

Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



Mejoramiento direccional de la plataforma base y
cableado eléctrico del robot humanoide

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el
título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado
académico de Licenciatura

Luis Adolfo Gutiérrez Gazo

Cartago 16 de junio, 2017

Declaro que el presente documento de tesis ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos y resultados experimentales propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de tesis realizado y por el contenido del presente documento.

Luis Adolfo Gutiérrez Gazo

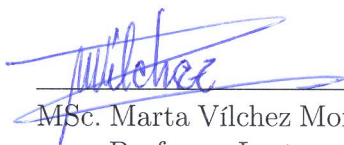
Cartago 16 de junio, 2017

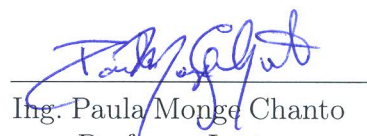
Ced. 5-0379-0989

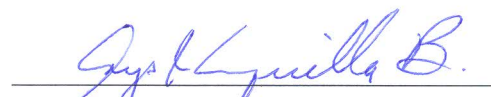
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal


MSc. Marta Vilchez Monge
Profesora Lectora


Ing. Paula Monge Chanto
Profesora Lectora


Ing. Arys Carrasquilla Batista, M.C.
Profesora asesora

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Cartago 16 de junio, 2017

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a Dios por ofrecerme salud, bienestar y felicidad que me brinda en cada momento de mi vida, además de la oportunidad de contar con la ayuda de mi familia, el cual han sido un soporte y compañía durante todo el proceso educativo.

A mi padre y madre por ser los pilares fundamentales en toda mi vida, además del apoyo incondicional que se ha mantenido a través del tiempo.

Gracias por todo.

Agradecimiento

El resultado de este trabajo no hubiese sido posible sin la ayuda brindada por mi profesora asesora Ing. Arys Carrasquilla Batista, por la paciencia, dedicación y criterio profesional que brindó a lo largo de este proyecto, también a mis profesoras lectoras, MSc. Marta Vílchez Monge y la Ing. Paula Monge Chanto, por las recomendaciones propuestas a lo largo de este periodo.

Además, gracias al Dr. Federico Ruiz Ugalde por la confianza, apoyo y recomendación profesional que me ofreció, para hacer posible la fiscalización de esta tesis.

Finalmente proporciono mi gratitud a colegas y amigos que me ofrecieron tiempo e información para lograr cumplir con mis objetivos.

Ha sido un privilegio para mi persona contar con la ayuda brindada de cada una de estas personas.

Mis más sinceras gracias.

Estudiante: Luis Adolfo Gutiérrez Gazo
Cartago 16 de junio, 2017

Índice general

Nomenclatura	XI
Resumen	XII
Abstract	XIII
1. Introducción	1
1.1. Objetivos	2
1.1.1. Objetivo general	2
1.1.2. Objetivos específicos	2
2. Marco teórico	3
2.1. Introducción	3
2.2. Robot humanoide	4
2.2.1. Cabeza del robot	6
2.2.2. Torso robótico	8
2.2.3. Brazos del robot humanoide	8
2.2.4. Base omnidireccional	9
2.2.5. Ruedas Mecanum	10
2.3. Tipos de esfuerzos en el diseño	11
2.3.1. Energía de la distorsión	12
2.3.2. Factor de seguridad	13
3. Sistema mecánico	14
3.1. Descripción de la base del robot	14
3.2. Elementos y características de la base	16
3.3. Análisis cuantitativo y cualitativo	18
3.4. Tipos de materiales usados para la fabricación de las piezas	21
3.4.1. Acero AISI 4140 bonificado	21
3.4.2. Aluminio	22
3.5. Rodamientos	23
3.5.1. Cojinete de bola o radial	23

3.5.2. Cojinete de aguja	24
4. Sistema eléctrico	26
4.1. Sistema de alimentación	26
4.1.1. Baterías de ciclo profundo	26
4.2. Consumo de energía eléctrica	27
4.2.1. Torso del robot	27
4.2.2. Base del robot	28
4.3. Cable eléctrico	29
4.3.1. Distribución del cableado	30
4.3.2. Canaletas ranuradas	30
5. Resultados y análisis	32
5.1. Cambios en los diseños y elaboración de una nueva pieza	32
5.2. Piezas modificadas	33
5.2.1. Pieza 1: eje	33
5.2.2. Pieza 2: agarre del armazón	34
5.2.3. Pieza 3: tapa	35
5.3. Conjunto mecánico	37
5.3.1. Esfuerzo de Von Misses	38
5.3.2. Esfuerzos principales en el material	40
5.3.3. Deflexión	42
5.3.4. Factor de seguridad obtenido por el modelado	43
5.3.5. Ensamble del diseño a la base del robot humanoide	44
5.4. Cableado eléctrico	45
6. Conclusiones	47
6.1. Recomendaciones	48
Bibliografía	50
A.	51
B.	57

Índice de figuras

2.1. Robot ASIMO[1].	5
2.2. Robot HRP-2, HRP-3, HRP-4 [2].	6
2.3. Robot Kismet [3].	7
2.4. Brazo robotizado de peso liviano (lightweight) [4].	9
2.5. Base omnidireccional elaborada en ARCOS-Lab[5].	10
2.6. Rueda Mecanum utilizadas en el robot.	11
2.7. Estado de esfuerzos en un punto[6].	12
2.8. Energía de la distorsión[7].	13
3.1. Base del robot diseño de ARCOS-Lab.	15
3.2. Perfil empleado para el diseño de la estructura del robot.	16
3.3. Pieza1,eje	20
3.4. Agarre de armazón.	21
3.5. Cojinete de bola o radial.	24
3.6. Cojinete de aguja.	25
4.1. Brazo y mano robótica.	28
4.2. Cables eléctricos desorganizados.	30
4.3. Canaleta ranurada de PVC.	31
5.1. Nuevo diseño de la pieza 1, eje.	34
5.2. Nuevo diseño de la pieza 2, agarre de armazón.	35
5.3. Pieza 3, tapa.	36
5.4. Conjunto mecánico.	38
5.5. Esfuerzo máximo y mínimo de Von Misses.	39
5.6. Primer esfuerzo principal.	40
5.7. Tercer esfuerzo principal.	41
5.8. Deflexión del conjunto.	42
5.9. Factor de seguridad.	43
5.10. Ensamble del diseño a la base del robot.	44
5.11. Calibre de cable eléctrico[8].	46
A.1. Pieza 1, eje.	51

A.2. Pieza 2, agarre de armazón.	52
A.3. Pieza 1, eje.	53
A.4. Pieza 2, agarre de armazón.	54
A.5. Pieza 3, tapa.	55
A.6. Ensamble.	56
B.1. Propiedades del acero 4140 bonificado.	57
B.2. Configuración del software inventor con las especificaciones de los materiales.	58
B.3. Catálogo de los rodamientos de bolas o radiales SKF.	59
B.5. Catálogo de los rodamientos de agujas SKF.	60

Índice de tablas

4.1. Consumo de energía en el torso [9].	27
4.2. Consumo de energía en la base [10].	29
5.1. Ventajas y desventajas de los cambios realizados, además de la descripción positiva y negativa del nuevo modelo, pieza 3.	37
5.2. Especificaciones generales	37
5.3. Resumen de los datos obtenidos referente a los esfuerzos.	44
5.4. Potencia total de cada componente.	45

Nomenclatura

- TEC:** Tecnológico de Costa Rica.
- ARCOS-Lab:** Laboratorio de robots autónomos y sistemas cognitivos (*Autonomous Robots and Cognitive Systems Laboratory*).
- Mecanum:** Tipos de ruedas que pueden desplazarse en cualquier dirección.
- HD:** Alta Defición (*High Definition*).
- CAD:** Diseño asistido por computadora (*Computer-aided design*).
- ASIMO:** Robot humanoide creado por Honda en el 2000.
- HRP-2:** Robot humanoide Japones.
- RGB:** Siglas en inglés que se refieren a red, green, blue.
- RMS:** Media cuadrática(*Root mean square deviation*).
- LWR:** Brazo robótico (*Lightweight robot*).
- KUKA:** Líder mundial en el suministro de robótica y tecnología de instalaciones y sistema, Alemana.
- GDL:** Grados de libertad.
- VCD:** Voltaje en corriente directa.
- VCA:** Voltaje en corriente alterna.
- FequVM:** Esfuerzo equivalente de Von Mises.
- Γ :** Esfuerzo.
- Fs:** Factor de seguridad.
- PWM:** Modulación por ancho de pulsos (*pulse-width modulation*).

Resumen

Con el paso del tiempo nuevas tecnologías han surgido, permitiendo que muchas tareas realizadas por medio de los robots sean más eficientes y seguras para las personas.

El proyecto fue realizado en la Universidad de Costa Rica, específicamente en el laboratorio de ARCOS-Lab de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, en donde el grupo de investigación construyen un robot humanoide que pueda realizar a futuro actividades cotidianas en un entorno habitacional y empresarial.

La base del robot humanoide presenta problemas de inestabilidad al desplazarse en superficies irregulares, por lo tanto, esta tesis plantea y elabora una solución por medio de un diseño mecánico que se ensambla a la base. Además, se realizó un estudio de las variables eléctricas relacionadas con el consumo total de energía del robot humanoide para determinar la características y especificaciones técnicas del cableado requerido para el sistema.

El análisis para la implementación de este sistema electromecánico se dio con base al software de CAD 3D Autodesk Inventor, realizando un estudio de esfuerzos y deflexión, de acuerdo a las cargas en cada pieza. El resultado obtenido es un sistema que se adiciona a los distintos elementos que constituye al robot humanoide en su totalidad.

El estudio cuantitativo y cualitativo, ofreció resultados que comprueban el funcionamiento electromecánico con base a lo esperado en este proyecto. Finalmente, el objetivo general se cumplió con respecto las expectativas de un diseño electromecánico propuesto obteniendo un 90 % entre lo simulado y lo teórico.

Palabras claves: Robótica, sistema electromecánico, diseño, deflexión, esfuerzos, factor de seguridad.

Abstract

Over time new technologies have emerged, allowing many tasks performed by robots to be more efficient and safer for people.

This project was carried out at the Universidad de Costa Rica, specifically in the ARCOS-Lab laboratory of the Faculty Electrical Engineering, where the research group develops a humanoid robot that can perform daily activities in a residential and business environment .

The base of the humanoid robot presents problems of instability when moving on uneven surfaces, therefore, this thesis raises and elaborates a solution by means of a mechanical design that is assembled to the base. In addition, a study of the electrical variables related to the total energy consumption of the humanoid robot was carried out to determine the characteristics and technical specifications of the wiring required for the system.

The analysis for the implementation of this electromechanical system was based on Autodesk Inventor 3D CAD software, performing a stress and deflection study, according to the loads in each piece. The result obtained is a system that is added to the different elements that constitute the humanoid robot in its entirety.

The quantitative and qualitative study offered results that verify the electromechanical performance based on what was expected in this project. Finally, the general objective was met with respect to the expectations of a proposed electromechanical design obtaining 90 % between the simulated and theoretical.

Keywords: Robotics, electromechanical system, design, deflection, stress, security factor.

Capítulo 1

Introducción

El hombre constantemente ha buscado desarrollar robots autónomos cada vez con mayor capacidad de procesamiento, que le permita llevar una vida más tranquila y segura [10].

En la Universidad de Costa Rica (UCR), específicamente en el Laboratorio de Robots Autónomos y Sistemas Cognitivos (ARCOS-Lab), se está elaborando un robot humanoide con capacidades parecidas a los humanos para desarrollar tareas cotidianas en cualquier empresa, institución académica o inclusive en el hogar.

El robot está integrado por un conjunto de partes que son elaboradas en forma paralelas, las cuales tienen que colocarse y ponerse a prueba con la intención de observar el funcionamiento del sistema completo. Para lograr el cumplimiento del objetivo común, fue necesario el desarrollo de una serie de procesos coordinados entre las personas involucradas en la construcción.

Específicamente, uno de los subconjuntos que se pusieron a prueba fue el balanceo en distintas superficies, siendo este el centro de estudio en este documento, junto con el sistema de alimentación eléctrico. Al momento de colocarlo en funcionamiento se presentaron problemas con respecto a la inestabilidad que mostraba el robot al desplazarse. Esto se debió a que las ruedas no hacían contacto con ciertas superficies donde se trasladaban, por lo tanto, este documento ofrece una solución satisfactoria a este inconveniente, junto con cálculos y características sobre el cableado eléctrico.

Las pruebas son minuciosas, con la intención de descartar posibles errores de diseño, que perjudiquen en cualquier momento al robot.

Así mismo, el presente documento ha sido elaborado con el propósito de ofrecer un conocimiento general de los sistemas automatizados, especialmente en los robots que emplean funciones semejantes a las humanas. Parte de la introducción a los robots se presenta en el marco teórico, capítulo 2.

Seguidamente se presenta dos secciones de gran interés como el capítulo 3, sobre el diseño del sistema mecánico y el capítulo 4 sobre el estudio del cableado eléctrico en la base del robot, en donde se evidencia el aporte realizado.

Posteriormente en el capítulo 5 muestra los resultados obtenidos a lo largo del proyecto sobre el mejoramiento de la base del robot. En esta parte además se realizan los análisis y cálculos respectivos sobre los datos obtenidos tanto el modelado como en la parte eléctrica.

Por último en el capítulo 6, se muestran las conclusiones a las que se llegó, gracias a los resultados obtenidos. En esta parte se explica los problemas obtenidos y como se logra dar una correcta solución satisfactoria de acuerdo al objetivo planteado.

1.1. Objetivos

Con el fin de dar solución al problema, se plantean el siguiente objetivo general conjuntamente con los objetivos específicos:

1.1.1. Objetivo general

- Diseñar un mecanismo que permita la estabilidad en el desplazamiento del robot humanoide en superficies irregulares.

