el prototipo pueda reproducirse de forma confiable en contextos académicos y de investigación.

El tema se delimita al desarrollo estructural y electrónico del chasis, sin abordar de manera directa algoritmos avanzados de control de locomoción o interacciones de alto nivel. La investigación incluye la evaluación de métodos de fabricación híbrida, combinando impresión 3D mediante modelado por deposición fundida (FDM) con estereolitografía (SLA), con el propósito de superar las limitaciones mecánicas de los termoplásticos tradicionales como el PLA. De esta forma, se pretende obtener un prototipo más robusto, funcional y reproducible.

En cuanto a la metodología, el proyecto sigue un enfoque iterativo de diseño y validación. Inicialmente, se rediseñan componentes estructurales en software CAD, tomando en cuenta restricciones geométricas, cargas mecánicas y requerimientos de integración con los actuadores. Posteriormente, se fabrican prototipos mediante impresión 3D (FDM) y se realizan pruebas preliminares de ensamblaje. Finalmente, se

integran los sistemas electrónicos actualizados, considerando la distribución de energía y la comunicación entre servomotores.

Las conclusiones finales del proyecto indican que la incorporación de servomotores inteligentes y la adopción de un proceso de fabricación híbrida contribuyeron a mejorar la versatilidad estructural del chasis y la precisión dimensional de sus componentes. En conjunto, estos resultados permitieron consolidar un prototipo que actualiza de manera significativa al PPegasus-21 y que establece una base técnica sólida para desarrollos posteriores de robots humanoides en entornos educativos y experimentales.

1

¹Este documento empleó herramientas de inteligencia artificial únicamente para perfeccionamiento de redacción y estandarización del estilo, sin influencia en el contenido técnico ni en el desarrollo conceptual del proyecto [1].

El desarrollo de robots humanoides ha sido un tema de interés creciente en la ingeniería mecatrónica, ya que combina elementos de diseño mecánico, electrónica, control y manufactura avanzada. Dentro de este campo, diferentes investigaciones y proyectos previos han abordado tanto la construcción de chasis humanoides como la evaluación de materiales y procesos de fabricación. A continuación se presentan los estudios más relevantes que sirven de base para el presente trabajo.

2.1 Diseño de un chasis de robot humanoide basado en el Robonova-1

El trabajo de graduación realizado por el Ing. Fernando Cáceros consistió en diseñar un chasis funcional inspirado en el robot Robonova-1, con el objetivo de replicar movimientos humanos mediante una plataforma articulada. Para lograrlo, se integraron disciplinas como el diseño mecánico, la electrónica y los sistemas de control, utilizando 16 servomotores heredados del Robonova-1 y un microprocesador encargado de la gestión motriz. El resultado fue el prototipo PPegasus-21, que constituye una plataforma experimental para estudiar técnicas avanzadas de control y cinemática de robots bípedos, así como para evidenciar la necesidad de actualizar sistemas de marcha y control dinámico [2].

Figura 1. Prototipo PPegasus-21



Nota. Elaboración tomada de [2].

2.2 Resistencia de piezas impresas en 3D

Diversos estudios han evaluado la viabilidad estructural de piezas fabricadas por impresión 3D, destacando la influencia de los materiales y parámetros de impresión en la resistencia mecánica. La investigación de O'Neill (2025) analizó materiales comunes como PLA, ABS, PETG, nylon y compuestos reforzados, comparando tecnologías de manufactura aditiva como FDM, SLA/DLP, SLS y Metal Printing. Los resultados confirmaron que la impresión metálica (DMLS/SLM) ofrece la mayor resistencia, seguida por SLS. En el caso de FDM, materiales como el nylon, el policarbonato y los filamentos reforzados superan significativamente al PLA. Además, se determinó que factores como la orientación de impresión, el patrón de relleno, el grosor de pared y técnicas de post-procesamiento (recocido o recubrimiento superficial) mejoran la durabilidad de las piezas [3].

2.3 Modeling and Design of a Humanoid Robot by Additive Manufacturing Process

Azeta et al. (2020) propusieron el modelado y diseño de un robot humanoide mediante manufactura aditiva, orientado a aplicaciones en el sector salud. El diseño se estructuró en tres módulos principales: cuerpo, plataforma móvil y brazos manipuladores. La fabricación se realizó por deposición fundida (FDM) con ácido poliláctico (PLA), material seleccionado por su bajo peso y adecuada resistencia para el prototipo. Los estudios cinemáticos confirmaron la viabilidad del diseño, mientras que los análisis por elementos finitos en hombros y torso mostraron tensiones muy por debajo del límite elástico del PLA (59 MPa). Este estudio demuestra la factibilidad de construir robots humanoides funcionales mediante impresión 3D, siempre que se delimite su uso a entornos controlados [4].

2.4 Fabricación híbrida

El Instituto Fraunhofer de Producción y Automatización (IPA) desarrolló una técnica híbrida denominada *Additive Freeform Fabrication with Casting* (AFFC), cuyo objetivo es superar las limitaciones mecánicas de la impresión FDM convencional. La metodología consiste en fabricar una carcasa externa mediante impresión 3D y posteriormente rellenarla con resinas termoestables como epóxicas o de poliuretano. De esta forma, se elimina la porosidad interna y se incrementa la resistencia estructural. El proceso ha demostrado viabilidad técnica en prototipos funcionales y amplía las aplicaciones potenciales de la impresión 3D hacia componentes eléctricos, espumas de seguridad y estructuras de baja escala de producción [5].

Figura 2. Combinación de impresión 3D y vertido de resina



Nota. Imagen tomada de [5].

En conjunto, estos antecedentes establecen un marco sólido que fundamenta el presente proyecto. Mientras el PPEGASUS-21 evidencia la necesidad de actualizar plataformas humanoides para investigación, los estudios sobre materiales y procesos de manufactura proporcionan herramientas clave para el rediseño de un chasis más robusto y funcional.

El desarrollo de plataformas humanoides representa un área estratégica dentro de la ingeniería mecatrónica, pues permite integrar conocimientos de diseño mecánico, electrónica, control y manufactura avanzada. En este contexto, el robot Pegasus-21 se constituye como una base experimental valiosa. Sin embargo, su chasis actual presenta limitaciones estructurales y electrónicas que restringen su funcionalidad y replicabilidad. Por esta razón, la actualización del chasis constituye una necesidad técnica y académica.

La relevancia de este trabajo radica en la incorporación de servomotores inteligentes con conexión en cadena (*daisy-chain*) y en el aumento de grados de libertad en articulaciones clave, especialmente en los brazos y la cadera. Estas modificaciones mejorarán su mantenibilidad y la facilidad de reproducirlo en entornos de investigación y docencia. La integración de los nuevos actuadores demanda un rediseño estructural así como también abre la oportunidad a la exploración de métodos de fabricación alternativos.

