

IMEC 3713-Consultorio IMEC Ingeniería Mecánica
Universidad de Los Andes

Informe Especificación Técnica

Caso C51

Cliente: Leffer Trochez

Consultor:

Johnny Jay Wilches Kochinski

202113387



Introducción	2
1. Requerimientos generales de diseño	3
1.1. Dimensiones generales	3
1.2. Peso	6
2. Subsistemas de movimiento	6
2.1. Primer subsistema: Movimiento horizontal de 360 grados	6
2.1.1. Torque de los servomotores	7
2.1.2. Engranaje cónico	8
2.2. Segundo subsistema: Movimiento de la cabeza	9
2.2.1. Rango de movimiento	9
3. Mecanismo de sujeción y ensamblaje	11
3.1 Sujeción con tornillos	11
3.2 Revisión de la sujeción general	12
4. Impresión 3D y materiales	14
4.1 Evaluación de imprimibilidad	14
4.2 Parámetros de impresión	15
5. Planos mecánicos	16
5.1 Planos detallados	16
Anexos	16

Introducción

El presente informe aborda el Caso C51 del consultorio IMEC de la Universidad de los Andes con el cliente Leffer Trochez, enfocado en el diseño y análisis de un robot estático destinado a mitigar accidentes domésticos en la primera infancia. El robot consta de una estructura general fabricada mediante impresión 3D y está diseñado para incorporar mecanismos de movimiento precisos tanto en su base como en la cabeza, con el objetivo de garantizar su funcionalidad y adaptabilidad a diferentes entornos. El propósito de este informe es realizar una revisión técnica a los aspectos del diseño, identificando las fortalezas y áreas de mejora de los sistemas seleccionados, y ofrecer recomendaciones para optimizar la funcionalidad del robot, asegurando la conformidad de sus componentes y su operatividad bajo condiciones reales de uso. El documento detalla los requerimientos generales de diseño, describiendo las dimensiones principales del robot para garantizar un diseño compacto y funcional; analiza los subsistemas de movimiento, incluyendo los mecanismos de rotación horizontal y la inclinación de la cabeza, con cálculos de torque, evaluación de engranajes y análisis del rango de movimiento; evalúa el mecanismo de sujeción y ensamblaje, proponiendo el uso de insertos roscados

para mejorar la durabilidad de las conexiones en piezas impresas en 3D con PETG; realiza una evaluación del material seleccionado, PETG, y de los parámetros de impresión definidos, optimizando la calidad y resistencia de las piezas fabricadas; e incluye planos mecánicos de las piezas impresas. Con este enfoque, el informe ofrece un análisis del proyecto, proporcionando datos técnicos, evaluaciones y recomendaciones prácticas para garantizar que el robot cumpla con los objetivos planteados, tanto en su diseño como en su funcionalidad operativa.

1. Requerimientos generales de diseño

1.1. Dimensiones generales

El diseño del robot actual se compone de tres secciones principales; una base inferior, una base intermedia y una parte superior dividida en cuello y cabeza del mismo. El robot tiene una altura total de 269.86 mm (aproximadamente 27 cm). Desglosando las dimensiones, la base inferior presenta una forma rectangular con una sección semicircular, midiendo 185 mm de largo por 180 mm de ancho. La sección semicircular de esta base tiene un diámetro de 180 mm, y la altura de la base inferior es de 51 mm. La base media del robot es de forma cilíndrica, con un diámetro de 180 mm y una altura de 46.885 mm. En cuanto a la cabeza y el cuello, tienen una altura total combinada de 167.732 mm. La cabeza se puede aproximar a una esfera con un diámetro de 105 mm. Estas dimensiones permiten que el diseño del robot mantenga una estructura compacta, pero con suficiente espacio para alojar los componentes internos necesarios, como motores, engranajes y sistemas de control.