1.1.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema mecánico en la base del robot humanoide que permita el contacto de las ruedas omnidireccionales con la superficie de apoyo.
- Identificar las características eléctricas del cableado en la base del robot.
- Verificar el funcionamiento del sistema electromecánico.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Introducción

El ser humano ha evolucionado a lo largo del tiempo en su búsqueda de tener una vida mucho más cómoda, reduciendo al máximo las posibilidades de peligro eminente o trabajo físico forzado, por lo tanto, han surgido instituciones de interés investigativo alrededor de mundo con la intención de crear ese mundo utópico para los seres humanos, surgiendo con esto las ideas revolucionarias de la robótica que permiten dar respuestas concretas a una serie de cuestionamientos físicos propios de la humanidad.

En la actualidad los investigadores de todo el mundo han estado fascinados por estudiar la posibilidad de interacción entre los robots y su entorno, para ello se han inspirado en la naturaleza, buscando que los mismos tengan autonomía y cualidades similares a los seres humanos [11].

Distintos países del mundo han puesto el interés por participar de forma influyente en la robótica, como por ejemplo Japón, donde surge abundante cantidad de ingenieros calificados. La relación entre la empresa y los trabajadores es extremadamente estrecha. En este país la automatización no supone un despido máximo de trabajadores, ya que se capacita a cada empleado. Actualmente Japón es líder indiscutible en automatización, supone entre un 64 por 100 de los robots existentes en el mundo [12].

Algunos países europeos como es el caso de Alemania o Suecia han estado apostando por las nuevas tecnologías en función de la robótica, pero hay varios países en el mundo que aun la ven con recelo, ya que supondría un despido masivo de trabajadores. [12], pero como se mencionó anteriormente la solución consiste en capacitar a los trabajadores con el fin de evitar que muchas familias se vean afectados por los despidos masivos.

Las sociedades son homogéneas, es decir de un comportamiento social parecido, donde la robótica es un fuerte atractivo, particularmente por que realizan labores que los seres

humanos no queremos hacer por motivos de cansancio o seguridad [12].

En la mayoría del mundo se desarrolla la robótica, cuyas intenciones pueden ser distintas de acuerdo a la ideología de cada país. Se implementa con el propósito de hacer frente a las dificultades del ser humano, por ejemplo, en áreas como la medicina y la industria de trabajo repetitivo.

2.2. Robot humanoide

Un robot humanoide cuyas cualidades son prácticamente humanas es un sistema mecatrónico, cuya funcionalidad se da gracias a la interacción de cada uno de los componentes mecánicos y los elementos como sensores, actuadores, software, entre otros dispositivos [13], es decir, para que sea llamado un robot se necesita de una serie de módulos que interactúan conjuntamente proporcionándole cualidades humanas, como es el caso de una inteligencia artificial limitada por la programación y las especificaciones del lugar donde se desenvuelve.

Numerosos grupos de investigadores centran sus trabajos en los robots, ya que proporcionan al ser humano medios para que el diario vivir sea más fácil, reduciendo la complejidad y la peligrosidad de distintos trabajos.

Pese a la gran evolución tecnológica en lo que se refiere robótica, aún hay estancamientos en las áreas del conocimiento relacionadas con la locomoción humana, el cual sigue siendo un desafío y problema abierto para cada uno de los ingenieros. La flexibilidad, la robustez y la plasticidad son características humanas indispensables para que un robot sea parecido a un humano [14].

Los robots actualmente son utilizados como herramientas científicas de investigación en muchas áreas; esto debido al entendimiento estructural y conocimiento del ser humano. Además son utilizados en campos de entretenimiento (animatrónicos de cine, juguetes) o relaciones públicas[1].

En la figura 2.1 se muestra el Advanced Step in Innovative Mobility (ASIMO2, por sus siglas en ingles), es el robot humanoide más famoso del mundo, fue creado en Japón en el año 2000 por la división de robótica de la empresa Honda.



Figura 2.1: Robot ASIMO[1].

Los robots poseen una serie de partes que los hace parecidos a los seres humanos, como los brazos, el torso, la cabeza y un sistema de locomoción que permite el movimiento de un lugar a otro.

En la Figura 2.2 aparecen el robot HRP-2, sucesor del robot ASIMO de la figura 2.1, el robot HRP-3 que puede emplearse en exteriores ya que está aislado de polvo, humedad y otros agentes del exterior. Estos dos robots están acompañados del prototipo de HRP-4 robot el cual presenta características femeninas y cuyo diseño ha sido presentado en algunas pasarelas de moda en Tokio(Japón) [2].



Figura 2.2: Robot HRP-2, HRP-3, HRP-4 [2].

2.2.1. Cabeza del robot

La construcción de la cabeza de un robot es un desafío de todos los involucrados en la construcción, ya que es una pieza clave, tanto en la estética como en el funcionamiento del robot humanoide.

La comunicación entre el humano y el robot, es mucho más fácil cuando se logra conocer el estado interior del robot, esto se puede conseguir mediante expresiones faciales que solamente los humanos tenemos como, por ejemplo, en la cara cuando algo nos gusta, duele o satisface, lo notificamos con un gesto que es recibido por otra persona receptora del mensaje. En la figura 2.3 se puede observar el robot KISMET [3], el cual es un claro ejemplo de la cabeza en un robot humanoide.



Figura 2.3: Robot Kismet [3].

La cabeza del robot diseñado en ARCOS-Lab, posee cualidades humanas como es el caso de percibir el ambiente que los rodea, a través de uno de sus sentidos más importantes como es el de la visión, el cual analiza por medio de su algoritmo programado previamente la forma, tamaño, color del objeto, entre otras características importantes.

Algunos elementos que forman parte de la cabeza y proporciona características humanas al robot son:

- **Kinect:** Los Kinect son un sistema de gran complejidad y de mucha utilidad en la robótica, ya que permite la interacción del robot con su entorno. Este sensor contiene la capacidad de reconocer los colores RGB (red, green and blue) y además contiene un sensor que reconoce la profundidad que se encuentra un objeto.

Generalmente contienen una alta precisión que va desde el orden de los 2% al 3%, a una distancia aproximada de 4 metros del sensor, cuyo error de aritmética (RMS) es del orden de los 10 centímetros. El nivel de precisión en la mayoría de los robots es adecuado, pero es inconvenientes en ocasiones específicas, por ejemplo, en la navegación y la manipulación fina con instrumentos quirúrgicos [15].

- **Cámara térmica:** Una cámara térmica es un dispositivo con la capacidad de detectar la radiación térmica del exterior y posteriormente ser traducida en un valor de imagen por calor[16], por lo tanto, en el robot humanoide proporciona

detalles de objetos a diferentes grados de temperatura.

- **Cámara HD (Alta definición):** Este tipo de cámara permite una visión más completa, facilitando el reconocimiento de objetos a cierta distancia y apreciar características únicas. Esta cámara le ayudara al robot reconocer el entorno que lo rodea.

2.2.2. Torso robótico

El robot contiene un torso que le proporciona cualidades humanas y parecido, cuya función es lograr un mayor alcance con los objetos que se desea manipular, además que le proporcione un espacio para la colocación de los brazos robóticos, el sistema de alimentación con las baterías y la cabeza inteligente.

Para el diseño del torso se necesitó de una serie de análisis cuantitativos antes de comenzar a construirlo y ensamblar cada una de las piezas. El material para su fabricación debió ser lo más liviano posible, en este caso perfiles rectangulares de aluminio.

2.2.3. Brazos del robot humanoide

Los brazos robotizados de peso liviano (lightweight) son elaborados conjuntamente por KUKA y el Instituto de Robótica y Mecatrónica del Centro Aeroespacial de Alemania. La idea de desarrollar este tipo de brazo robótico, surgió con la propuesta de romper la barrera existente entre los seres humanos, de manera que ambos compartieran un mismo ambiente de trabajo sin que surgiera peligro eminente. Un verdadero impulso llegó a comienzo del año 1993 con la misión espacial ROTEX. El control del brazo era realizado de forma teledirigida desde la tierra y la nave espacial. El mismo tenía el propósito de recolectar objetos que flotaran en el espacio exterior.

El brazo robotizado de peso liviano diseñado por KUKA posee 7 grados de libertad(GDL) lo que permite un movimiento similar al del brazo humano. Distintos elementos lo hacen posible como la electrónica, los sensores, la alimentación de cada elemento, entre otras cosas[4].

En la figura 2.4 muestra el brazo, además de las 3 partes más importante que lo compone, junto con una descripción.

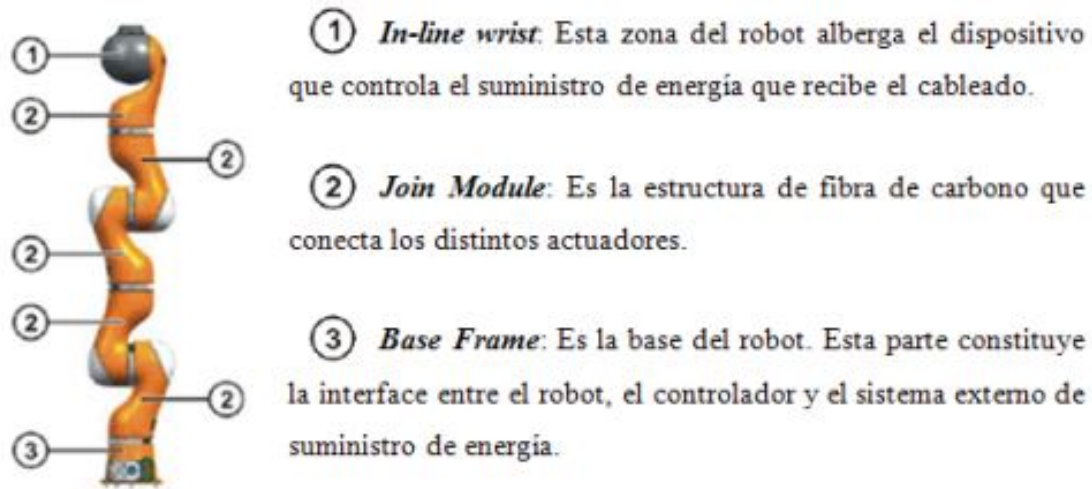


Figura 2.4: Brazo robotizado de peso liviano (lightweight) [4].

2.2.4. Base omnidireccional

El uso de la robótica ha sido de gran influencia en los últimos años. A la fecha han surgido distintos robots móviles con sistemas muy avanzados de tracción, los cuales son calificados en tres distintas categorías: Propulsión mediante las ruedas, las ruedas rodantes y los robots caminantes con sus extremidades.

En lo que respecta el sistema de locomoción han surgido distintas variantes que van a depender del ambiente y la aplicación. [17]. El robot humanoide requiere de un sistema en su base principal que le permita el desplazamiento de un lugar a otro, manteniendo la estabilidad en todo momento. El desplazamiento del robot es por medio de las ruedas Mecanum que le proporcionan un mejor contacto con la superficie. La figura 2.5 muestra la base omnidireccional elaborada en ARCOS-Lab.



Figura 2.5: Base omnidireccional elaborada en ARCOS-Lab[5].

Se definen como robots omnidireccionales aquellos que cuentan con movilidad en cualquier dirección en su desplazamiento, desde un punto al azar en un plano dimensional sin tener que hacer un movimiento previo al comenzar a moverse. La condición de omnidireccionalidad se debe a que las ruedas brindan al robot tres grados de libertad en el plano que son de suma importancia[17].

2.2.5. Ruedas Mecanum

Las ruedas Mecanum le brindan al robot un desplazamiento de un lugar a otro. Estas ruedas le proporcionan movimiento hacia adelante, hacia atrás, de lado y por su puesto de diagonal, son muy versátiles y de gran utilidad para la robótica actual, ya que al trasladarse le permite ir en diferentes direcciones evitando los obstáculos presentes en la trayectoria. La figura 2.6 muestran las ruedas Mecanum.



Figura 2.6: Rueda Mecanum utilizadas en el robot.

La configuración omnidireccional permite una maniobrabilidad completa en el sistema mecánico, haciendo que el robot humanoide sea capaz de moverse en cualquier dirección, por esta razón posee tres grados de libertad[18].

2.3. Tipos de esfuerzos en el diseño

En los conjuntos mecánicos, cada elemento debe soportar su propio peso, además de las cargas exteriores que tiene influencia sobre el conjunto. Dependiendo como se coloque la estructura y el peso a la que estará sometida, así será la magnitud del esfuerzo actuando sobre el mecanismo.

Una de las labores más importante referente a mecánica es determinar los esfuerzos que influyen en el sistema. Estos esfuerzos son arbitrarios las cuales están sujeto al mecanismo, si se logran calcular, es posible determinar en qué condiciones el material puede soportar los esfuerzos aplicados.

Esta determinación involucra una serie de teorías de fallas, tanto para materiales dúctiles como para materiales frágiles. El estado de esfuerzo en un punto P, representa los esfuerzos a los que está sometido en tres planos, que son perpendiculares al mismo. El estado de esfuerzo en el punto P está representado por un cubo, como el que se muestra en la figura 2.7[6].

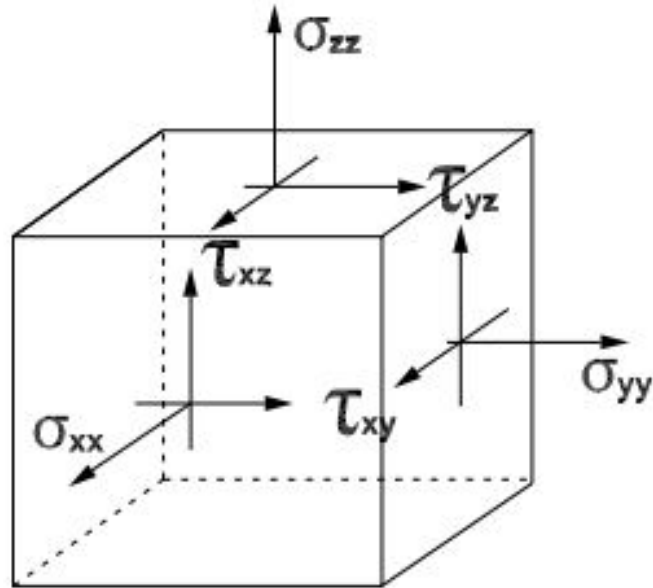


Figura 2.7: Estado de esfuerzos en un punto[6].