De esta manera, se plantea la exploración de métodos de fabricación mediante un enfoque híbrido que combina impresión 3D tanto por medio de Modelado por Deposición Fundida (FDM) tanto como por medio de estereolitografía (SLA). Este enfoque busca superar las limitaciones mecánicas de los termoplásticos comunes, como el PLA, al aprovechar las propiedades de resinas termoestables. De este modo, se amplía el rango de materiales disponibles para el prototipado funcional.

En conjunto, la justificación del proyecto se fundamenta en la necesidad de modernizar un prototipo humanoide con fines educativos y de investigación, proporcionando una plataforma versátil, duradera y adaptable. Asimismo, la implementación de procesos de fabricación innovadores aporta valor agregado al trabajo, al sentar bases para futuras iteraciones y abrir nuevas posibilidades de aplicación en el ámbito académico y experimental.

4.1 Objetivo general

Desarrollar un chasis robótico humanoide con componentes modernos y diferentes procesos de fabricación, basado en el prototipo PPegasus-21.

4.2 Objetivos específicos

- Integrar más grados de libertad en brazos y cadera al diseño del chasis PPegasus-21.
- Rediseñar el chasis PPegasus21 para la integración de servomotores inteligentes.
- Rediseñar el chasis para utilizar métodos de fabricación mixta.
- Rediseñar el sistema electrónico del chasis, de acuerdo con los nuevos componentes y grados de libertad integrados.

El presente trabajo de graduación se centra exclusivamente en el rediseño estructural y electrónico del chasis del robot humanoide PPegasus-21. El alcance comprende la incorporación de servomotores inteligentes con comunicación en cadena (*daisy-chain*), el incremento de grados de libertad en articulaciones clave y la evaluación de métodos de fabricación híbrida que combinan impresión 3D tanto con FDM como con SLA. No se abordan en esta investigación algoritmos avanzados de locomoción, control dinámico de la marcha ni validaciones experimentales a gran escala, pues dichos aspectos corresponden a futuras fases de desarrollo. De esta manera, el trabajo establece como límite la entrega de un prototipo funcional a nivel estructural y electrónico, documentando el proceso de diseño, prototipado e integración, sin extenderse hacia la implementación de estrategias de control de alto nivel ni hacia estudios de desempeño prolongado en escenarios complejos.

El presente capítulo expone los conceptos fundamentales que sustentan el desarrollo del proyecto. Se abordan los principios de la robótica humanoide, los procesos de manufactura aditiva relevantes para el prototipado del chasis, así como las tecnologías electrónicas y materiales empleados. Con ello, se establece un marco de referencia que permite comprender el alcance, la metodología y los resultados de este trabajo de graduación.

6.1. Fabricación aditiva por modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición fundida (*Fused Deposition Modeling*, FDM) es una de las tecnologías de fabricación aditiva más utilizadas debido a su bajo costo, versatilidad y facilidad de implementación. En este proceso, un filamento termoplástico, como el ácido poliláctico (PLA) o el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), es fundido en un extrusor y depositado capa por capa siguiendo trayectorias previamente definidas en un modelo CAD. Cada capa se solidifica rápidamente al enfriarse, formando estructuras tridimensionales con geometrías complejas que serían inviables mediante procesos convencionales de manufactura sustractiva [4], [5].

Una de las principales ventajas del FDM es la capacidad de prototipar y producir piezas funcionales en tiempos reducidos, lo cual resulta especialmente útil en el diseño y ensayo de robots humanoides. Sin embargo, sus propiedades mecánicas dependen fuertemente de parámetros como la orientación de impresión, la densidad de relleno y las condiciones de enfriamiento. Estudios recientes demuestran que los componentes impresos con FDM presentan un comportamiento anisotrópico, mostrando mayor resistencia a lo largo de las líneas de extrusión y menor desempeño en dirección transversal [3], [6]. Por ello, comprender las limitaciones del proceso es clave

para garantizar que las piezas impresas cumplan con los requisitos estructurales de aplicaciones en robótica.

6.2. Fabricación aditiva por estereolitografía (SLA)

La estereolitografía (*Stereolithography*, SLA) es una técnica de fabricación aditiva que utiliza resinas fotosensibles líquidas, las cuales son polimerizadas capa por capa mediante la exposición controlada a una fuente de luz ultravioleta (UV) o láser. Este método permite la creación de piezas con alta resolución y un acabado superficial muy superior al de tecnologías como FDM, lo que la convierte en una opción atractiva para aplicaciones donde la precisión geométrica y la calidad estética son determinantes [5], [6]. Además, la variedad de resinas disponibles —desde rígidas y de alta resistencia hasta elásticas o biocompatibles— ofrece una flexibilidad considerable en función de los requerimientos del diseño.

No obstante, los componentes fabricados mediante SLA presentan limitaciones importantes en términos de resistencia mecánica y durabilidad en comparación con piezas producidas mediante técnicas tradicionales. Investigaciones recientes han demostrado que las resinas SLA, aunque presentan mejor uniformidad en la superficie y alta rigidez, tienden a mostrar menor tenacidad y resistencia al impacto frente a polímeros extruidos en FDM [6]. Asimismo, factores como la orientación de impresión y el tipo específico de resina empleada influyen significativamente en propiedades como la microdureza, la resistencia a la flexión y la estabilidad dimensional, aspectos críticos para aplicaciones en robótica humanoide [7].

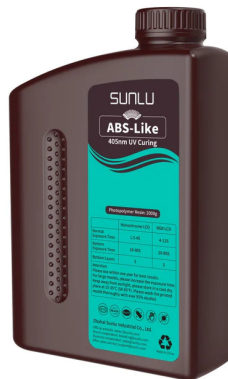
6.3. Comunicación en cadena (*Daisy-Chain*)

La comunicación en cadena, comúnmente conocida como *daisy-chain*, es un método de interconexión en el cual múltiples dispositivos se enlazan en serie dentro de un mismo bus de datos y alimentación. En el contexto de la robótica, esta técnica se aplica principalmente a servomotores inteligentes, permitiendo que cada actuador se conecte al siguiente mediante un único par de cables, en lugar de requerir conexiones individuales hacia un controlador central. Esta arquitectura reduce significativamente la complejidad del cableado, facilita el mantenimiento y permite escalar el número de grados de libertad de manera más eficiente. Cada servo posee una dirección única que le permite recibir y ejecutar comandos específicos, a la vez que retransmite la señal al resto de la cadena. En consecuencia, el esquema *daisy-chain* resulta especialmente ventajoso para robots humanoides como el PPegasus-21, en los cuales el aumento de articulaciones exige un sistema ordenado, flexible y robusto de distribución de control y energía [8].