Figura 1 Vista isométrica



Figura 2 Vista frontal

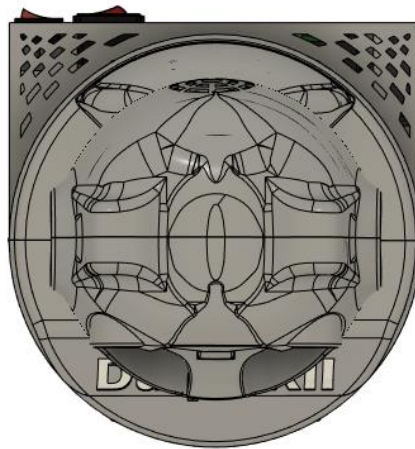


Figura 3 Vista superior



Figura 4 Vista lateral izquierda

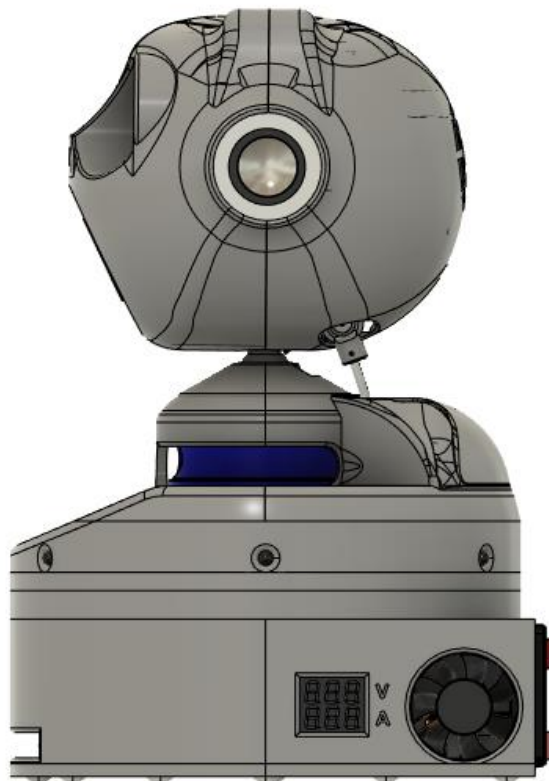


Figura 5 Vista lateral derecha

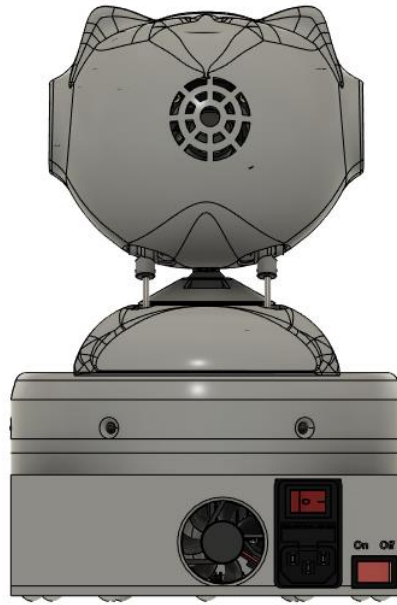


Figura 6 Vista trasera

1.2. Peso

El peso total del robot es de 2538 gramos, distribuido entre sus diferentes componentes de la siguiente manera: la base inferior pesa 1138 gramos, la base media tiene un peso de 575 gramos, y la parte superior, que incluye el cuello y la cabeza, pesa 825 gramos.

2. Subsistemas de movimiento

2.1. Primer subsistema: Movimiento horizontal de 360 grados

Se presenta el análisis del primer subsistema de movimiento del robot, que permite un giro horizontal de 360 grados. El sistema está compuesto por dos servomotores MG996R que accionan un conjunto de engranajes cónicos impresos en 3D en material PETG, cuyo diseño incluye una corona con 40 dientes y un diámetro de 40 mm, y dos piñones de 20 dientes y 20 mm de diámetro en posiciones opuestas. Los servomotores están acoplados a los piñones de 20 dientes, los cuales interactúan con la corona de 40 dientes, generando así una relación de transmisión de 2:1. Esto permite que el movimiento de rotación sea preciso y estable, con una distribución uniforme de la carga sobre los dientes de los engranajes. A continuación, se presenta la evaluación detallada de este subsistema, incluyendo los cálculos necesarios para verificar el funcionamiento de los servomotores y una revisión del sistema en términos de durabilidad.