2.3.1. Energía de la distorsión

La energía de la distorsión fue propuesta por Von Mises al observar que distintos materiales bajo un esfuerzo hidrostático aplicados soportaban mayores esfuerzos de fluencia comparados con otras cargas. De acuerdo a Von Mises se especifica que:

“La falla se producirá cuando la energía de distorsión por unidad de volumen debida a los esfuerzos máximos absolutos en el punto crítico sea igual o mayor a la energía de distorsión por unidad de volumen de una probeta en el ensayo de tensión en el momento de producirse la fluencia”[7].

La teoría implementada por Von Mises dice que la distorsión de cualquier elemento es por las fuerzas principales las cuales habrá que restarle los esfuerzos hidrostáticos. Por lo tanto, la energía de la distorsión es la diferencia entre la energía total de deformación por unidad de volumen y la energía de deformación por unidad de volumen debida a los esfuerzos hidrostáticos. Ver figura 2.8[7].

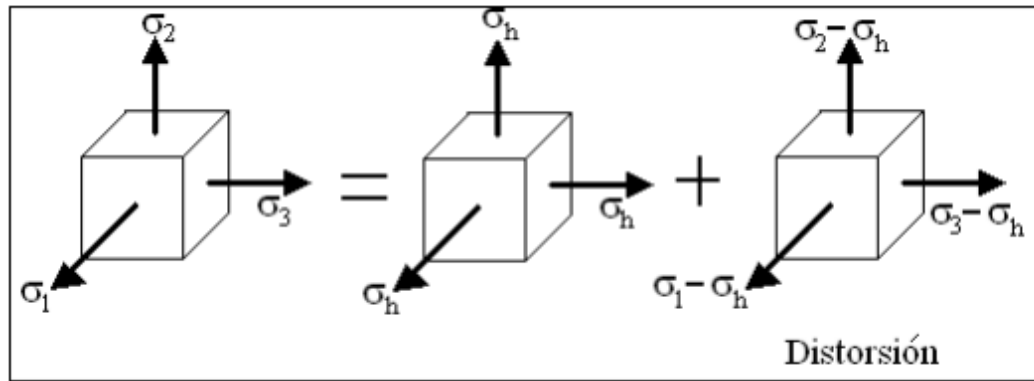


Figura 2.8: Energía de la distorsión[7].

En la ecuación 2.1 se define el esfuerzo de Von Mises como:

$$F_{\text{equVM}} = \sqrt{\frac{(\Gamma_1 - \Gamma_2)^2 + (\Gamma_2 - \Gamma_3)^2 + (\Gamma_1 - \Gamma_3)^2}{2}} \quad (2.1)$$

2.3.2. Factor de seguridad

El factor de seguridad permite conocer que tan bueno es el diseño con determinado material.

Para determinar que un elemento del mecanismo soporta los esfuerzos, este será sometido a las mayores cargas bajo tensión o fluencia; una vez calculado el esfuerzo se compara con el admisible, para saber si resiste.

El factor de seguridad (F_s) es la razón entre la resistencia de pérdida de la función conocido como el esfuerzo admisible (Γ_a) y el esfuerzo calculado o permisible en el material (Γ_c). Esta razón tiene que ser mayor a 1, ya que por debajo es falla inminente en la pieza diseñada[19].

$$F_s = \frac{\Gamma_a}{\Gamma_c} \quad (2.2)$$

Capítulo 3

Diseño del sistema mecánico

El robot humanoide está diseñado por un conjunto de elementos que interactúan entre sí para dar paso al sistema automático completo. Muchas piezas que componen al torso, la base y la cabeza, ya han sido diseñadas con anterioridad por integrantes del laboratorio de robótica, pero aún hay problemas por corregir, siendo de vital importancia los análisis previos generados.

Una de las partes que presentó inconvenientes al momento de realizar las primeras pruebas, fue la base del robot. La base mostró problemas de inestabilidad al desplazarse en ciertas superficies irregulares, esto motivó la idea de implementar un mecanismo que pudiera hacer frente a la dificultad descrita.

A continuación, se hace mención a la base del robot humanoide, desarrollado en el laboratorio a lo largo de una serie de estudios generados por distintas personas involucradas en la construcción.

3.1. Descripción de la base del robot

La base del robot humanoide es la que permite la estabilidad de los demás elementos del conjunto mecánico. Al referirnos al conjunto mecánico, se hace referencia a todas las piezas que se acoplan al robot humanoide. En la figura 3.1, se puede observar cada uno de los componentes de la base, estos elementos son de gran importancia, ya que sin ellos no se logra el cometido el cual es la movilización del robot.

La base tiene una gran cantidad de elementos que interactúan entre sí, como por ejemplo los motores junto con las ruedas omnidireccionales que permiten el traslado del robot de un punto a otro. Esto no fuera posible sin la fuente de alimentación eléctrica como son las 4 baterías de 12 VCD, las cuales se colocan en la parte inferior, en un compartimiento especial diseñado especialmente para las baterías recargarles.



Figura 3.1: Base del robot diseño de ARCOS-Lab.

Al referirse a la base del robot son muchos los mecanismos que se adhiere al sistema para que el robot se mantenga siempre estable. Esta base se construyó de acuerdo a las medidas de la baterías, ancho, largo y altura.

3.2. Elementos y características de la base

Todos los robots son un sistema de gran complejidad, donde distintos mecanismos y elementos eléctricos forman parte de un conjunto. La base es un embrollo matemático de análisis y cálculos que terminaron en un diseño que posteriormente fue ensamblado de acuerdo a las características dimensionales necesarias para colocar las baterías de ciclo profundo y que además pudiera soportar el peso máximo del robot humanoide.

Entre algunas características relevantes de los elementos que está constituida la parte inferior del robot están:

- El robot en su mayoría está construido de un perfil de aluminio ranurado cuyo propósito es reducir al máximo el peso del sistema mecánico. En la figura 3.2 se muestra el perfil de aluminio ranurado con más detalle.

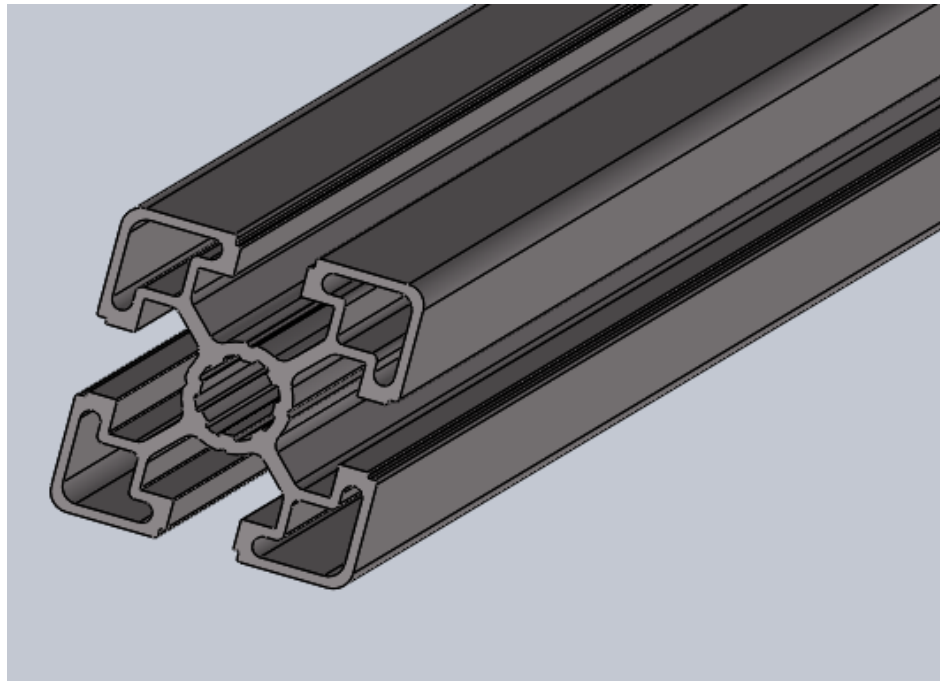


Figura 3.2: Perfil empleado para el diseño de la estructura del robot.

Con respecto a los perfiles de aluminio hay que tener mucho cuidado, cuando se trabaja con cargas elevadas, ya que sus propiedades lo hacen muy liviano, pero a la vez muy flexible ante cualquier esfuerzo superior al admisible, lo que conlleva a un límite de ruptura mucho más bajas con respecto a otros materiales como el acero o el hierro.

El perfil de aluminio de la figura 3.2, presenta las siguientes características que lo hace ideal para la construcción base del robot humanoide:

1. El material es aluminio ranurado, especial para ensamble de sistemas mecánicos. Este tipo de perfil ranurado se obtuvo con la intención de soportar una masa de 210 kg proveniente de la sumatoria de todos los componentes del robot.
 2. Su forma es de sesión rectangular, con un marco estructurado. Esto le permite ser más resistente ante los esfuerzos a los que estará sometido el robot. Observemos también que el perfil presenta pequeñas cavidades con el propósito de reducir al máximo posible su peso, además, su forma estructurada hace posible que las cargas se distribuyan a lo largo del perfil haciéndolo ideal para la elaboración del robot.
 3. Posee un peso ligero. Esta es una de las propiedades físicas más importantes con respecto al aluminio, ya que es muy liviano en comparación a otros materiales. En el robot como se ha mencionado anteriormente está compuesto por un conjunto de elementos que al sumarlos generan una carga muy elevada, por lo tanto, el objetivo de este perfil es reducir al máximo ese peso.
 4. El proceso de fabricación es por extrusión del aluminio con el propósito de obtener el perfil deseado.
- La base contiene 4 baterías de alimentación, las cuales son recargables. Estas baterías son las responsables de ofrecer corriente y voltaje a los 4 motores que contiene la base, en el capítulo 4, sobre sistema eléctrico, se abarcará este tema con más detalle.
 - Cada motor contiene una rueda Mecanum, que le permiten al robot trasladarse de un lado a otro; sus características de desplazamiento son únicas e indispensables.
 - Los motores poseen un sistema de frenos que se controlan de acuerdo a una modulación de ancho de pulso (PWM). El PWM es programado para que cumpla con las funciones lógicas de frenado, de acuerdo a los datos obtenidos del entorno por medio de los sensores.
 - La base contiene cuatro puentes H con sus debidas protecciones de corriente. El propósito de los puentes H es controlar el giro de rotación de cada motor por separado.
 - La base posee un botón de paro inmediato con la intención de detener los motores y la fuente de alimentación eléctrica ante posibles accidentes.

Cada uno de los elementos de la base son requisitos necesarios para que el robot entre en funcionamiento, pero recordemos que este documento solo hace mención a elementos

que forman parte de la base, hay otra gran cantidad de mecanismos tanto eléctricos como mecánicos que poseen las demás divisiones del robot (cabeza y torso).

Para efectuar una mejor comprensión del problema presente en la base, analicemos en síntesis la situación, la cual es la siguiente: el robot humanoide presenta problemas de inestabilidad en ciertas superficies irregulares de traslado, por lo tanto, se procedió a diseñar un mecanismo para corregir esa anomalía presente en el robot.

3.3. Análisis cuantitativo y cualitativo

Para comprender el funcionamiento de la base con respecto a los demás elementos del robot, se necesitó hacer una serie de pruebas, que fueron necesarios para implementar los diseños de cada pieza cumpliendo con el objetivo propuesto.

Para el desarrollo del mecanismo, se procedió a realizar el siguiente análisis cuantitativo y cualitativo con la intención de ofrecer una solución viable:

- Masa total del robot es de 200 ± 10 kg. Esta masa es la total del robot, la cual fue estimada de acuerdo a cada uno de los elementos que posee.
- Hay que recordar que aún no está el robot humanoide ensamblado en su totalidad, por lo tanto, de acuerdo a estimaciones de cada una de sus partes, se obtiene un promedio del peso total.
- La variación de la masa es de aproximadamente ± 10 kg. Este rango propuesto es con la intención de tener un margen de error ante posibles elementos adicionales que sumen peso al robot.

Para realizar el análisis previo se necesita de la máxima masa posible para así obtener los mayores esfuerzos que afecten al material. Por lo tanto, para obtener el peso (w) se debe multiplicar la masa (m) por la aceleración de la gravedad (g), cuyo valor estándar es de $9,80 \text{ m/s}^2$.

En la ecuación 3.1 se observa la relación entre masa y la gravedad con el fin de obtener el peso.

$$w = m * g \tag{3.1}$$

Por lo tanto, el valor del peso (w) es el que se muestra en la ecuación 3.2, el cual es de aproximadamente 2058 N.

$$w = 210Kg * 9,80 \frac{m}{s^2} = 2058N \quad (3.2)$$

El valor de $w=2058$ N es de gran importancia, ya que este número forma parte de todo el análisis de esfuerzos a los que estará sometida las piezas como un conjunto.