6.4. Resina ABS-Like de SUNLU

La resina *ABS-Like* de SUNLU es un material fotopolimérico diseñado para impresión 3D mediante tecnología SLA, caracterizado por su bajo olor, baja contracción y buen desempeño mecánico. Presenta propiedades de resistencia a la tracción de 34 MPa y módulo de elasticidad cercano a 1020 MPa, con una elongación al quiebre del 20 %, lo que le otorga una combinación de rigidez y tenacidad superior a la de resinas estándar. Adicionalmente, ofrece buena resistencia al impacto (60 J/m) y un comportamiento de flexión robusto, lo que permite fabricar piezas con cierta tolerancia a esfuerzos dinámicos y caídas accidentales. Su dureza de 75–80 Shore D y estabilidad dimensional hacen que sea adecuada para modelos funcionales y prototipos de ingeniería que requieren mayor durabilidad y resistencia al envejecimiento, acercando su desempeño al de plásticos tradicionales como el ABS. Por estas características, se seleccionó este material como componente principal en la fabricación del chasis y piezas críticas del robot humanoide [9].

Figura 3. Resina ABS-Like de SUNLU empleada en el proyecto



Nota. La imagen muestra la presentación comercial de la resina ABS-Like de SUNLU, utilizada como material base para las piezas fabricadas mediante estereolitografía, Extraído de [9].

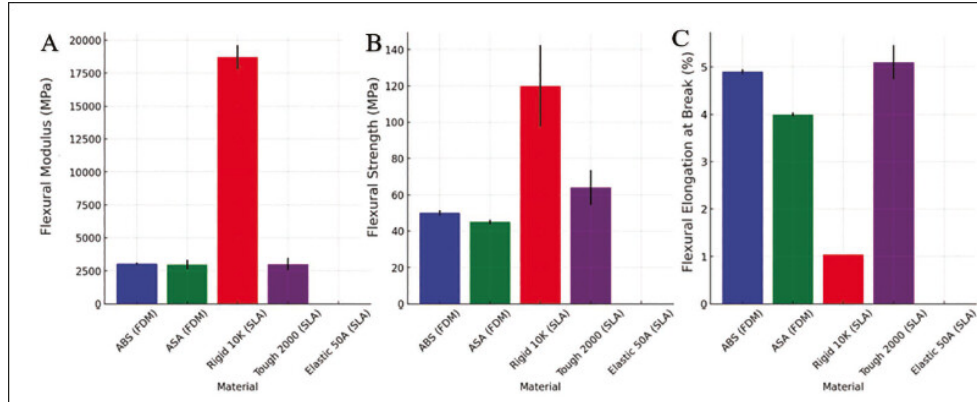
6.5. Comparación entre FDM y SLA

El modelado por deposición fundida (FDM) y la estereolitografía (SLA) representan dos de las tecnologías más utilizadas en manufactura aditiva, pero difieren de manera significativa tanto en el proceso como en las propiedades finales de las piezas producidas. En el caso del FDM, el material base es un filamento termoplástico que se funde y deposita en capas sucesivas, lo cual permite fabricar piezas resistentes al impacto y con buena ductilidad. Sin embargo, el carácter estratificado del proceso introduce anisotropía en las propiedades mecánicas, de manera que la resistencia de-

pende de la orientación de impresión y de los parámetros de relleno. Este efecto se traduce en piezas menos uniformes y con acabados superficiales más rugosos.

Por su parte, la SLA emplea resinas fotosensibles líquidas que son polimerizadas mediante un láser o fuente de luz ultravioleta, generando capas muy delgadas y continuas. Gracias a este mecanismo, las piezas producidas con SLA presentan una precisión geométrica muy superior y un acabado superficial liso, además de una rigidez considerable en comparación con los termoplásticos extruidos. [6]

Figura 4. Resistencia a la Flexión FDM vs SLA



Nota. Comparación de la resistencia a la flexión entre distintos materiales y técnicas [6].

6.6. Comunicación serial

La comunicación serial es un método de transmisión de datos en el que la información se envía bit a bit a través de un único canal o línea de transmisión. A diferencia de la comunicación paralela, donde varios bits se transmiten simultáneamente, en la comunicación serial los bits se organizan en secuencia y se transmiten de manera ordenada, comenzando con el bit menos significativo. Una vez recibidos, los datos se convierten nuevamente a formato paralelo para su procesamiento. Este esquema reduce el número de conexiones físicas necesarias y resulta ideal para sistemas embebidos y aplicaciones donde la simplicidad y la confiabilidad son prioritarias.

Para garantizar la correcta interpretación de los datos, es indispensable que ambos extremos de la comunicación compartan parámetros como la tasa de transmisión (baudios), el número de bits por carácter, los bits de inicio y parada, así como los métodos de control de flujo. Existen distintos modos de operación, como la comunicación síncrona y asíncrona, siendo esta última la más común en servomotores de tipo bus debido a su simplicidad y bajo costo. En particular, el estándar EIA-232D (comúnmente conocido como RS-232) establece los lineamientos básicos para la transmisión asíncrona, aunque en la actualidad también se emplean variantes más modernas adaptadas a microcontroladores y dispositivos robóticos [10].

6.7. Servomotores Hiwonder HTD-45H

Los servomotores de bus Hiwonder HTD-45H representan una evolución frente a los servos tradicionales al integrar en un solo dispositivo el motor, el controlador y la interfaz de comunicación. Estos actuadores utilizan un protocolo basado en UART de medio dúplex, con una velocidad de transmisión de 115200 baudios, lo cual permite enlazar múltiples unidades mediante un esquema en cadena (*daisy-chain*). Teóricamente, es posible conectar hasta 253 servomotores en serie, asignando a cada uno una dirección única para su identificación y control. Esta arquitectura contribuye a simplificar el cableado, reducir la complejidad del sistema y facilitar la escalabilidad en plataformas robóticas con numerosos grados de libertad [11].

En términos de desempeño, el HTD-45H ofrece un torque de hasta 45 kg·cm a 11.1 V, un rango de giro de 0° a 240° y una resolución de 0.2°. Su diseño con engranajes metálicos y funciones de protección contra sobrecarga y sobrecalentamiento lo hacen adecuado para aplicaciones de alta exigencia mecánica, como las articulaciones de robots humanoides. Adicionalmente, este modelo permite operar en dos modos: como servo de posición y como motor de engranajes de rotación continua, lo cual amplía su versatilidad en aplicaciones robóticas avanzadas. Estas características convierten al HTD-45H en un componente clave para el rediseño del chasis del PPegasus-21, dado que soporta mayor robustez estructural y flexibilidad en comparación con los servos convencionales [11].