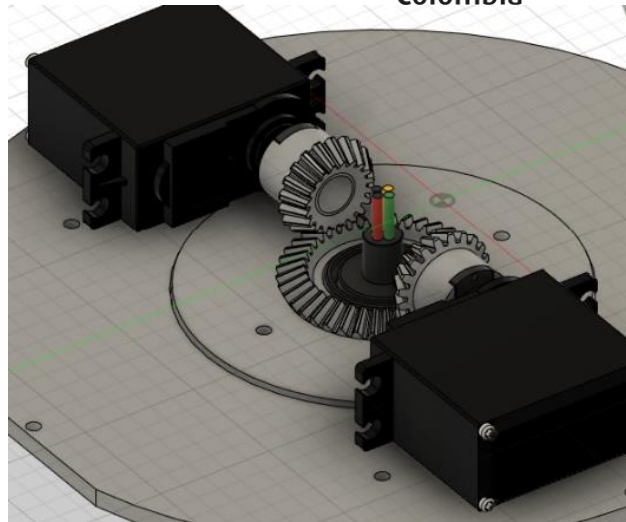


Figura 7 Subsistema de rotación

2.1.1. Torque de los servomotores

Para determinar la idoneidad de los servomotores MG996R seleccionados para este subsistema, es necesario calcular el torque requerido para mover la carga especificada a través del sistema de engranajes, teniendo en cuenta que el torque máximo de un servomotor MG996R es de aproximadamente 9.4 kg·cm (a 6V). Suponiendo una carga distribuida de manera uniforme y considerando el diámetro de la corona, se verifica si el torque proporcionado por los servomotores es suficiente para mover el conjunto del robot bajo la carga especificada. A continuación, se procede a calcular el torque máximo del servomotor y el torque necesario para soportar una carga de 2 kg :

$$T_r = F \times R$$

$$T_r = \left(2kg \times 9.81 \frac{m}{s^2} \right) \times 2cm$$

$$T_r = 39.24 \frac{N}{cm} = 3.924 \frac{Kg}{cm}$$

Donde:

T_r : Torque requerido

F : Fuerza

R : radio

Especificaciones del servomotor MG996R (a 6V):

- Torque máximo: 9.4 kg·cm
- Velocidad sin carga: 0.17 s/60°

Comparando este valor con el torque máximo de 9.4 kg·cm de un solo servomotor, se concluye que los servomotores MG996R seleccionados son suficientes para soportar esta carga, ya que el torque disponible excede significativamente el requerido.

Para el calculo del factor de seguridad se debe considerar que se implementaron dos servomotores que proporcionan 18.8 kg·cm en total, se calcula como la relación entre el torque máximo disponible y el torque requerido:

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{\text{Torque maximo}}{\text{Torque requerido}}$$

$$\text{Factor de Seguridad} = \frac{18.8 \text{ kg/cm}}{3.924 \text{ kg/cm}}$$

$$\text{Factor de Seguridad} = 4.79 \approx 4.8$$

El factor de seguridad obtenido de 4.8 indica que el sistema posee una capacidad significativamente superior a la necesaria para manejar la carga especificada. Este valor demuestra que los servomotores seleccionados son adecuados para esta aplicación, ya que pueden proporcionar más de cuatro veces el torque requerido para mover la carga. Operando dentro de este margen seguro, los servomotores ofrecen confiabilidad y longevidad al sistema, garantizando una operación estable y prolongando la vida útil de los componentes mecánicos sin necesidad de ajustes adicionales en el diseño. El subsistema de movimiento horizontal con los servomotores MG996R y los engranajes cónicos cumple con los requisitos de torque y estabilidad mecánica. El factor de seguridad de 4.8 asegura que el sistema podrá operar de manera eficiente y segura, incluso ante pequeñas variaciones de carga o condiciones imprevistas, sin embargo, se recomienda monitorear el desempeño del sistema en escenarios reales para verificar su comportamiento bajo condiciones prolongadas de uso.