- Ya teniendo claro el peso total del sistema, se procede a analizar las especificaciones de diseño y el espacio disponible para colocar las piezas, tanto de aluminio como de acero. Entre las características están:
 1. El ensamble no debe superar los 25,4 mm con el propósito que sea lo más pequeño posible, para así evitar al máximo una deflexión considerada.
 2. Los rodamientos deben acoplarse al material lo más preciso que se pueda con el fin de evitar movimientos indeseados.
 3. El tamaño de los cojinetes deben ser de acuerdo a la disposición de espacio, es decir, que no pueden superar los 25,4 mm, una vez ensamblado con las piezas.
 4. Evitar un sobre-dimensionamiento de las piezas de acuerdo al factor de seguridad (F_s). Este valor debe estar entre un rango considerable de $1 < F_s > 15$, para evitar pérdida de material y aumento del valor económico.
 5. Con el propósito de reducir el valor económico de la pieza maquinada en acero se debe proceder a comprar un perfil de barra redonda de acero, ya que una platina es prácticamente el doble de cara en comparación a la barra, por lo tanto, el diseño se debe ajustar al perfil comprado.
 6. El acero debe ser lo más resistente posible ante la deflexión del material. Esto con el fin de evitar maquinar nuevamente la pieza con otro acero de mayor resistencia a la deformación por esfuerzos.
 7. Al momento de hacer el diseño se debe ser crítico y analítico ante posibles errores de cálculo que se puedan dar por una mala medición, especialmente donde van colocado los cojinetes.

La figura 3.3 y 3.4 se muestra el diseño elaborado en inventor, cuyos planos se pueden observar en el apéndice A, figura A1 y A2 respectivamente.

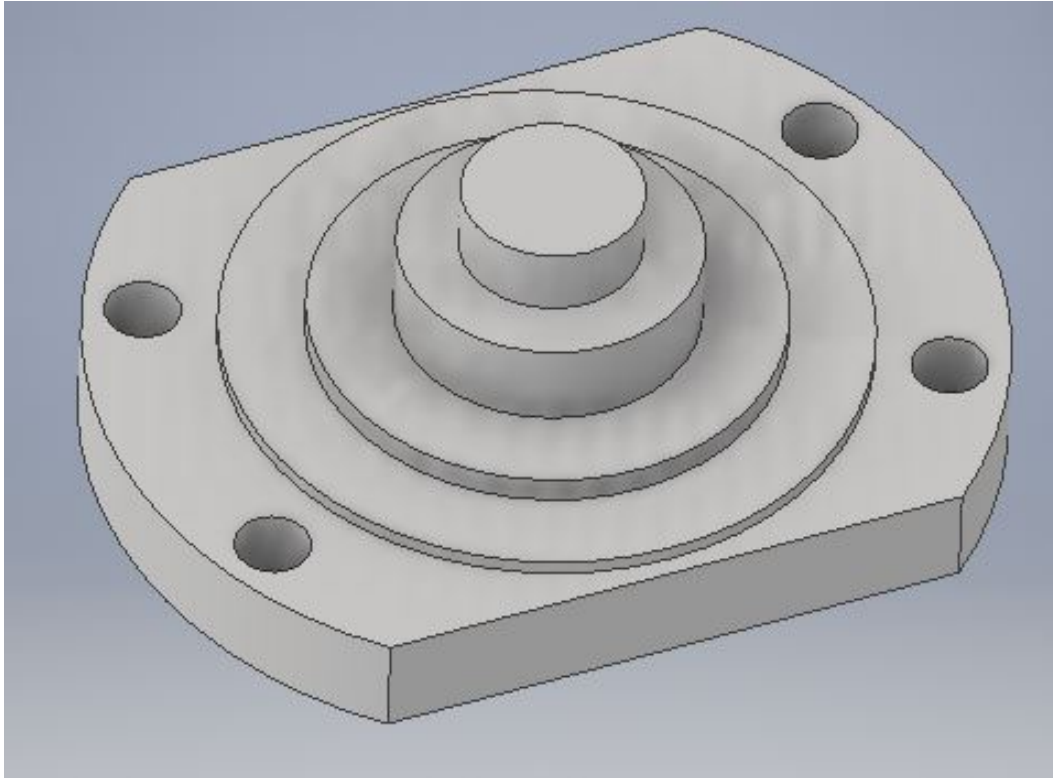


Figura 3.3: Pieza1,eje

La pieza 1 se diseñó con el propósito de soportar el peso de 2058 N, en la parte de resultados del capítulo 5 se muestra el análisis realizado como un conjunto con las demás piezas.

El objetivo de elaborar las piezas de la figura 3.3 y 3.4 es darle una solución al problema de inestabilidad de la base a través de un diseño, que contenga los cojinetes deseados para la rotación y que puedan a la misma vez soportan las cargas axiales y radiales proveniente de todo el robot.

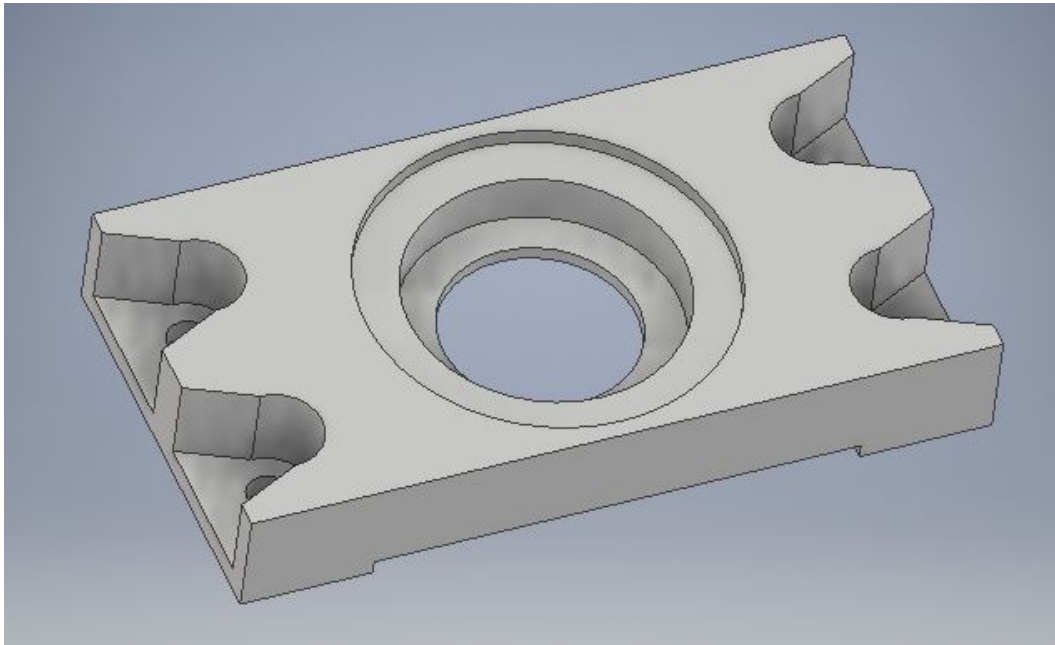


Figura 3.4: Agarre de armazón.

3.4. Tipos de materiales usados para la fabricación de las piezas

Para canalizar una idea de diseño en un producto físico es necesario realizar un análisis exhaustivo, con el fin de obtener una conclusión certera de cómo se verá el producto una vez maquinado. Este estudio necesita de primera instancia saber que propiedades físicas presentan los materiales. A continuación, se hará mención algunas características que presenta el acero y el aluminio:

3.4.1. Acero AISI 4140 bonificado

Características:

- Es un acero aleado, el cual es utilizado donde se requiere alta resistencia a la tracción y muy buenas propiedades a la fatiga. Estas características lo hacen idóneo al material para fabricar la pieza de la figura 3.3, ya que se necesita de una resistencia muy elevada tanto a los esfuerzos como a la fatiga que estará sometido de acuerdo al ciclo de trabajo continuo del robot humanoide.
- Esta elaborado de cromo y molibdeno, que le garantiza una alta penetración

durante el temple del material. Estas propiedades químicas garantizan que sea muy fuerte ante la deformación.

- El material puede ser endurecido mediante flama, inducción y nitruración, no se recomienda soldadura, pero en caso de requerir debe precalentarse aproximadamente a 300° y demás de un material de aporte adecuado para una buena soldadura.

Las características anteriores fueron tomadas de Aceros Vargas S.A, distribuidora costarricense de distintos materiales[20].

La elección de este material se debe a que posee excelentes propiedades de fabricación consiguiendo con esto una alta resistencia a la fatiga y resistencia a la rotura, siendo ideal para elaborar la pieza de la figura 3.3. Las propiedades físicas del material se pueden consultar en el Apéndice B, figura B1.

3.4.2. Aluminio

Características:

- El aluminio es el único metal que proporciona dureza con bajo peso, es sumamente fácil de pulir, tenaz, dúctil y maleable, posee una gran resistencia a la corrosión y alta conductividad térmica y eléctrica, teniendo la mejor relación beneficios - costo que cualquier otro metal común.
- No es tóxico, por lo tanto, posee múltiples aplicaciones en la industria.
- Posee una resistencia a la tensión de 300 Mpa.
- Además posee una resistencia a la flexión de 270 Mpa.

La información anterior referente al aluminio fue tomada de aluminio pfk [21].

La pieza que se elabora con aluminio es la que se presentó en la figura 3.4. La fabricación de esta segunda pieza, se debe a que presenta un esfuerzo reducido en comparación al diseño de la figura 3.3.

La información obtenida del acero AISI 4140 y del aluminio son de vital importancia para realizar el estudio de esfuerzos por medio del software inventor, este análisis se puede observar más adelante en la parte de resultados, capítulo 5.

3.5. Rodamientos

Los rodamientos son elementos que poseen un bajo coeficiente de rozamiento. Es esta la propiedad que hace idóneo a los cojinetes para distintos sistemas que arrancan y paran motores con frecuencia.

Entre las principales características del rodamiento están:

- Requiere poca lubricación.
- El mantenimiento es muy escaso.
- Son silenciosos.
- El tiempo de funcionamiento es limitado.
- Son muy caros.

La información fue tomada de Porras, 2010 [22].

Los rodamientos son normalizados, por lo tanto, para llevar a cabo la elección es únicamente necesario de un catálogo con el propósito de observar los distintos modelos y las dimensiones de los mismos, es decir, no es necesario realizar cálculos referentes a los esfuerzos radiales y axiales que puede soportar los cojinetes.

Para que las piezas una vez maquinadas entren en funcionamiento son necesario los cojinetes para la rotación, con el fin de evitar fricción entre los materiales. En este proyecto se emplean dos tipos de rodamientos los cuales se mencionan a continuación:

3.5.1. Cojinete de bola o radial

Para que las piezas de la figura 3.3 y 3.4 tenga movimiento rotativo al ser ensamblada, se emplea el cojinete radial, figura 3.5.

Las características que debe tener son las siguientes:

- El robot humanoide presenta una masa de 200 ± 10 kg, el cual ejerce un peso máximo de 2058 N en la trayectoria radial con respecto a la ubicación del direccionamiento de la base, por lo tanto, se necesitó de un cojinete que pudiera contrarrestar esa carga.
- Las direcciones axiales de las fuerzas son mínimas con respecto a la radial, esto no quiere decir que sean cero.
- Se debe necesitar un catálogo para elegir el rodamiento que se ajuste a la carga máxima.



Figura 3.5: Cojinete de bola o radial.

De acuerdo al catálogo SKF referente a rodamientos de bola se eligió el siguiente: Designación: 51108. Las características son las que se presenta en el apéndice de la figura B.3.

3.5.2. Cojinete de aguja

La principal función de los cojinetes de aguja es soportar las cargas axiales, pero en este caso son mínimas, ya que el mayor esfuerzo se da en la dirección radial, la cuales son apaciguadas por los rodamientos de bola.

Los cojinetes de aguja ayudan al proceso de rotación de las piezas al momento de ser ensambladas. Este tipo de cojinetes se pueden apreciar en la figura 3.6.



Figura 3.6: Cojinete de aguja.

Las características de tener el rodamiento de aguja son:

- Tiene que ejercer movimiento rotativo al ensamble una vez unida a la base.
- Los cojinetes de agujas son caracterizados por soportar grandes cargas axiales, pero en este caso son muy bajas, por lo tanto, el interés es mas de movimiento de rotación.
- Tratar de ajustarse a lo más posible a las dimensiones del diseño. De no ser posible habrá que modificar el diseño al que más se adapte a las cargas.

De acuerdo al catálogo SKF referente a rodamientos de aguaje se eligió el siguiente: Designación: K65 x 73 x 30, cuyas características son las que se presenta en el apéndice de la figura B5.

Capítulo 4

Sistema eléctrico

La fuente de alimentación eléctrica es importante para todo sistema automatizado. En este caso el robot humanoide es alimentado por medio de baterías recargables de 12 VCD, además posee un interruptor que permite alimentarse de la red eléctrica disponible de acuerdo al lugar donde labore.

A continuación, mencionaremos algunos datos relevantes sobre sistema de alimentación, el cual es indispensable para realizar posteriormente un análisis de la corriente, con la finalidad de saber el cable adecuado en el robot humanoide.

4.1. Sistema de alimentación

El robot humanoide emplea cuatro baterías de ciclo profundo como entrada de alimentación, además se tiene la disponibilidad de alimentarse únicamente de la red eléctrica al conectarse a un toma corriente.

4.1.1. Baterías de ciclo profundo

Entre las características de las baterías están:

- Las baterías adquiridas son de 12 VCD.
- Son recargables.
- Las dimensiones son de 30,50 cm x 20,00 cm x 17,00 cm.
- Tiene un peso de 23,1 kg.
- Tienen una capacidad de 255 Ah.

4.2. Consumo de energía eléctrica

El robot humanoide requiere de una gran cantidad de energía eléctrica, la cual va a ser suministrada por las baterías o la red eléctrica. Por lo tanto, es necesario hacer un análisis con los principales elementos que componen al robot. Hay que tener claro que este estudio se realizó con los principales partes que se tiene a disposición en el laboratorio. Los datos totales de consumo van a variar mientras se adicionen más dispositivos importantes en el robot.