Figura 5. Servomotor Hiwonder HTD-45H

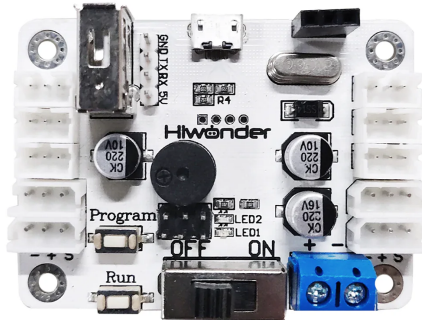


Nota. Vista del servomotor con una de las tapaderas removidas, Extraído de [11].

6.8. Controlador de servomotores Hiwonder

El controlador de servomotores de bus desarrollado por Hiwonder es un dispositivo diseñado para gestionar múltiples actuadores inteligentes de manera coordinada. Está basado en un microcontrolador STM32 con núcleo ARM Cortex-M3, lo que le permite ejecutar instrucciones de control de posición y velocidad con alta precisión. Este equipo soporta tanto conexiones cableadas mediante puerto USB como interfaces inalámbricas (Bluetooth y controladores PS2), además de contar con capacidad de programación manual mediante botones físicos. Una de sus características más relevantes es su memoria interna de 16 MB, capaz de almacenar hasta 230 grupos de acciones, cada uno con más de 500 movimientos, lo que lo convierte en una herramienta ideal para la programación de rutinas complejas en robots humanoides. Asimismo, admite control offline, alarmas por bajo voltaje y comunicación serial con otros microcontroladores, ampliando sus posibilidades de integración en sistemas de control avanzados [12].

Figura 6. Controlador serial Hiwonder



Nota. Placa de circuitos del Controlador Hiwonder, Extraído de [12].

El desarrollo del chasis se estructuró mediante un proceso iterativo basado en diseño asistido por computadora. Este enfoque permitió pasar de un análisis inicial del funcionamiento del P Pegasus-21 original hacia una versión optimizada que integra nuevos servomotores, un mayor número de grados de libertad y una geometría ajustada a las necesidades de manufactura y prototipado rápido. [13].

El proceso se organizó de forma que pudiera ser replicado por otros usuarios: primero se definieron los requisitos funcionales, luego se construyeron modelos CAD preliminares, se evaluaron mediante análisis geométricos y se generaron las piezas para su fabricación. Este enfoque garantizó que el diseño final respondiera tanto a criterios funcionales como de manufacturabilidad. [14].

7.1. Enfoque general del diseño

El proyecto se desarrolló siguiendo un enfoque iterativo que permitió identificar y corregir limitaciones de forma progresiva. Las decisiones de diseño se guiaron por:

- análisis del chasis previo y sus limitaciones mecánicas,
- modelado CAD de nuevas piezas adaptadas a los servomotores asimétricos,
- fabricación de prototipos para validar tolerancias y geometrías. [4], [5]
- integración mecánica y electrónica,
- pruebas funcionales para asegurar estabilidad y movilidad.

Este proceso permitió mantener una retroalimentación continua entre el diseño digital y el prototipado físico.

7.2. Herramientas y recursos

El modelado del chasis se realizó en **Onshape**, herramienta seleccionada por su capacidad colaborativa, su sistema de versionado y el diseño en contexto de ensamblajes. Esto permitió verificar interferencias, compatibilidad entre piezas y rangos de movimiento. [10]

Para la fabricación se utilizaron las siguientes tecnologías:

- **FDM (PLA)**: impresoras Creality CR-10s y Ultimaker S3 [15], [16], para piezas grandes o de baja criticidad dimensional.
- **SLA (resina ABS-Like)**: impresoras Anycubic Photon[17], seleccionadas para piezas funcionales que requieren alta precisión.

7.3. Procedimiento de modelado CAD

El modelado asistido por computadora constituyó una de las fases más extensas y críticas del proyecto, ya que permitió transformar los requisitos funcionales del nuevo chasis Pegasus. El proceso se estructuró siguiendo un flujo de trabajo iterativo que combinó análisis geométrico, diseño en ensamblajes y validación de interferencias, garantizando que cada componente cumpliera simultáneamente con criterios de movilidad, resistencia estructural y compatibilidad con los servomotores inteligentes seleccionados.

El procedimiento completo se detalla a continuación.

1. Definición de requisitos y parametrización inicial

La primera etapa consistió en traducir los objetivos generales del proyecto en restricciones y parámetros de diseño explícitos. Estos incluyeron:

- la integración de 21 grados de libertad distribuidos en piernas, brazos, cintura y cabeza,
- la incorporación de servomotores inteligentes Hiwonder HTD45 con geometría asimétrica [11], [18],
- la necesidad de alojar un ESP32 Devkit 1, una placa controladora y cableado interno,

- la reducción del número de piezas respecto al modelo previo,
- la optimización de geometrías para manufactura aditiva (FDM y SLA),
- la disminución de uniones adhesivas mediante el uso de piezas monolíticas,
- tolerancias adecuadas para ensamblajes con movimiento.

A partir de estos requerimientos se estableció un sistema de referencias, planos principales y parámetros globales que permitieron mantener coherencia dimensional entre todos los subsistemas durante las distintas iteraciones.

2. Modelado detallado de servomotores

Dado que los servomotores constituyen el elemento estructural más restrictivo del diseño, se inició el proceso construyendo modelos CAD precisos basados en:

- mediciones directas con Vernier digital para carcasa externa, ejes y bridas,
- análisis de curvaturas asimétricas en la cara posterior del motor,

Este paso permitió construir “volúmenes prohibidos” que debían respetarse en el diseño de los componentes estructurales para garantizar la movilidad del robot sin colisiones.

3. Diseño en ensamblajes (modelado en contexto)

Se desarrolló el chasis empleando la modalidad de diseño en contexto de Onshape. Este enfoque permitió crear piezas considerando directamente:

- la orientación y posición final dentro del robot,
- la interacción con otras piezas,
- la trayectoria esperada de los servomotores,
- la transferencia de cargas entre segmentos.

Dentro del ensamblaje maestro se crearon subsistemas independientes para piernas, brazos, torso y cintura, lo cual facilitó la detección temprana de inconsistencias y la actualización automática de geometrías derivadas.

4. Análisis de interferencias y validación de movilidad

Cada iteración del modelo se sometió a un proceso de verificación que incluyó:

- aseguramiento del alineamiento entre servomotor y pieza acoplada,
- revisión del libre recorrido de las articulaciones bajo los 21 grados de libertad,

Este análisis permitió garantizar que el prototipo físico pudiera reproducir los movimientos previstos sin generar bloqueos mecánicos ni comprometer la estructura por esfuerzos imprevistos.