2.1.2. Engranaje cónico

El sistema de engranajes cónicos es una parte fundamental para la transmisión de potencia entre los ejes perpendiculares de los servomotores y la estructura giratoria del robot. La elección de este tipo de engranajes proporciona varias ventajas clave para el subsistema. Permiten una transmisión eficiente de potencia con pérdidas mínimas, asegurando un movimiento suave y preciso del robot. Además, los engranajes cónicos serán impresos en 3D utilizando material PETG, que es adecuado debido a su resistencia al desgaste y su capacidad para soportar cargas moderadas, características importantes para aplicaciones de bajo torque y movimiento continuo.

Para mejorar la vida útil de los engranajes cónicos impresos en PETG, se recomienda implementar un plan de lubricación regular, para así reducir la fricción entre los dientes de los engranajes ayudará a minimizar el desgaste y asegurar un funcionamiento estable. Es importante verificar la calidad de la impresión 3D para garantizar que los dientes de los engranajes estén definidos y que no haya

imperfecciones que puedan afectar el engranaje, ya que estas pueden llevar a una reducción de la eficiencia y un mayor desgaste. También se sugiere realizar pruebas con cargas cercanas al límite de 9.58 kg para asegurar que el sistema mantenga su integridad estructural y funcionalidad.

2.2. Segundo subsistema: Movimiento de la cabeza

Este subsistema permite el movimiento de la cabeza del robot en los ejes vertical y lateral, proporcionando una inclinación precisa para mejorar la interacción y la funcionalidad del juguete robotico. El sistema emplea dos servomotores MG90S, los cuales están acoplados mediante “manijas” a un pivote central que soporta la cabeza del robot. Este diseño permite controlar los ángulos de inclinación y asegurar la estabilidad de la estructura durante su operación. Los servomotores MG90S son compactos y adecuados para aplicaciones de baja carga, lo que los hace optimos para la funcionalidad de inclinación en este contexto. A continuación, se presenta un análisis detallado del rango de movimiento, considerando las especificaciones de los ángulos de operación de los servos y el pivote de la cabeza.

2.2.1. Rango de movimiento

El rango de movimiento de este subsistema ha sido establecido para evitar colisiones entre componentes y maximizar la durabilidad de los servomotores y el pivote. Los ángulos de operación recomendados se definieron tras simular el mecanismo en un modelo 3D preexistente, lo cual permitió observar y optimizar los límites seguros de movimiento. Los ángulos máximos y mínimos, tanto positivos como negativos, se utilizan como referencias límite para prevenir conflictos mecánicos entre las piezas.

Inclinación hacia adelante y hacia atrás (Operación sincrónica):

- **Ángulo positivo:** Cuando ambos servomotores se inclinan simultáneamente hacia adelante, cada servo alcanza un ángulo de +49 grados y el pivote se inclina a +25 grados. Esta configuración permite que la cabeza del robot se mueva hacia adelante en el eje vertical.
- **Ángulo negativo:** Cuando ambos servomotores se inclinan simultáneamente hacia atrás, cada servo alcanza un ángulo de -43 grados y el pivote se inclina a -25 grados, proporcionando una inclinación controlada de la cabeza hacia atrás.

Estos ángulos representan los límites recomendados de operación para la inclinación vertical, asegurando un movimiento seguro.

Inclinación lateral:

La inclinación lateral se logra mediante la operación asincrónica de los servomotores. En este caso, un servo se mueve hacia arriba mientras el otro se mueve hacia abajo, generando una inclinación lateral de la cabeza. Si el servo derecho se eleva y el izquierdo desciende, la cabeza se inclina hacia la izquierda; al invertir los movimientos, la cabeza se inclina hacia la derecha. Esta configuración permite un rango adicional de expresividad, posibilitando que el robot simule movimientos laterales, como girar la cabeza hacia un lado en señal de interés o curiosidad.

Ángulos de operación:

- Ángulo máximo del servo: +49 grados / -43 grados
- Ángulo de operación del pivote: +25 grados / -25 grados

Este rango de operación recomendado asegura que la cabeza del robot se mueva con precisión en el eje deseado, ya sea inclinándose hacia adelante y atrás o de forma lateral.