4.2.1. Torso del robot

La energía eléctrica que llega al torso es distribuida a los distintos elementos, como son los brazos, las computadoras y los demás sistemas de control. Los datos de consumo eléctrico son lo que se observan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Consumo de energía en el torso [9].

Componentes	Potencia(W)	Cantidad	Subtotal (W)
Mano robótica	120	1	120
Brazos robóticos	1100	2	2200
Servidores centrales	300	2	600

La tabla 4.1 hace referencia a una sola mano robótica, porque aún no se tiene pensado la compra de otra. Además, se tiene previsto que el robot participe en distintas actividades en diferentes lugares como las empresas, instituciones o en el mismo hogar, por lo tanto, no se ha adquirido otra mano ya que se desea implementar otro dispositivo que le permita maniobrar.

Observemos que para una mejor comprensión de la cantidad de consumo eléctrico en la tabla 4.1, se hace referencia a la potencia de cada elemento y de acuerdo al voltaje suministrado, se obtendrá la corriente eléctrica disponible para alimentar cada dispositivo.

El torso es una parte importante en el robot, ya que ofrece el espacio para la colocación de distintos elementos necesarios para que el robot funcione de la mejor forma. En este sitio van ubicados múltiples elementos como relé, interruptores, botón de paro, computadoras, entre otros.

El brazo del robot que se tiene disponible en el Laboratorio de Robótica Cognitiva de la Universidad de Costa Rica es el siguiente, figura 4.1. Los datos de potencia se pueden observar en la tabla 4.1.



Figura 4.1: Brazo y mano robótica.

4.2.2. Base del robot

La base es otro de los elementos importantes en el robot humanoide referente a la distribución eléctrica, ya que se dispone de un espacio para la colocación de las baterías que son las principales distribuidoras de corriente y voltaje.

Aparte de las baterías, en la base se colocan otros elementos importantes para el humanoide como son los motores, los frenos y los dispositivos de control, además del comienzo del cableado eléctrico.

Tabla 4.2: Consumo de energía en la base [10].

Componentes	Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Controlador	12	4	48
Frenos	24	4	96
Motores	48	8	480

La tabla 4.2 hace referencia a los dispositivos de mayor consumo eléctrico, ya que hay otros elementos como son los sensores de posición y velocidad que no han sido comprados, pero se tiene previsto adquirirlos lo más antes posible. Para realizar un cálculo satisfactorio, se adiciona un porcentaje de error, con la idea de obtener un resultado realista al implementar la sumatoria de todos los componentes.

4.3. Cable eléctrico

Los cables son de gran importancia en el robot, ya que sirven de medio para alimentar todos los dispositivos eléctricos que constituyen al humanoide. Una buena selección de los cables, permitirá evitar los siguientes inconvenientes:

- Gasto innecesario de corriente.
- Sobre-calentamiento.
- Cortos circuitos generada por la sobrecarga.
- Riesgos de incendios.
- Sobre-dimensionamiento.
- Accidentes donde la vida del ser humano se vea perjudicada.
- Entre otros.

Dimensionar correctamente el cableado eléctrico es de vital importancia en la eficiencia y seguridad personal. Hay que recordar que una buena instalación ofrece un excelente sistema eléctrico y esto a su vez se observa en el funcionamiento del mismo robot.

4.3.1. Distribución del cableado

El robot humanoide contiene una gran cantidad de elementos que funciona con energía eléctrica, por lo tanto, necesita de varios cables para que pueda distribuir la corriente y el voltaje a través de todo el robot.

La figura 4.2, se observa la mala distribución del cableado en la base y el torso del robot.

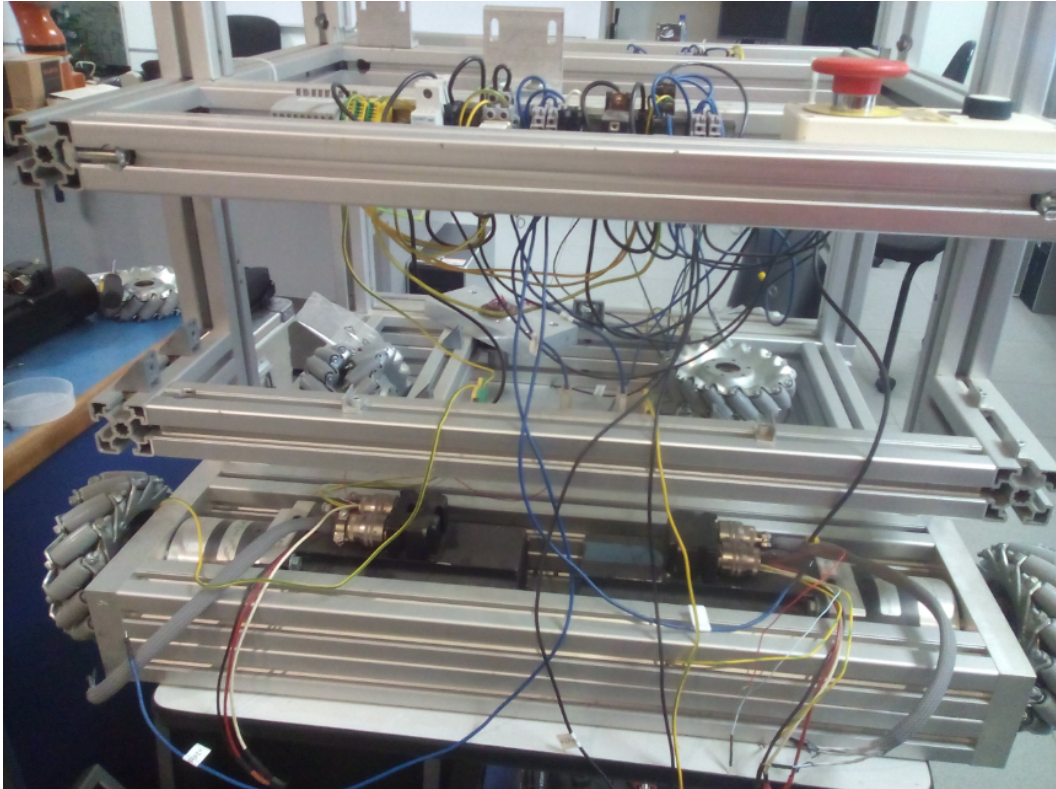


Figura 4.2: Cables eléctricos desorganizados.

La estética es una pieza clave en el diseño y propuesta de un proyecto, por lo tanto, se desea que el producto final sea agradable para la vista de cualquier usuario o cliente.

4.3.2. Canaletas ranuradas

Para que la distribución del cable eléctrico en el robot se vea mejor estéticamente en todo sistema, se adquirió las canaletas de la figura 4.3.

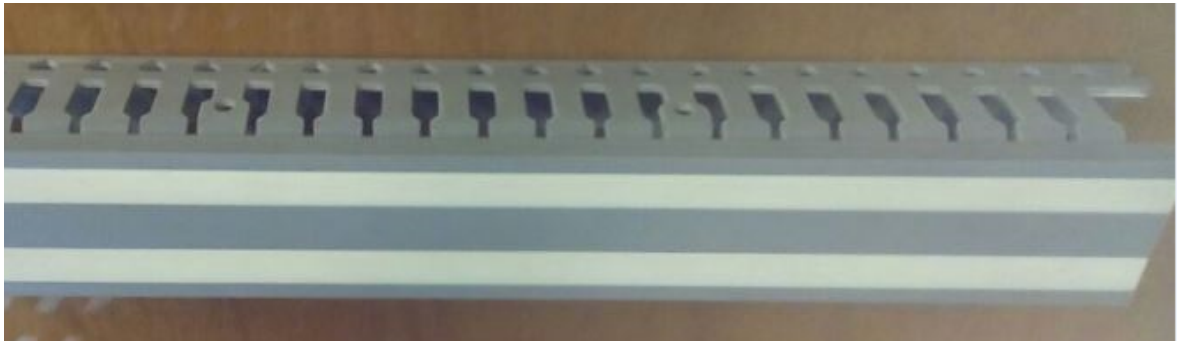


Figura 4.3: Canaleta ranurada de PVC.

Estas canaletas son ranuradas con la intención de poder ajustar la entrada del cable, sin la necesidad de cortar o realizar un pequeño agujero, además las canaletas concuerdan con el perfil de aluminio y son hechas de PVC, con la intención de reducir al máximo el peso que se le adicione al robot.

Algunas características que las hacen idóneas para mejorar la distribución del cableado, son las siguientes:

- Son de PVC, por lo tanto, muy livianas.
- Las dimensiones son de 40 mm × 25 mm, lo cual se ajusta al perfil de aluminio del robot, cuyo espesor es de 40 mm.
- Posee ranuras equidistantes, lo que le proporciona una ventaja con respecto a las que no poseen ranura, se puede introducir o sacar el cable creando ramificaciones sin necesidad de adicionar agujeros que dañen a la canaleta.
- El tamaño de venta es de 2 metros de longitud, por lo tanto, se puede cortar y ajustar a cualquier parte del robot.

Capítulo 5

Resultados y análisis

Toda la información recolectada del robot humanoide con respecto a la base y el cableado eléctrico, se analiza a continuación:

5.1. Cambios en los diseños y elaboración de una nueva pieza

Al robot humanoide se le diseñó un mecanismo que permitiera el contacto de las ruedas delanteras con la superficie de desplazamiento. Las piezas que se diseñaron son las mostradas en las figuras 3.3 y 3.4.

Para comprobar el funcionamiento de las piezas se procedió a imprimir en 3D, cada pieza por separado con un filamento plástico. Una vez obtenidas las piezas se procedió a ensamblar los rodamientos. Con las partes acopladas fue posible observar y comprobar los resultados obtenidos mediante el sistema de simulación 3D Inventor la resistencia a los esfuerzos que tendría al momento de colocarle los tornillos y tuercas que lo unen a la base del robot humanoide.

Se observó que se necesitaba realizar un ajuste en cada uno de los diseños, ya que había problemas con las dimensiones donde van colocados los cojinetes. Las piezas fueron modificadas con la intención de simplificarlas y hacerlas más resistentes ante los esfuerzos al cual estarán sometidas en relación con el peso del robot humanoide.

Como se mencionó anteriormente otra causa por las cuales se realizaron las modificaciones en el diseño fue para ajustar cada espacio a los cojinetes. Las medidas deben ser lo más precisas para evitar un mal ajuste de los rodamientos. Cada cojinete debe entrar en el espacio asignado lo más preciso posible para evitar holgadura o que el mismo cojinete no entre una vez maquinada la pieza, debido a un error de medición.

Otra situación que se observó en el ensamble de las piezas impresa en 3D, fue que se necesitaba de otro elemento para ajustar significativamente los rodamientos de la figura 3.4 con la intención de que los cojinetes no se movieran debido a rotación que estará sometido. Esta nueva pieza, es una tuerca que ajusta al cojinete de aguja y a la pieza 1 (eje) y pieza 2 (agarre de armazón).

A continuación, se hará mención de algunas modificaciones significativas en las piezas de las figuras 3.3 y 3.4, además del nuevo diseño elaborado, designado como "Tapa". En los planos colocados en el Apéndice A se pueden ver con más detalles estos cambios.

5.2. Piezas modificadas

A continuación, se realizará la explicación de los cambios realizados en las piezas 1 y 2, así como el detalle del diseño de un nuevo elemento que ha sido denominado: "Tapa".

5.2.1. Pieza 1: eje

La pieza 1 es la que se acopla a la base del robot, se realizaron cambios para evitar posibles rupturas por desgarre que pudieran ser provocados al unir los tornillos con la base, ver figura 5.1.

El corrimiento de los agujeros con respecto al borde fue de 2,69 mm. Este desplazamiento en la posición del agujero donde va colocado el tornillo fue con la intención de evitar una ruptura del acero. La medida anterior fue de 2,89 mm con respecto al borde, ahora paso a tener 5,58 mm, aumentándolo casi al doble en el espesor.

Como se mencionó anteriormente este aumento es importante para reducir el esfuerzo por desgarre que puede tener la pieza con respecto al borde, los cuales son provocados por los tornillos que unen a la pieza con la base.

Otro de los cambios de relevancia fue la creación de un círculo de 46 mm, donde se coloca el cojinete de bola. La idea de este nuevo diseño es que el rodamiento pueda rotar sin mayor obstáculo. Además, esta pieza de la figura 5.1 se le realizaron ajustes en los círculos donde van a ir colocados los cojinetes. Las nuevas dimensiones se observan en el Apéndice A, figura A3, cuyos planos elaborados se encuentra al final de este documento.