5. Refinamiento geométrico y optimización para manufactura

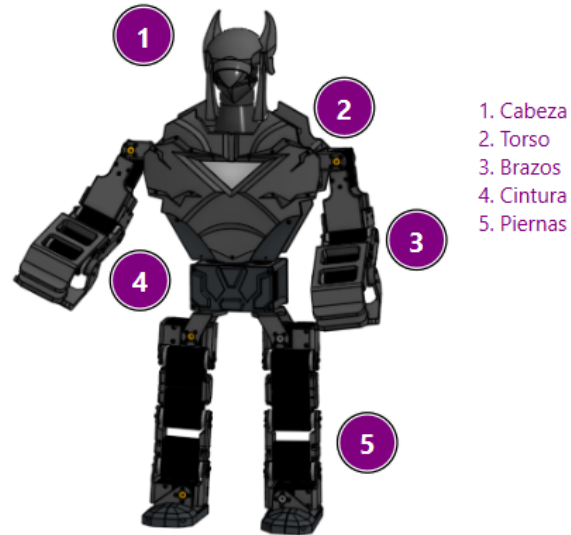
El modelo CAD atravesó múltiples revisiones orientadas a mejorar la manufacturabilidad y el desempeño estructural. Entre los ajustes realizados destacan:

- incorporación de filetes internos y externos para reducir concentraciones de esfuerzo.
- modificación de espesores en zonas sometidas a torsión.
- estandarización de diámetros de tornillos y separadores.

7.4. Diseño por subsistemas

7.4.1. Vista general

Figura 7. Ensamblaje CAD general del nuevo chasis



7.4.2. Piernas

Figura 8. Ensamblaje CAD de las piernas

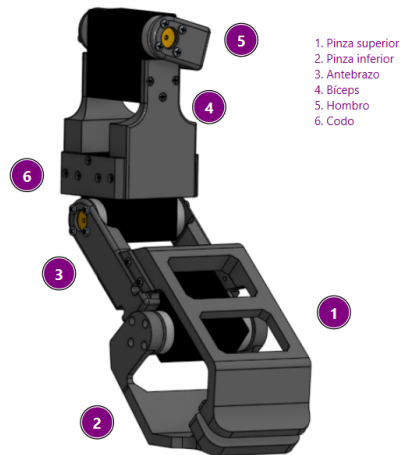


Las piernas se diseñaron considerando la asimetría de los servomotores y la necesidad de garantizar estabilidad durante la marcha. Cada pierna se conforma de 6 servomotores inteligentes, la asimetría de los mismos se resalta en la sección media en fémur y tibia mientras que los elementos estructuralmente críticos se encuentran

sobretudo en los extremos, unión con la cintura, tobillo y cadera.

7.4.3. Brazos

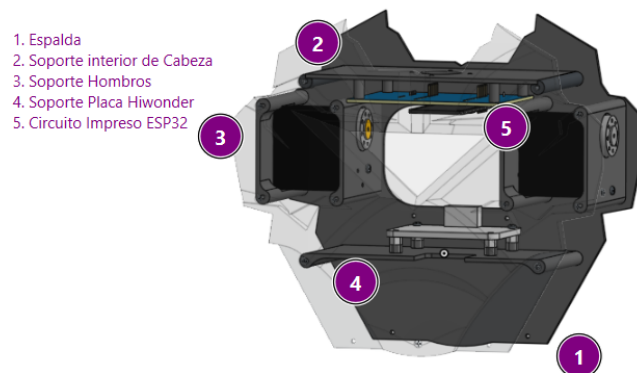
Figura 9. Ensamblaje CAD de los brazos



Los brazos fueron rediseñados completamente para integrar dos grados de libertad adicionales específicamente en codo y mano/pinza que funciona como efector final.

7.4.4. Torso

Figura 10. Ensamblaje CAD del torso



El torso se rediseñó internamente para alojar el ESP32 Devkit 1, la placa controladora y el cableado.

7.4.5. Cintura

Figura 11. Ensamblaje CAD de la cintura



La cintura incorporó un nuevo grado de libertad y piezas compensatorias para manejar la asimetría de los servomotores.

El prototipado permitió validar físicamente las geometrías generadas en CAD, asegurando que las tolerancias, la rigidez estructural y la compatibilidad con los servomotores fueran adecuadas. La manufactura en resina facilitó la creación de piezas monolíticas, reduciendo uniones adhesivas y mejorando la resistencia.

8.1. Criterios de prototipado

- Usar SLA para piezas funcionales o estructuralmente críticas debido a su precisión y resistencia [7], [19].
- Usar FDM para piezas grandes o no críticas y para la verificación física rápida del diseño estructural. [20]
- Mantener orientaciones que reduzcan soportes en zonas de ajuste.

8.2. Prototipado de piernas

8.2.1. Tobillo

Figura 12. Prototipo del tobillo



El tobillo se fabricó como una sola pieza utilizando impresión SLA en resina, lo que permitió eliminar varias uniones presentes en el modelo previo y mejorar la continuidad estructural del componente. Esta decisión de manufactura resultó fundamental, ya que el tobillo constituye una de las zonas de mayor criticidad mecánica dentro del chasis: además de soportar buena parte del peso total del robot, transmite los esfuerzos dinámicos generados durante la marcha y durante los cambios de postura.

La fabricación monolítica facilitó suavizar transiciones geométricas y optimizar las superficies de contacto con el servomotor y el pie. Asimismo, permitió reducir el riesgo de fallas por concentración de esfuerzos en uniones atornilladas o adhesivas, un problema identificado durante las etapas preliminares de modelado. Gracias al prototipado, fue posible validar la rigidez del diseño, confirmar la estabilidad del ensamblaje y ajustar detalles fundamentales como la inclusión de detalles para el manejo de cableado.

8.2.2. Tibia

Figura 13. Prototipos de tibia derecha e izquierda.



Esta sección de las piernas, en conjunto con el fémur, fue una de las más afectadas por la asimetría dimensional de los servomotores empleados. Debido a las diferencias en la geometría externa y en la ubicación de los puntos de montaje de los actuadores, no fue posible utilizar una pieza simétrica para ambos lados del robot. En consecuencia, fue necesario diseñar y fabricar dos versiones independientes de la tibia: una para la pierna izquierda y otra para la derecha. Cada variante incorporó ajustes específicos en las superficies de apoyo, las tolerancias y la orientación de los alojamientos, con el fin de asegurar una correcta alineación con los ejes de rotación y mantener la continuidad estructural del conjunto.