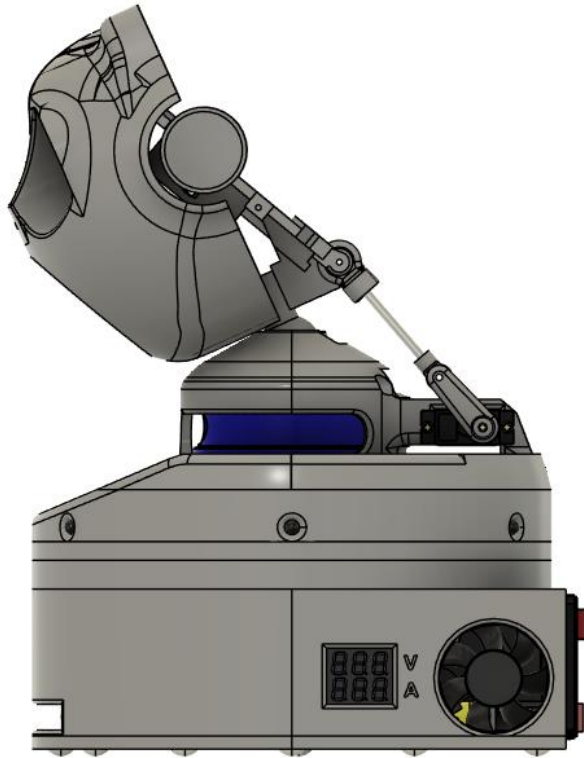


Figura 8 Inclinación de 49 grados del servo y 25 grados de pivote

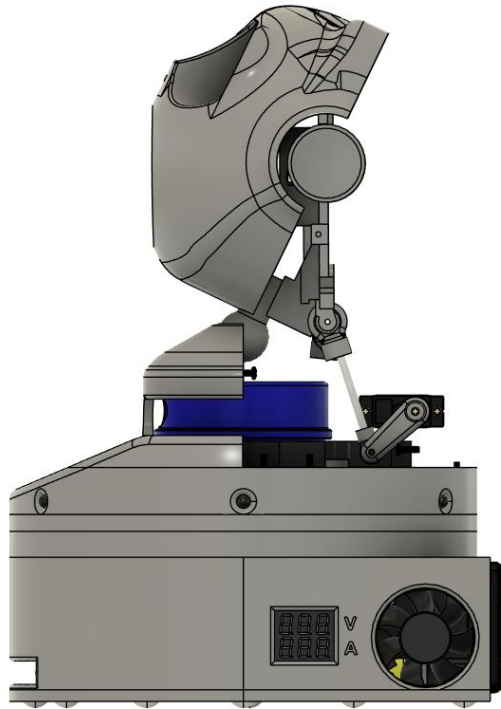


Figura 9 Inclinación de -43 grados del servo y -25 grados de pivote

3. Mecanismo de sujeción y ensamblaje

3.1 Sujeción con tornillos

En el diseño del robot se ha optado por utilizar tornillos como método principal de sujeción debido a su fiabilidad, resistencia y facilidad de montaje, esto asegura que tanto las partes estáticas como las giratorias puedan ensamblarse de manera segura, proporcionando estabilidad y durabilidad a lo largo del tiempo. El uso de tornillos resulta efectivo para piezas impresas en PETG ya que este material ofrece una buena resistencia mecánica, pero puede verse comprometido en aplicaciones donde las fuerzas de torsión repetitivas generan desgaste en las roscas internas impresas. Para mitigar este riesgo y garantizar un ensamblaje más robusto, se recomienda la incorporación de insertos roscados en las zonas de fijación.