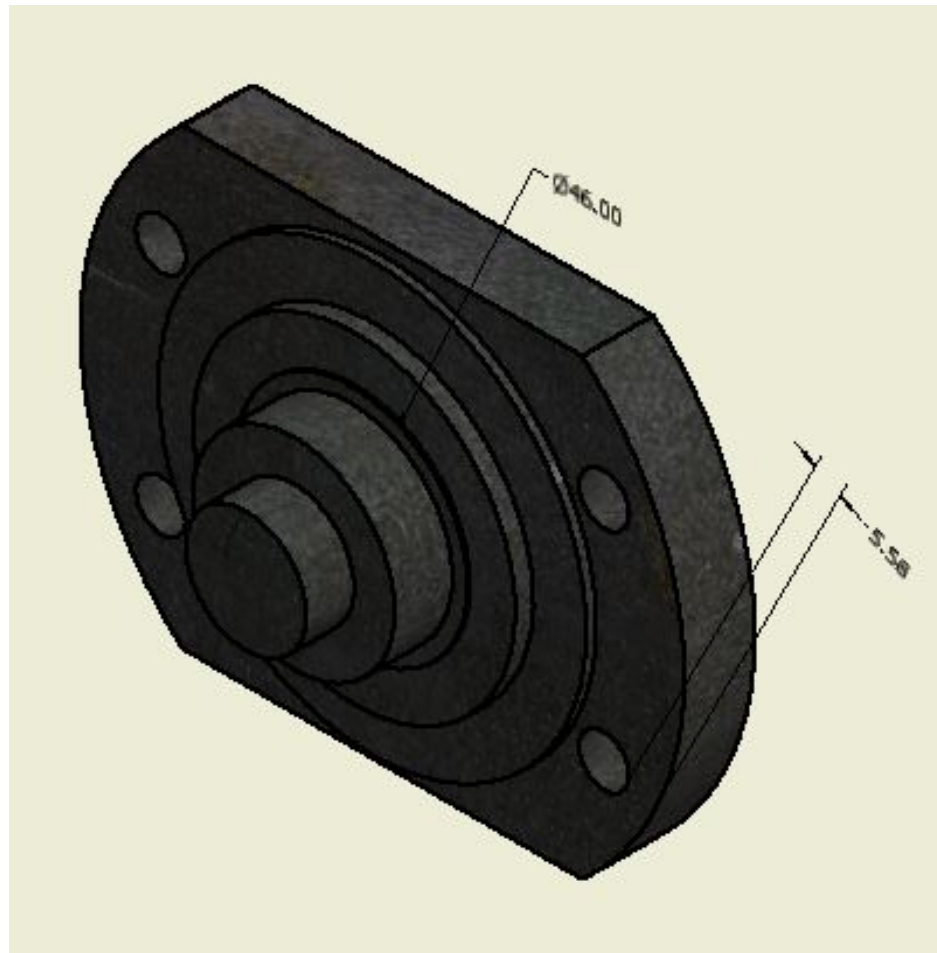


Figura 5.1: Nuevo diseño de la pieza 1, eje.

5.2.2. Pieza 2: agarre del armazón

La pieza 2 es la que se acopla al armazón donde van las ruedas Mecanum y los motores. Los cambios realizados en este diseño fueron bastante significativos con respecto al modelo presentado anteriormente en la figura 3.4.

Se realizaron modificaciones respecto al tamaño de las cavidades donde van colocados los cojines de aguja y de bola. Estas modificaciones se deben a que los rodamientos fueron cambiados por motivos de precio y el tiempo de entrega. Una vez que se tenía disposición sobre ellos se procedió a medir cada diámetro exterior e interior para modificar los diseños mencionados, además, para volverla más resistente ante la deflexión del material.

El nuevo diseño es el que se presenta en la figura 5.2 y los planos de esta pieza en el

Apéndice A, figura A4. El propósito de modificarla fue con la intención de reducir el tiempo de maquinado y ajustar los cojinetes, pero esto también significa un cambio al momento de adherirla a la base, ya que los tornillos y tuercas tiene que ajustarse de acuerdo al nuevo modelo.

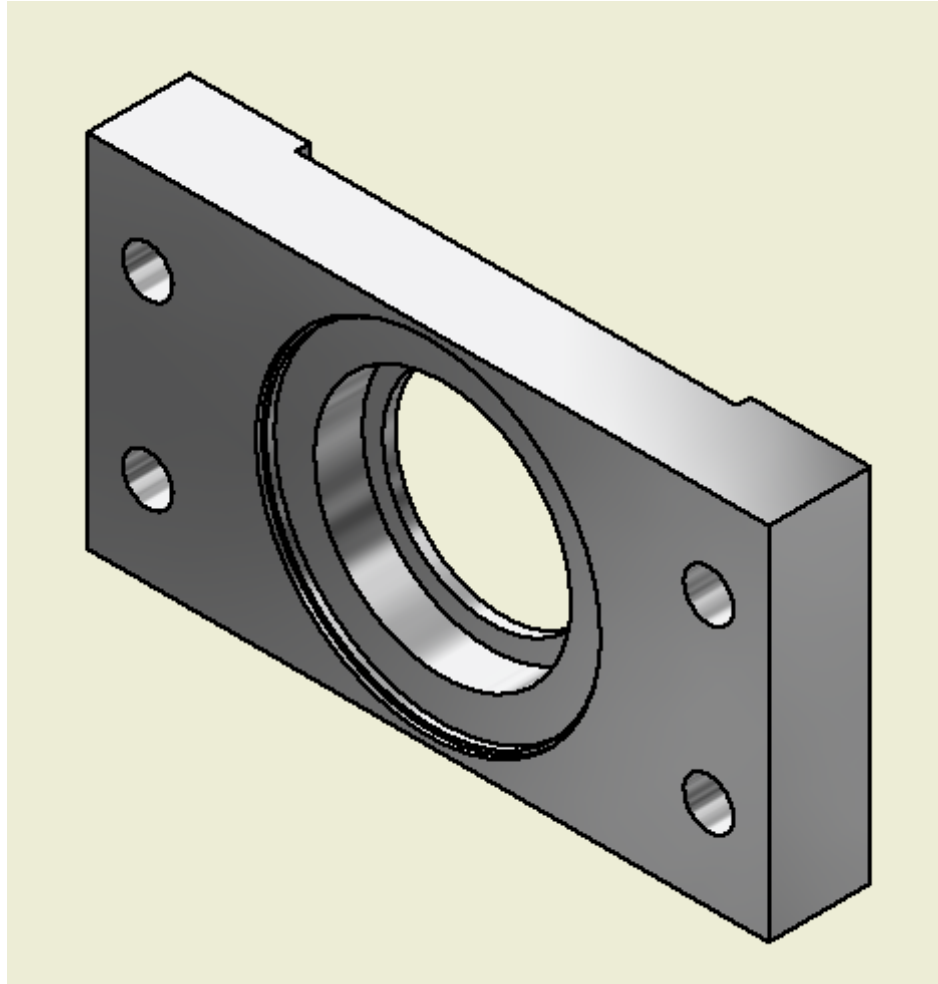


Figura 5.2: Nuevo diseño de la pieza 2, agarre de armazón.

5.2.3. Pieza 3: tapa

La pieza 3 posee la función de mantener el cojinete de aguja acoplado a la pieza 2. Este diseño en un inicio no se tenía pensado realizar, ya que era innecesaria según la visión que se tenía en ese instante, pero a lo largo de las modificaciones realizadas y las observaciones, se llegó a la conclusión que era importante, ya que desempeñaba un puesto relevante, como es mantener el rodamiento de aguja dentro de la pieza de

agarre, evitando movimientos indeseados.

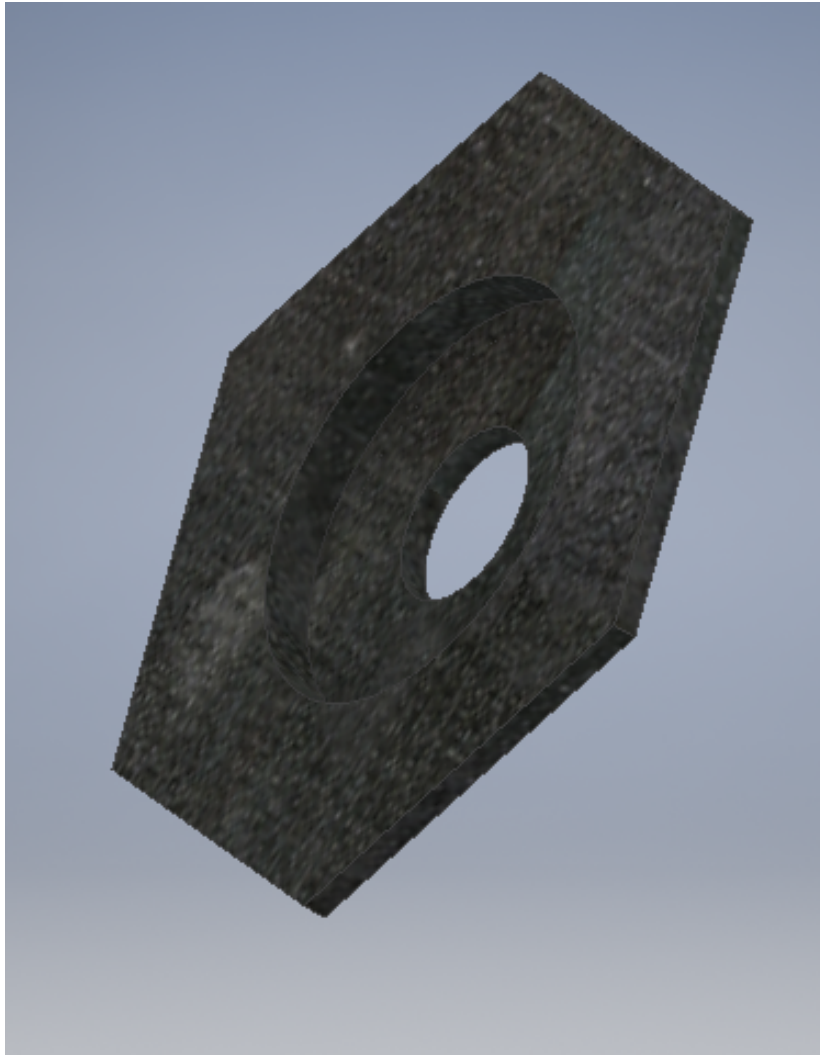


Figura 5.3: Pieza 3, tapa.

Cabe mencionar que la pieza de la figura 5.1 en su parte superior lleva un roscado M22, el cual se acopla a la pieza de la figura 5.3, siendo este el medio como ambos elementos se ensamblan. Los planos de la pieza presente en la figura 5.3 se pueden observar en el Apéndice A, figura A5.

A continuación, se analiza por medio de la siguiente tabla 5.1, las ventajas y desventajas de las modificaciones realizadas en las piezas 1 y 2, además se hace mención de la nueva pieza 3 denominada como Tapa.

Tabla 5.1: Ventajas y desventajas de los cambios realizados, además de la descripción positiva y negativa del nuevo modelo, pieza 3.

Piezas	Ventajas de los cambios	Desventaja de los cambios
Pieza 1	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de falla mecánica en el material (desgarre). • Con el nuevo círculo de 46 mm adicionado al nuevo diseño, el cojinete de bola realiza una mejor rotación evitando al máximo la fricción entre el material. 	<ul style="list-style-type: none"> • Cambios en la longitud el tornillo y nueva forma de sujetar el mecanismo a la base • Modificaciones en el diseño.
Pieza 2	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir el tiempo de maquinado. • Reducción del costo de maquinado. • Pieza más compacta y sólida, ya que está elaborada de aluminio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Modificaciones en el diseño. • Modificación en la forma de sujetar los tornillos a la base.
Pieza 3	<ul style="list-style-type: none"> • Mantener unidos los cojinetes con las demás piezas. • Mantener el sistema mecánico más estable, sin desplazamiento de los componentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar la tapa. • Compra de material para el maquinado.

5.3. Conjunto mecánico

El conjunto mecánico es la unión de todas las piezas diseñadas en un solo elemento. Para analizar su comportamiento se realizó un estudio de movimiento virtual con el software de diseño 3D inventor, con el propósito de observar el movimiento dinámico. Con el mismo software se le aplicó una fuerza de 2058 N distribuida a lo largo de las piezas, además se fijó a la base del robot con la pieza 1 para proporcionarle mayor rigidez al conjunto.

Algunos datos de acuerdo a las especificaciones de los materiales y a las piezas diseñadas se muestran en la tabla 5.2, el cual fue obtenido con base en las estadísticas del software inventor.

Tabla 5.2: Especificaciones generales

Dato	Valor
Masa	2,26032 kg
Área	90868,8 mm ²
volumen	457342 mm ³
Centro de gravedad	x=-61,8879 mm y=33,7943 mm z=22,6232 mm

La fuerza aplicada al conjunto mecánico fue de 2058 N, el cual es el peso máximo del

robot humanoide. En la figura 5.4 se observa las piezas mecánicas unidas entre si, con la fuerza aplicada. Las características físicas del conjunto mecánico se pueden apreciar en el Apéndice A, figura B2.

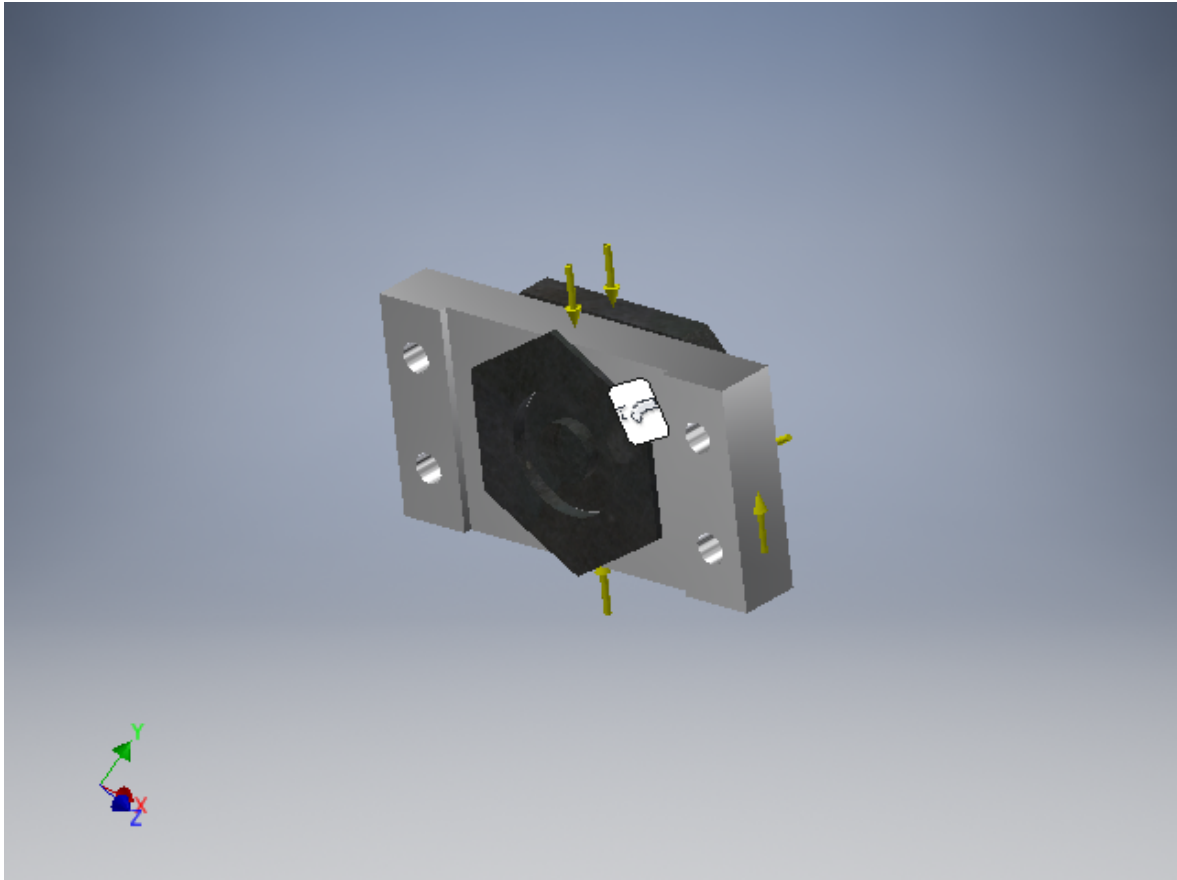


Figura 5.4: Conjunto mecánico.