8.2.3. Fémur

Figura 14. Prototipos de fémur derecho e izquierdo

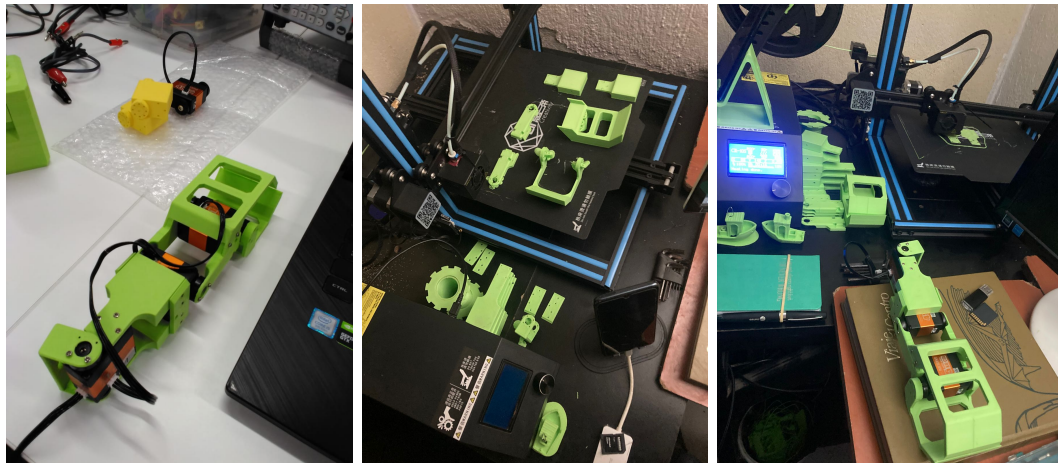


El fémur, al igual que la tibia, fue uno de los componentes directamente afectado por la asimetría geométrica de los servomotores seleccionados para esta versión del prototipo. Aunque constituye una pieza estructuralmente pasiva —pues no incorpora un servomotor propio ni genera movimiento por sí misma— desempeña un papel fundamental como enlace mecánico entre dos articulaciones consecutivas de la pierna. Esta condición exige que su diseño garantice una transmisión adecuada de cargas, especialmente durante posturas estáticas y desplazamientos donde actúan momentos de flexión y torsión.

Debido a su función portante, el diseño del fémur se desarrolló siguiendo la filosofía estructural aplicada en otras piezas del chasis: identificación de concentradores de esfuerzos, suavizado de transiciones geométricas y definición de espesores que proporcionaran una relación equilibrada entre peso y rigidez. La asimetría de los actuadores también obligó a diseñar alojamientos específicos que compensaran desplazamientos del eje mecánico, asegurando el alineamiento correcto de las articulaciones y evitando cargas excéntricas no deseadas. Gracias a estas consideraciones, el fémur resultante permitió mantener una arquitectura de pierna estable y consistente con los requisitos de movilidad del robot.

8.3. Prototipado de brazos

Figura 15. Prototipado de los brazos



Esta fue una de las fases de prototipado más extensas, ya que la incorporación de dos grados de libertad adicionales en cada brazo requirió el diseño completamente nuevo de varios componentes estructurales. Debido a este incremento en movilidad, fue necesario reconsiderar la arquitectura mecánica del conjunto para asegurar que las nuevas articulaciones contaran con la rigidez, el espacio de operación y las tolerancias adecuadas. En esta etapa se modelaron desde cero elementos críticos como la mano y ambos segmentos del antebrazo, los cuales debían acoplarse con precisión a los servomotores inteligentes y soportar esfuerzos derivados del movimiento combinado

del brazo.

Las piezas principales fueron fabricadas mediante impresión en resina utilizando tecnología SLA, seleccionada por su alta resolución, excelente acabado superficial y mayor resistencia en detalles finos, lo cual resultó indispensable para validar zonas de acoplamiento, alojamientos para tornillería y geometrías internas complejas. Por otro lado, los componentes secundarios fueron manufacturados mediante impresión FDM en PLA, aprovechando su menor costo, rapidez de fabricación y adecuadas propiedades mecánicas para elementos no sometidos a esfuerzos críticos. Esta combinación de tecnologías permitió iterar de forma eficiente entre distintas versiones de diseño, evaluar el comportamiento real de las articulaciones y asegurar que el conjunto final alcanzara la movilidad prevista sin comprometer la integridad estructural.

8.4. Prototipado del torso

Figura 16. Prototipos del torso



El prototipado del torso se centró en rediseñar la estructura interna para acomodar los nuevos requisitos de integración mecánica y electrónica. Fue necesario modificar los soportes internos destinados a los servomotores de los brazos, así como adaptar el espacio para las placas electrónicas y para la base de acoplamiento con la cintura. Estas modificaciones buscaban asegurar un montaje estable, una correcta distribución de cargas y un acceso adecuado.

Paralelamente, se realizaron ajustes estéticos y estructurales en las placas externas del pecho y la espalda. Aunque estos cambios fueron menores en comparación con las intervenciones internas, resultaron esenciales para corregir la posición y el tamaño de los orificios de tornillería, garantizar la alineación con los nuevos componentes internos y mejorar la manufacturabilidad. El proceso de prototipado permitió validar estas modificaciones y verificar que el torso pudiera ensamblarse sin interferencias, manteniendo la rigidez necesaria para soportar el tren superior del robot.

8.5. Prototipado de cintura

Figura 17. Prototipo de la cintura



Figura 18. Prototipo final de la cintura fabricado en resina.



La cintura representó una de las etapas de prototipado más prolongadas debido a su papel central en la estructura del robot. Este componente debe soportar todo el peso del tren superior —compuesto por torso, brazos y cabeza— y transmitirlo de manera estable hacia el tren inferior, por lo que cualquier error en su geometría o rigidez comprometería la integridad del ensamblaje completo.

Además de los servomotores responsables del movimiento de cada pierna, la cintura integra un actuador adicional encargado de proporcionar el grado de libertad correspondiente a la rotación del torso. Esto exigió diseñar una arquitectura interna que garantizara la correcta alineación entre el motor, los ejes de rotación y los puntos de acople estructurales.

Tanto la placa superior de la cintura como la base del torso fueron diseñadas con superficies de acople que permiten una conexión precisa y aseguran una transmisión de carga estable durante la operación. El prototipado permitió validar estos mecanismos de unión, ajustar tolerancias críticas y confirmar que el sistema puede sostener el peso del tren superior mientras mantiene una rotación controlada y libre de interferencias.

CAPÍTULO 9

Integración

La integración constituyó la etapa en la cual se ensamblaron los prototipos estructurales con los actuadores inteligentes y la electrónica, verificando que el robot funcionara como un sistema.

9.1. Integración mecánica



Figura 19. Prototipo completo tras la integración

Una vez finalizado el prototipado individual de cada subsistema del chasis, se procedió a la fase de integración global del robot. Este proceso inició por el tren superior, ensamblando los brazos al torso y verificando que los puntos de acople soportaran adecuadamente los actuadores y su cableado. Posteriormente, el torso se acopló a la cintura, asegurando que el mecanismo responsable del grado de libertad adicional operara sin fricción y con el soporte estructural previsto.

De forma equivalente, la cintura se integró con las piernas, consolidando así el enlace entre el tren superior e inferior. Finalmente, se incorporaron los circuitos impresos, sensores y la cabeza, completando la arquitectura mecatrónica del prototipo.