La integración de insertos roscados presenta varias ventajas; En primer lugar, aumentan la durabilidad del ensamblaje, ya que los insertos metálicos distribuyen mejor la carga de los tornillos, reduciendo el estrés localizado en el material PETG y prolongando la vida útil de las piezas ensambladas. Además, mejoran la resistencia al desgaste, puesto que las roscas impresas en 3D pueden deteriorarse más fácilmente con el tiempo, especialmente si el desmontaje y montaje son frecuentes, los insertos roscados eliminan este problema al ofrecer una superficie resistente y permanente para los tornillos. Otro beneficio es que proporcionan un ajuste más preciso y estable, reduciendo el riesgo de holguras o desalineaciones en las uniones. Por último, el PETG tolera bien las temperaturas necesarias para instalar

insertos roscados por calor, permitiendo una integración segura y eficiente. Para la implementación efectiva de los insertos roscados, se recomienda utilizar insertos diseñados para instalación por calor, dado que son compatibles con el PETG y permiten una fijación sólida. Es aconsejable instalarlos en todas las zonas de ensamblaje que requieran tornillos, particularmente en las conexiones de piezas móviles o puntos de alto esfuerzo mecánico.

3.2 Sujeción base media

El diseño de la base media del robot incorpora un snapfit anular cuya funcionalidad es proporcionar una unión temporal suficientemente robusta para no interferir con el funcionamiento del robot, pero que permite el acceso al interior cuando sea necesario. Este mecanismo de encaje facilita el ensamblaje y desensamblaje de las partes, asegurando al mismo tiempo que las bases puedan rotar libremente sin generar rozamientos excesivos. La unión consiste en dos bases cilíndricas donde la base superior actúa como la sección "hembra" y la base inferior como la sección "macho". La geometría del snapfit utiliza un perfil triangular con una base de 4 mm y una altura de 2 mm en cada sección. Se estableció una holgura de 0.2 mm entre las bases para facilitar el encaje y permitir la rotación sin fricción indebida. El espesor de pared varía entre 5 mm y 8.2 mm, equilibrando rigidez estructural y flexibilidad para la deformación durante el ensamblaje. La sección superior incluye un undercut de 1 mm que mejora la retención entre las bases, y el resalte de la sección inferior cubre el 50% de la circunferencia, dividido en secciones opuestas, lo que reduce la fuerza requerida para el ensamblaje y asegura una fuerza de retención equilibrada. El material seleccionado para la fabricación es PETG, cuyas propiedades mecánicas se optimizan en este diseño. Su flexibilidad moderada permite una ligera deformación elástica durante el ensamblaje y asegura el retorno a la forma original tras el encaje. La resistencia al desgaste del PETG garantiza la durabilidad del snapfit, especialmente considerando la rotación entre las bases. Además, su facilidad de impresión 3D y estabilidad dimensional son esenciales para respetar las tolerancias y holguras especificadas. En conclusión, el snapfit anular diseñado en la base media cumple con los requerimientos de funcionalidad, dimensiones y material, asegurando una unión temporal robusta que facilita el acceso interno sin comprometer el funcionamiento del robot. Este diseño optimiza las propiedades mecánicas del PETG para aplicaciones con interacciones móviles, garantizando un desempeño confiable y una larga vida útil del sistema.