Para analizar el comportamiento de las piezas ante los esfuerzos sometidos por el peso de los componentes del robot en su totalidad, se obtuvieron los siguientes resultados por medio del software Inventor:

5.3.1. Esfuerzo de Von Misses

El esfuerzo elástico Von Misses es un criterio de los materiales dúctiles para conocer si las piezas fallan o resisten a la ruptura ocasionada por los esfuerzos. En este caso se realizó el análisis con las cargas máximas que puede soportar el conjunto mecánico de 2058 N.

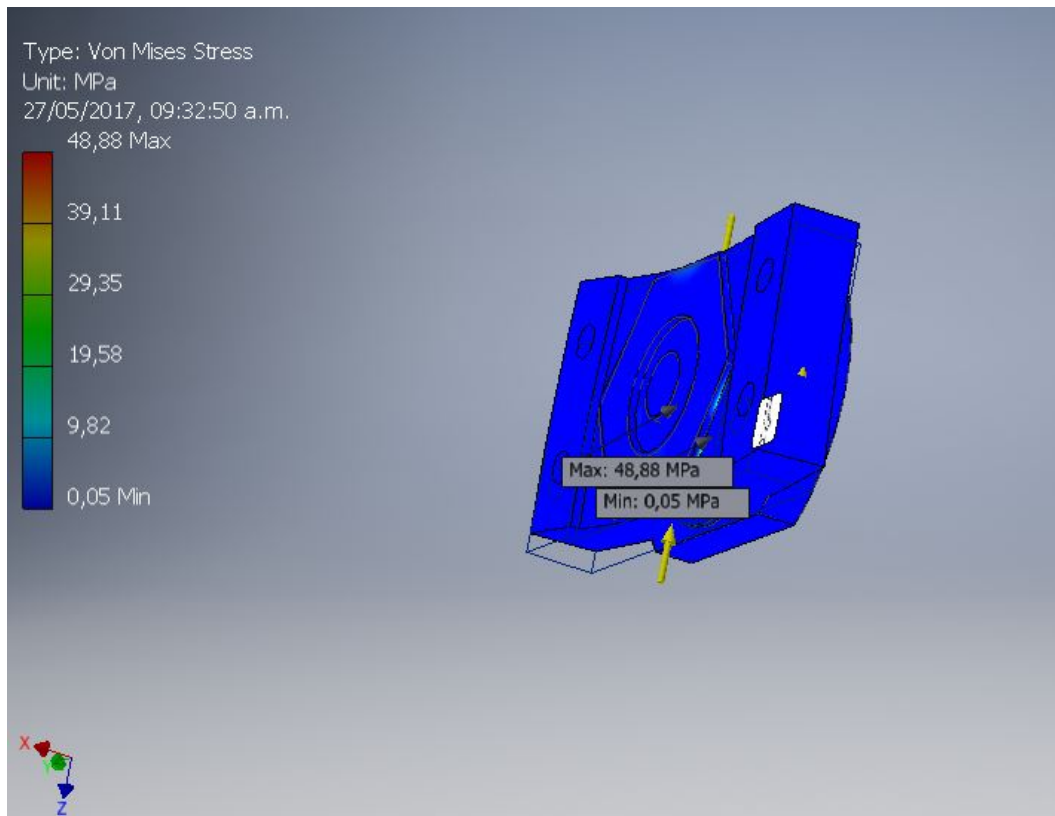


Figura 5.5: Esfuerzo máximo y mínimo de Von Misses.

Se puede observar en la figura 5.5, el punto crítico se da en la pieza 1, ya que el esfuerzo mayor de Von Misses es de 48,88 Mpa, además, se puede analizar con la gráfica de esfuerzo presente en esa misma figura, que la mayor parte del conjunto se mantiene en valores mínimos de esfuerzo 0,05 Mpa.

Ahora aplicando la teoría de Von Misses, para obtener un esfuerzo equivalente por medio de la energía de la distorsión, se emplea la siguiente dato de la ecuación 5.1.

$$F_{equVM} = \sqrt{\frac{(48,88 - 0,05)^2 + (0,05 - 0)^2 + (48,88 - 0)^2}{2}} = 48,85 \text{ Mpa} \quad (5.1)$$

Según las observaciones realizadas en el software se analizó la pieza a mayor esfuerzo, en este caso la de acero, por lo tanto, el esfuerzo de fluencia utilizado para el factor de seguridad es de 480 Mpa. En la ecuación 5.2 se realiza el cálculo respectivo.

$$F_s = \frac{480 \text{ Mpa}}{48,85 \text{ Mpa}} = 9,82 \quad (5.2)$$

Se observa que $F_s > 1$, por lo tanto, por medio de este criterio de la energía de la distorsión responde positivamente a los esfuerzos principales que está sometida la pieza.

5.3.2. Esfuerzos principales en el material

Primer esfuerzo principal

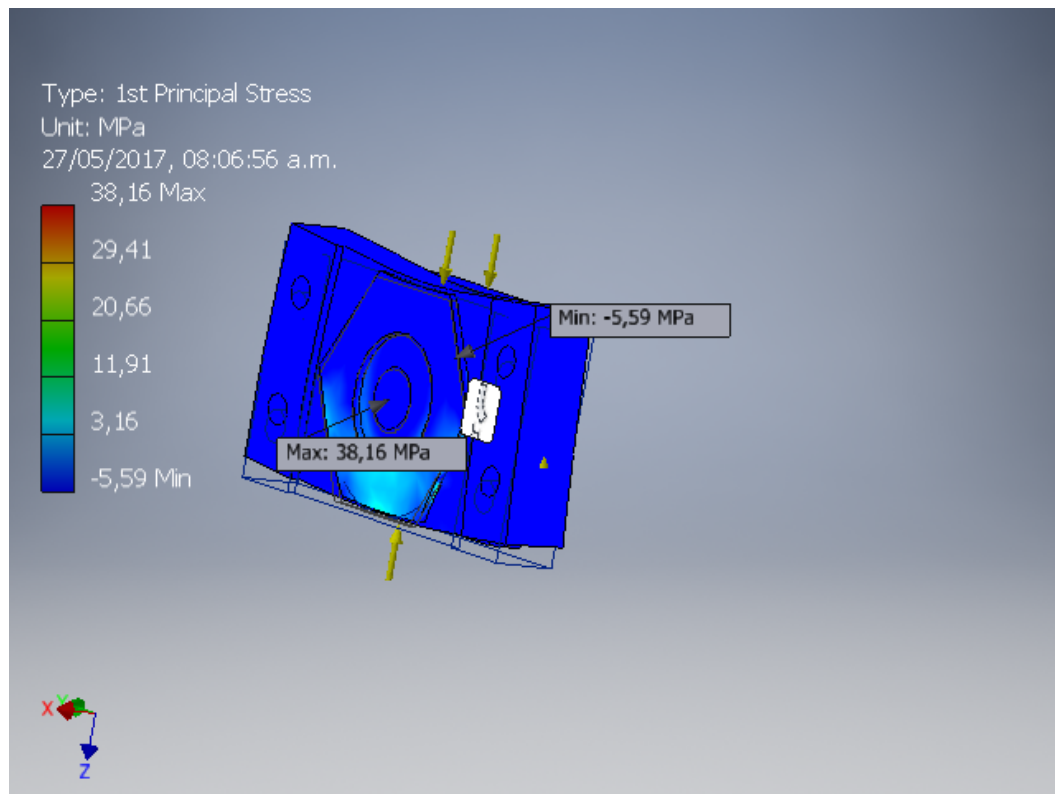


Figura 5.6: Primer esfuerzo principal.

El valor equivalente del primer esfuerzo principal es que se obtiene de acuerdo a la ecuación 5.3

$$F_1 = 38,6 \text{ Mpa} - -5,59 \text{ Mpa} = 44,19 \text{ Mpa} \quad (5.3)$$

Segundo esfuerzo principal

Este esfuerzo es cero, ya que no existe tensión en el eje radial de conjunto mecánico.

$$F2 = 0\text{Mpa} \quad (5.4)$$

Tercer esfuerzo principal

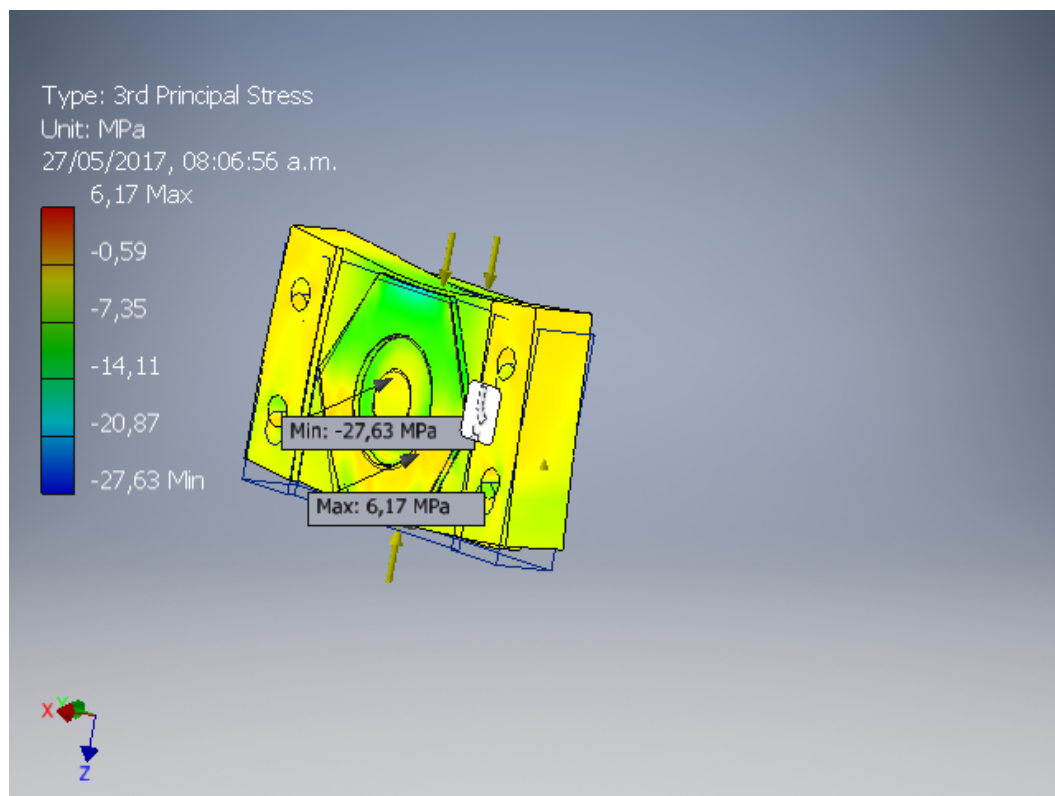


Figura 5.7: Tercer esfuerzo principal.

El valor equivalente del tercer esfuerzo principal es el que se obtiene según la ecuación 5.5

$$F3 = 6,17\text{Mpa} - (-27,63\text{Mpa}) = 33,80\text{Mpa}. \quad (5.5)$$

El esfuerzo de fluencia utilizado es con referencia al acero, ya que la carga máxima se localiza en esta pieza mencionada, por lo tanto, aplicando la teoría de esfuerzo cortante máximo para la mayor magnitud ($F1$), se obtiene un factor de seguridad de 10,86 según la ecuación 5.6.

$$F_s = \frac{480\text{Mpa}}{44,19\text{Mpa}} = 10,86 \quad (5.6)$$

Esto demuestra que el $F_s > 1$, por lo tanto, el material resiste a los esfuerzos provocados por la masa del robot humanoide.

5.3.3. Deflexión

La deflexión es el desplazamiento del material debido a los esfuerzos aplicados a la pieza.