Esta etapa permitió validar de manera sistemática:

- la correcta alineación entre los ejes de todos los grados de libertad,
- la compatibilidad dimensional entre servomotores y componentes fabricados,
- y la rigidez estructural final del ensamblaje ante cargas estáticas y dinámicas.

9.2. Integración electrónica y control

El sistema electrónico está conformado por:

- Placa de comunicación de bus serial Hiwonder para control de los servomotores,
- Placa auxiliar con un **ESP32 Devkit 1** como unidad de procesamiento, interconectada por medio de comunicación serial con la placa Hiwonder
- un LED frontal para retroalimentación visual,
- conexión a una fuente externa de alimentación.

Durante esta etapa se programaron los límites físicos de operación de cada servomotor con el fin de garantizar que los movimientos del chasis se mantuvieran dentro de rangos seguros y no produjeran colisiones entre componentes. Este proceso fue fundamental para proteger la integridad de las piezas estructurales y asegurar la coherencia cinemática del sistema.

Además, se asignó un identificador único a cada actuador, siguiendo el protocolo daisy chain utilizado por los servomotores inteligentes, lo que permitió establecer una comunicación ordenada y evitar conflictos durante el control distribuido. Paralelamente, se completó la interconexión física entre los circuitos impresos y el módulo LED ubicado en el pecho del robot, verificando continuidad eléctrica, correcta distribución de voltaje y funcionamiento del bus de señales.

En conjunto, estas configuraciones aseguraron que la arquitectura electrónica del prototipo quedara completamente operativa y preparada para las etapas posteriores de prueba y control.

Figura 20. Esquemático del circuito impreso auxiliar con un ESP32 Devkit 1

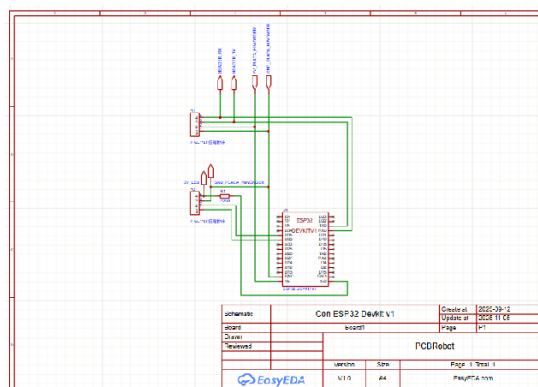


Figura 21. Diseño y enrutamiento del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1

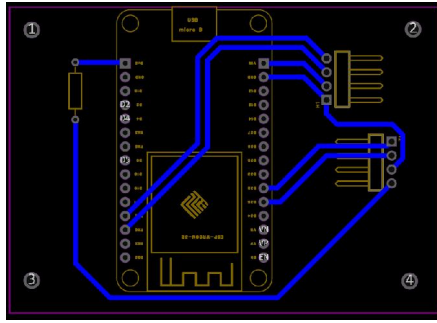


Figura 22. Visualización 3D del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1

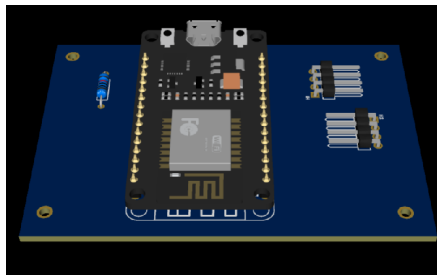
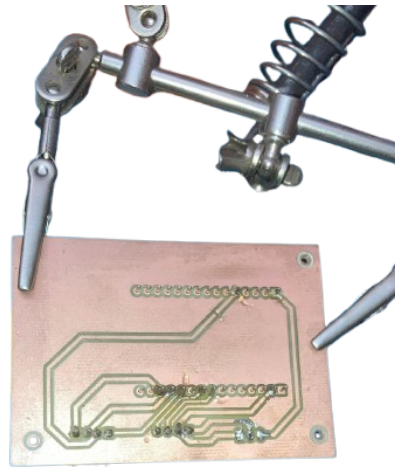


Figura 23. Implementación física del circuito impreso auxiliar con ESP32 Devkit 1



9.3. Validación funcional

La validación funcional se realizó una vez concluida la integración completa del chasis y sus subsistemas electrónicos. El proceso inició con la conexión del robot a una fuente de alimentación externa, lo que permitió ejecutar las primeras pruebas utilizando el software oficial de Hiwonder. Mediante esta herramienta se verificó la movilidad individual de los 21 grados de libertad, asegurando que cada servomotor respondiera dentro de los límites programados y sin generar interferencias mecánicas.

Posteriormente, se desarrollaron y ejecutaron diversas rutinas de movimiento, tanto secuenciales como cíclicas, con el objetivo de evaluar el desempeño conjunto del sistema bajo condiciones de operación real. Estas rutinas incluyeron movimientos aislados de extremidades, pruebas de coordinación multieje y la primera versión de una marcha dinámica preliminar. Este conjunto de evaluaciones permitió observar el comportamiento estructural del chasis, identificar posibles puntos de flexión no deseada y validar la estabilidad de la comunicación electrónica entre actuadores.

La validación final incluyó:

- pruebas de movilidad individual para cada articulación,
- verificación del suministro de corriente y respuesta bajo carga,
- inspección de holguras, vibraciones y posibles resonancias,
- evaluación de la interacción entre todos los subsistemas mecánicos y electrónicos.

Los resultados obtenidos permitieron realizar ajustes finales en el montaje y aportaron insumos fundamentales para definir las recomendaciones presentadas en la sección de trabajo futuro.

CAPÍTULO 10

Porta fuente móvil

Debido a la ausencia de un sistema de baterías capaz de suministrar la corriente requerida por los 21 servomotores inteligentes, fue necesario desarrollar un **porta fuente móvil** que permitiera realizar las pruebas del chasis sin comprometer el cableado ni limitar el rango de movimiento del robot. Este accesorio sostiene la fuente externa —una unidad de 12 V que opera de manera estable alrededor de 11 V y es capaz de suministrar hasta 20 A— y se desplaza junto al robot durante las rutinas de validación.

El diseño se enfocó en garantizar que el cable pudiera acompañar los movimientos del robot sin generar tirones, tensiones sobre los conectores o restricciones durante la marcha. Para ello, se utilizó una base ligera equipada con ruedas comerciales y una geometría simple que mantiene la fuente en posición estable mientras permite que el cable siga al robot con libertad suficiente. Además, se cuidó la altura y el punto de salida del cable para conservar un radio de curvatura adecuado y evitar esfuerzos innecesarios sobre la cintura y las conexiones electrónicas.