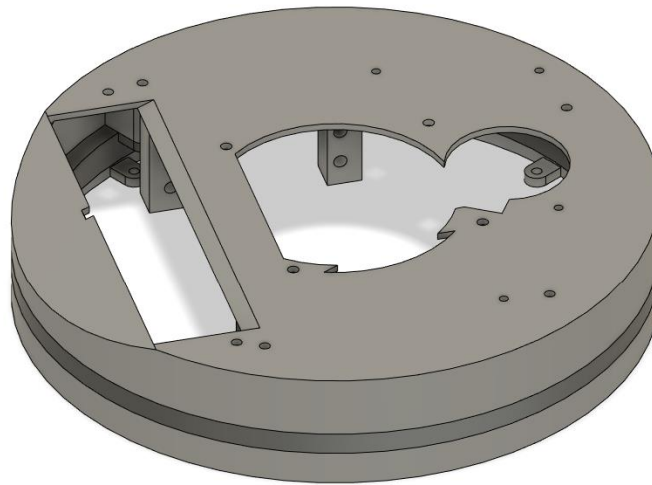


Figura 10 Ensamble de la base media

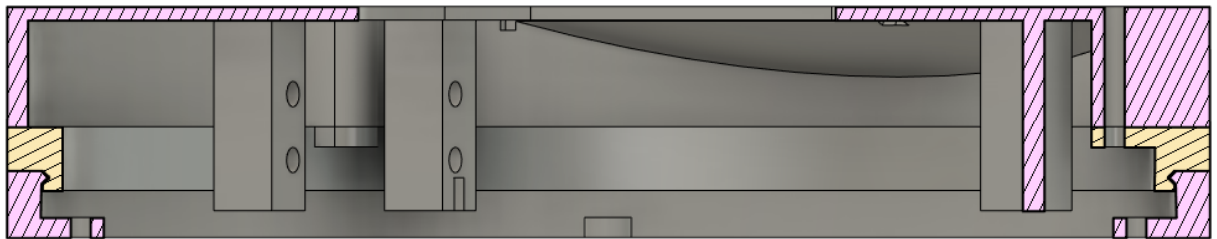


Figura 11 Vista transversal de la base media

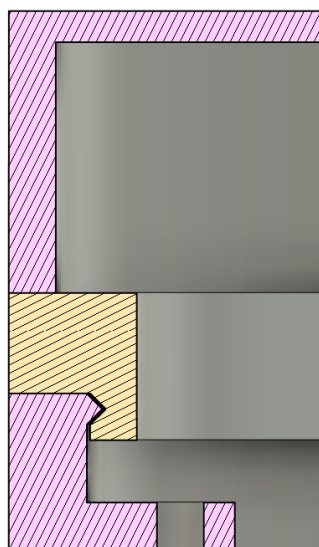


Figura 12 Vista transversal: Enfoque en mecanismo de sujeción

4. Impresión 3D y materiales

4.1 Evaluación de imprimibilidad

La estructura general del robot, que incluye la carcasa, la base, los soportes y los componentes de movimiento, ha sido diseñada para su fabricación mediante impresión 3D. Durante el proceso de selección de materiales, se evaluaron diferentes alternativas para determinar cuál ofrecería el mejor equilibrio entre resistencia, durabilidad, flexibilidad y facilidad de impresión. Esto es fundamental, ya que el diseño exige que el material soporte tanto las cargas estáticas de la estructura como los movimientos dinámicos del robot.

Se consideraron materiales como PLA (Ácido Poliláctico), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y Nylon. El PLA presenta ventajas como facilidad de impresión, buena adhesión a la cama de impresión y ofrece una rigidez y resolución de detalle adecuadas. Sin embargo, es frágil y menos resistente al calor y al impacto, por lo que no es adecuado para aplicaciones que requieren absorción de impactos o alta resistencia mecánica. Además, la estructura del robot podría volverse quebradiza con el tiempo, especialmente en ambientes húmedos o bajo estrés mecánico repetitivo. El ABS es más duradero y resistente a impactos que el PLA, y puede soportar temperaturas más altas, lo que le confiere una mayor durabilidad en aplicaciones exigentes. No obstante, requiere condiciones de impresión controladas, como una cama y cámara calefactadas, para evitar la deformación o "warping", lo que hace que su impresión sea más desafiante, adicionalmente, emite vapores que pueden ser irritantes y potencialmente dañinos sin una ventilación adecuada, lo que lo hace menos ideal para espacios de trabajo cerrados. El Nylon es extremadamente fuerte, flexible y resistente al desgaste, siendo ideal para piezas de alta tensión. Sin embargo, su impresión es compleja debido a su tendencia a absorber humedad, lo cual puede afectar la calidad de la impresión si no se almacena adecuadamente. También requiere temperaturas de impresión más altas y una cama calefactada, lo que lo hace menos accesible para impresoras de gama estándar.