Aunque se trata de un elemento auxiliar, el porta fuente móvil fue fundamental para validar los movimientos complejos del chasis bajo un suministro de corriente seguro y continuo.

Figura 24. Modelo CAD del porta fuente móvil



Figura 25. Prototipo físico del porta fuente móvil



El rediseño del chasis humanoide P Pegasus-N permitió ampliar sus capacidades mecánicas hasta alcanzar 21 grados de libertad, cinco más que en la versión anterior, manteniendo compatibilidad con los servomotores Hiwonder HTD-45H y con plataformas de experimentación como Robotat.

El proceso de diseño asistido por computadora permitió generar las nuevas piezas requeridas por la geometría asimétrica de los servomotores, y su fabricación mediante FDM y SLA produjo prototipos funcionales que facilitaron la validación de tolerancias, ensambles y resistencia estructural. El uso de resina permitió consolidar piezas previamente segmentadas, mejorando su integridad mecánica.

La integración de los 21 servomotores con las estructuras impresas confirmó la viabilidad del nuevo chasis, evidenciando un funcionamiento coordinado entre piernas, brazos, torso y cintura. De forma complementaria, se implementó un sistema electrónico actualizado basado en un ESP32 DevKit 1 y una placa preliminar diseñada para este prototipo.

Además, se diseñó y construyó un porta fuente móvil para suplir temporalmente la ausencia de un sistema autónomo de baterías, permitiendo realizar pruebas completas del chasis sin comprometer su movilidad.

A partir del desarrollo del prototipo P_{Pegasus-N} y de las fases de diseño, prototipado e integración, se plantean las siguientes recomendaciones para futuras iteraciones del proyecto:

- Integrar un **sistema de baterías autónomo** junto con su circuitería de carga, capaz de suministrar la corriente requerida por los 21 servomotores inteligentes. Esto permitirá que el robot opere sin dependencia de fuentes externas y facilitará la realización de pruebas de movilidad en escenarios no controlados.
- Implementar un **control avanzado basado en cinemática inversa**, con el objetivo de mejorar la precisión en el posicionamiento de las extremidades y habilitar movimientos más complejos dentro de ecosistemas académicos como *Robotat*. Esta mejora ampliará el potencial del prototipo para aplicaciones de investigación y docencia.
- Incorporar una **unidad de medida inercial (IMU)** que proporcione información en tiempo real sobre la orientación y aceleración del robot. Su integración permitirá desarrollar estrategias de control más robustas, especialmente en tareas de equilibrio, locomoción y respuesta reactiva ante perturbaciones externas.

Estas recomendaciones buscan abordar las limitaciones identificadas en la versión actual del P_{Pegasus-N} y establecer líneas de trabajo que fortalezcan su autonomía, funcionalidad y aplicabilidad en entornos de investigación en robótica humanoide.

-
- [1] OpenAI, *ChatGPT (versión 2025) [Modelo de lenguaje de gran tamaño]*, <https://chat.openai.com/>, Herramienta utilizada únicamente para perfeccionamiento de redacción., 2025.
- [2] F. Caceros, «Diseño de un chasis de robot humanoide basado en el Robonova-1,» ene. de 2024.
- [3] B. O'Neill, «How Strong Are 3D Printed Parts? A Comprehensive Analysis,» ene. de 2025. dirección: <https://www.wevolver.com/article/how-strong-are-3d-printed-parts>.
- [4] J. Azeta, C. A. Bolu y F. A. Oyawale, «Modeling and Design of a Humanoid Robot by Additive Manufacturing Process,» inf. téc., 2020, págs. 1266-1272. dirección: <http://www.irphouse.com>.
- [5] J. Walz, «idw-Informationdienst Wissenschaft idw-Informationdienst Wissenschaft Combining the benefits of 3D printing and casting Seite 1,» Fraunhofer Institute for Production Technology y Automation IPA, inf. téc., 2018. dirección: <http://idw-online.de/de/news691383>.
- [6] L. O'Connor, «Comparative analysis of the mechanical properties of FDM and SLA 3D printed components,» *Journal of Micromanufacturing*, ago. de 2025, ISSN: 2516-5984. DOI: 10.1177/25165984251364689. dirección: [/doi/pdf/10.1177/25165984251364689?download=true](https://doi/pdf/10.1177/25165984251364689?download=true).
- [7] L. V. Araújo et al., «Analysis of Mechanical Properties and Printing Orientation Influence of Composite Resin for 3D Printing Compared to Conventional Resin,» *Materials*, vol. 17, pág. 5626, 22 nov. de 2024, ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma17225626. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1944/17/22/5626>.
- [8] AnalogDevices, *Daisy Chain*, 2025. dirección: https://www.analog.com/en/resources/glossary/daisy_chain.html.
- [9] SUNLU, «SUNLU ABS LIKE RESIN,» inf. téc., 2025.
- [10] IBM, *Serial communication - IBM Documentation*, 2025. dirección: <https://www.ibm.com/docs/en/aix/7.3.0?topic=communications-serial-communication>.

- [11] HiWonder, *Hiwonder HTD-45H High Voltage Serial Bus Servo 45KG Torque with Three*, 2025. dirección: <https://www.hiwonder.com/products/htd-45h?variant=39969169440855>.
- [12] Hiwonder, «Bus Servo Controller User Manual V1.0 2 Catalogue,» inf. téc., 2025.
- [13] R. Linke, *Design thinking, explained / MIT Sloan*, 2017. dirección: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/design-thinking-explained>.
- [14] J. Murtell, *5 Phases of Design Thinking for Effective Innovation / AMA*, 2025. dirección: <https://www.ama.org/marketing-news/the-5-phases-of-design-thinking/>.
- [15] Creality, *Impresora 3D oficial Creality CR 10S*, 2025. dirección: <https://www.creality3dofficial.com/es/products/official-creality-cr-10s-3d-printer>.
- [16] ULTIMAKER, *UltiMaker S3: Easy-to-use 3D printing starts here*, 2025. dirección: <https://ultimaker.com/3d-printers/s-series/ultimaker-s3/>.
- [17] AnyCubic, «ANYCUBIC Photon User Manual,» 2017.
- [18] Aurum3D, *The Role of Motors in Humanoid Robots: Key Technologies and Applications*, <https://www.foxtechrobotics.com/the-role-of-motors-in-humanoid-robots-key-technologies-and-applications>, 2025.
- [19] FOXTECH, *3D Printing Technology Comparison: FDM vs. SLS vs. SLA*, <https://www.aurum3d.com/blog/3d-printing-technology-comparison-fdm-vs-sls-vs-sla/>, 2025.
- [20] B. Engineering, *Berkeley engineers develop customizable, 3D-printed robot for tech newbies*, <https://engineering.berkeley.edu/news/2025/06/berkeley-engineers-develop-customizable-3d-printed-robot-for-tech-newbies/>, 2025.