Tras evaluar estas opciones, se seleccionó el PETG como material base para la impresión de la estructura del robot, debido a sus propiedades mecánicas equilibradas y su facilidad de impresión. El PETG combina la rigidez del PLA con la flexibilidad del ABS, lo que lo hace menos frágil y más resistente a impactos y vibraciones. Esto es especialmente importante para un robot, donde las piezas móviles y la estructura deben soportar tanto fuerzas externas como el desgaste del movimiento repetitivo. Además, el PETG es resistente a la humedad, a diferencia del PLA, lo que ayuda a preservar la integridad del robot en diversas condiciones ambientales, especialmente en aplicaciones a largo plazo, su facilidad de impresión es otra ventaja significativa, ya que se imprime sin el riesgo de deformación observado en materiales como el ABS y no requiere una cámara cerrada ni ventilación especial. Esto permite obtener piezas precisas con una buena adherencia entre capas, esencial para componentes estructurales.

El PETG también presenta una fuerte unión entre capas, proporcionando resistencia en la dirección de la impresión y minimizando las posibilidades de delaminación. Esto asegura que el robot mantenga su

robustez en aplicaciones de uso prolongado. En conclusión, el PETG fue elegido como material base para todas las piezas del robot debido a su capacidad para soportar cargas y movimientos sin comprometer la estabilidad estructural, proporcionando la mejor combinación de resistencia, flexibilidad y facilidad de impresión para las necesidades del diseño.

4.2 Parámetros de impresión

Para asegurar la calidad y precisión de las piezas impresas, se definieron parámetros específicos de impresión en el software BambuStudio, ajustando los valores según las necesidades de cada componente. A continuación, se detallan los parámetros establecidos:

- Altura de capa:
 - Piezas estándar: 0.16 mm
 - Piezas más pequeñas: 0.08 mm (para mejorar los detalles y precisión)
- Porcentaje de relleno: 15%

Se utilizó un relleno al 15% para equilibrar la rigidez de las piezas sin aumentar excesivamente el tiempo y el material de impresión.
- Tipo de relleno: Gyroid

Este tipo de relleno proporciona una estructura interna robusta y uniforme, adecuada para soportar las cargas de uso y proteger la integridad de las piezas.
- Velocidad de impresión: 80 mm/s

Una velocidad adecuada para PETG que permite mantener una buena adherencia entre capas y reducir el riesgo de deformaciones durante el proceso de impresión.
- Temperatura de boquilla: 230°C - 250°C

Este rango de temperatura asegura una fusión adecuada del PETG, mejorando la adhesión y la resistencia de la pieza.
- Temperatura de cama: 70°C

Una cama a esta temperatura ayuda a mantener la adherencia de la pieza durante la impresión, evitando que se despegue y garantizando una base sólida.
- Soporte de impresión:
 - Tipo de soporte: "Tree"
 - Densidad del soporte: 15-20%

Se utilizó soporte tipo "Tree" para facilitar el desprendimiento posterior y reducir el material residual. Esta densidad permite un buen soporte sin sobrecargar la impresión.

Estos parámetros fueron ajustados para optimizar la calidad de las piezas y asegurar que cada componente cumpla con los estándares de diseño y funcionalidad. En particular, el ajuste de la altura de capa para las piezas más pequeñas garantiza un acabado fino y detallado, mientras que la

configuración de los soportes asegura la estabilidad durante la impresión y facilidad de retirada posterior.

5. Planos mecánicos

5.1 Planos detallados

Archivos anexados / enviados directos al cliente

Bibliografía

Mit.edu.[En línea]. Disponible en: https://fab.cba.mit.edu/classes/S62.12/people/vernelle.noel/Plastic_Snap_fit_design.pdf.

“Modelling and 3d-printing of bevel gear”, Ijsrem.com. [En línea]. Disponible en: <https://ijsrem.com/download/modelling-and-3d-printing-of-bevel-gear/>.

M. Kopar y A. R. Yildiz, “Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique”, Mater. Test., vol. 65, núm. 12, pp. 1795–1804, 2023.

S. L. Rodríguez-Reyna, C. Mata, J. H. Díaz-Aguilera, H. R. Acevedo-Parra, y F. Tapia, “Mechanical properties optimization for PLA, ABS and Nylon + CF manufactured by 3D FDM printing”, Mater. Today Commun., vol. 33, núm. 104774, p. 104774, 2022.

Anexos