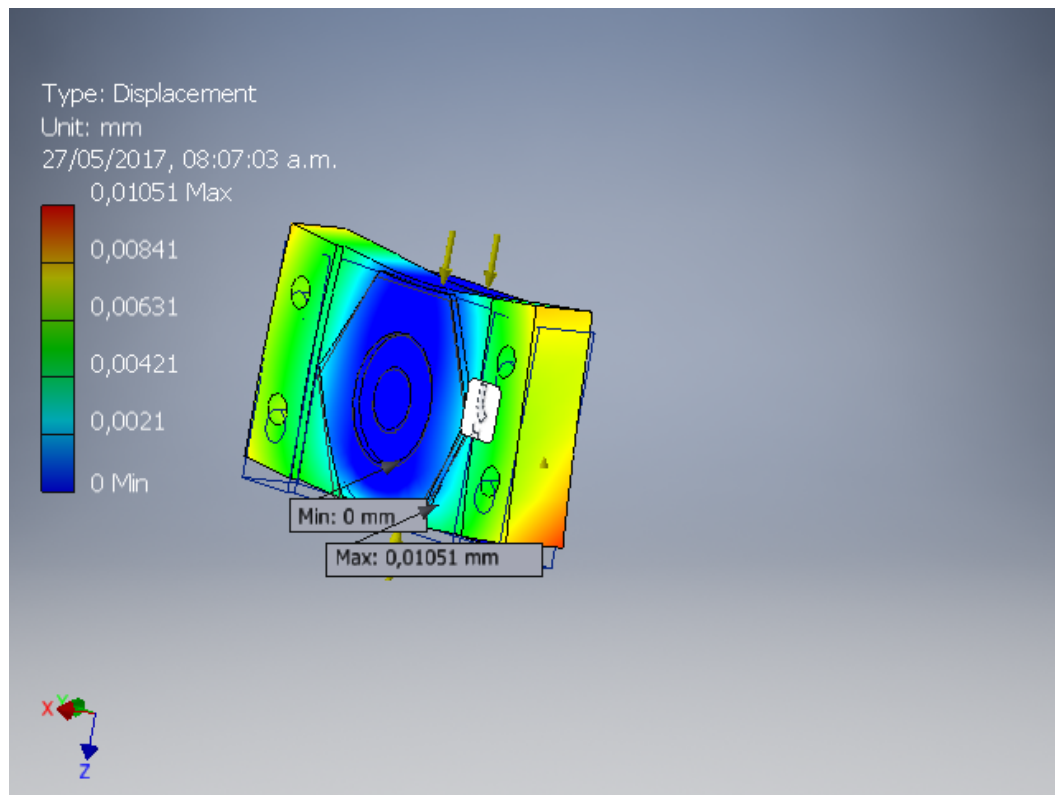


Figura 5.8: Deflexión del conjunto.

Se observa según la gráfica en la figura 5.8 el desplazamiento máximo, cuyo valor es de 0,01051 mm, siendo casi insignificante para el mecanismo. Además, podemos detallar que hay lugares donde el material no se desplaza, como es la zona central del conjunto. El mayor desplazamiento lo sufre el aluminio, por la suavidad con respecto al acero, ya que su composición química es totalmente distinta.

5.3.4. Factor de seguridad obtenido por el modelado

El factor de seguridad (F_s) permite conocer si el conjunto mecánico soporta todos los esfuerzos aplicados. Este valor tiene que ser mayor a 1, ya que por debajo es falla inminente.

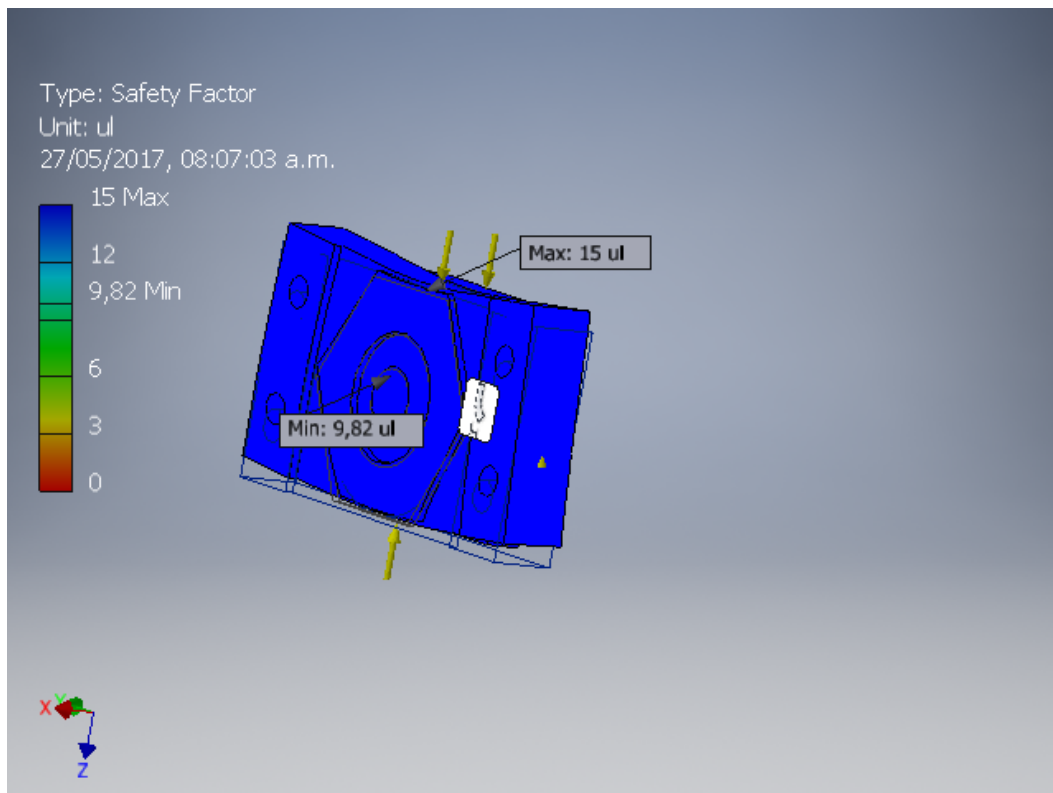


Figura 5.9: Factor de seguridad.

En la figura 5.9 el valor buscado es el mínimo coeficiente de seguridad (9,82); siendo mucho mayor a 1, por lo tanto, el material responde positivamente ante los esfuerzos del sistema. Si analizamos con más detalle el factor de seguridad obtenido en el software es comparable al de Von Misses, ya que el análisis se basa de acuerdo al criterio de la energía de la distorsión.

Para comprender de mejor forma los resultados obtenidos se procede a crear la tabla 5.3, mostrando un resumen de los datos anteriores.

Tabla 5.3: Resumen de los datos obtenidos referente a los esfuerzos.

Análisis	Valor mínimo	Valor máximo
Volumen	457342mm ³	—
Masa	2,26253 kg	—
Esfuerzo Von Misses	0,0508929 MPa	48,8779 MPa
Primer esfuerzo principal	-5,59152 MPa	38,1616 MPa
Segundo esfuerzo principal	0 Mpa	0 Mpa
Tercer esfuerzo principal	-27,6253 MPa	6,16619 MPa
Deflexión	0 mm	00,0105148 mm
Factor de seguridad(Fs)	9,82037 ul	15 ul

El análisis realizado fue únicamente con respecto a la parte estática del ensamble, por lo tanto, para calcular el tiempo de vida y los esfuerzos de fatiga en la piezas, se debe hacer un análisis dinámico, donde involucre esfuerzos medios y alternos.

5.3.5. Ensamble del diseño a la base del robot humanoide

El análisis estático realizado anteriormente comprobó la resistencia de las piezas 1, 2 y 3 ante los esfuerzos aplicados sobre ellas. En la figura 5.10 se observa donde irán colocadas las piezas diseñadas una vez ensambladas.

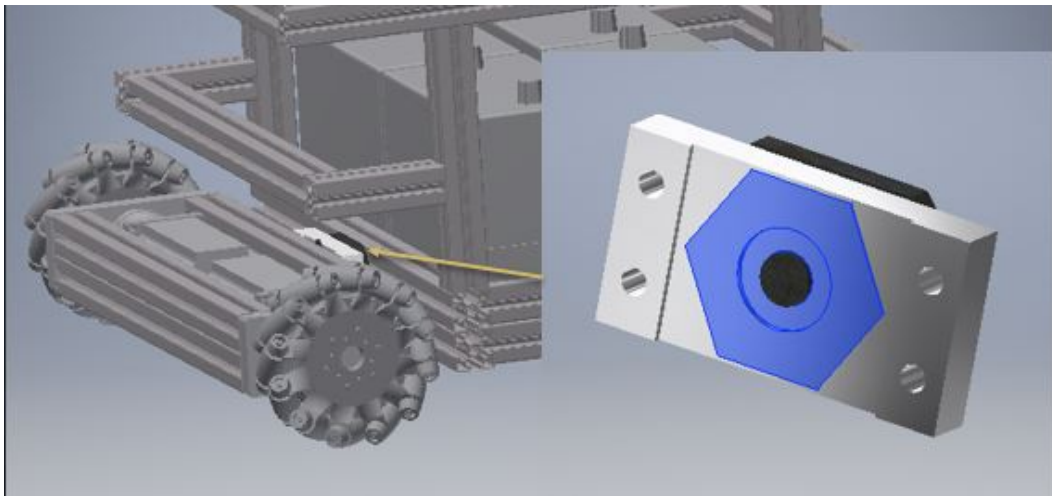


Figura 5.10: Ensamble del diseño a la base del robot.

La solución planteada de cuerdo al problema de inestabilidad que presentaba el robot sobre superficies irregulares, es la mostrada en la figura 5.10, pero cabe mencionar que la solución solo obedece a superficies de poca irregularidad, ya que puede presentar mayor dificultad al desplazarse de un lugar a otro. Las ruedas omnidireccionales son el medio de traslado del robot, por lo tanto deberán hacer contacto en todo momento con el lugar de desplazamiento, es decir que las cuatro ruedas deben hacer contacto con la superficie donde se encuentre el robot, esto es debido a las propiedades que presenta para moverse y además del enorme peso del robot.

5.4. Cableado eléctrico

Las cuatro baterías de ciclo profundo de 12 VCD son conectadas en serie, para obtener una tensión total de 48 VCD en corriente directa, pero el robot humanoide va a tener una característica relevante, como la capacidad de conectarse directamente a la red eléctrica de cualquier casa o industria donde se encuentre, es decir, el sistema va a recibir voltaje y corriente alterna, por lo tanto, se necesitan de convertidores tanto CD como CA y viceversa.

Los datos obtenidos de corriente y voltaje fueron estudiados anteriormente en el capítulo 4. De acuerdo a los datos recopilados en la tabla 5.4 se procedió a analizar el tipo de cable eléctrico más adecuado al sistema.

Tabla 5.4: Potencia total de cada componente.

Componentes	Potencia Total (W)
Motores	480
Frenos	96
Controlador	48
Mano robótica	240
Brazos robóticos	2200
Servidores	600
Total	3664

Con la potencia de 3664 watts obtenida de cada uno de los elementos que conforma el robot humanoide, se agrega un 20 % de seguridad para obtener un resultado más satisfactorio.

$$\text{Potencia total} = 3664W + 3664W * 20\% = 4396,8W \quad (5.7)$$

Por lo tanto, la cantidad total de potencia consumida por el robot es de 4396.8 W. Ahora se procedió analizar la corriente total del sistema según la ecuación 5.8:

$$P = I * V \tag{5.8}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{4396,8W}{220V} = 20A \tag{5.9}$$

Por lo tanto, el cable tomado de acuerdo a la figura 5.11 es de calibre 18 AWG/MCM, este es un tipo de conductor es ALT/SAE, el cual es flexible y fabricado de cobre, pero también se puede utilizar sin ningún problema un cable calibre 16 AWG/MCM, ya que la corriente máxima es de 27 A.

Recordemos que estos datos son de acuerdo a los elementos que se dieron a conocer en las tablas 4.1 y 4.2, las cuales son un resultado proyectado en todo el robot humanoide. La parte de estudio de este reporte es solamente la base del robot, pero se hace mención a los demás elementos como un conjunto, ya que son indispensable para el estudio.

Calibre	Area de la Sección Transversal Nominal		"Número de Hilos"	Espesor de Aislamiento Nominal		Diámetro Externo Total Aproximado		Peso Total Aprox.	Resistencia Eléctrica c.d Máx. @30°C	Capacidad de Corriente Máxima
	C.M.	mm ²		#	pulg.	mm.	pulg.			
20	1020	0.52	7	0.015	0.38	0.067	1.70	6.90	36.2	16
18	1620	0.82	10	0.015	0.38	0.077	1.96	10.20	22.7	22
16	2580	1.31	16	0.015	0.38	0.089	2.26	15.16	14.2	27
14	4110	2.08	26	0.015	0.38	0.104	2.64	22.93	8.93	34
12	6530	3.31	41	0.018	0.46	0.129	3.28	36.07	5.62	45
10	10380	5.26	65	0.018	0.46	0.154	3.91	55.38	3.54	53

Figura 5.11: Calibre de cable eléctrico[8].

Capítulo 6

Conclusiones

Una vez finalizado el diseño de cada pieza del conjunto mecánico y el estudio del sistema eléctrico, conviene hacer una revisión general del trabajo realizado considerando en primera instancia el objetivo manifestado al comienzo de este proyecto.

A lo largo del trabajo ejecutado han surgido numerosos problemas con el diseño inicial, que han forzado a cambiar elementos importantes, para realizar un maquinado deseado tanto en acero como en aluminio. Los cambios en el diseño se llevaron a cabo con la finalidad de mejorar el funcionamiento direccional de la plataforma base.

En primera instancia se realizó un diseño de cada elemento (pieza 1, 2 y 3) los cuales fueron modificados de acuerdo a los requerimientos del sistema mecánico como son los rodamientos, las tuercas y los tornillos. Los cambios se realizaron de forma satisfactoria en el software.

Según un análisis de esfuerzo realizado se obtuvo un factor de seguridad (F_s) por medio de Von Misses de 9,82 siendo apropiado para soportar las cargas a la que estará sometida las piezas. El factor de seguridad (F_s) puede variar hasta un rango donde el diseñador estime como prudente, en este caso la elección fue mantenerlo en el rango de $1 < F_s > 15$ con el fin de evitar un sobre-dimensionamiento y gasto innecesario de material, lo cual conlleva a pérdidas de dinero por parte de la institución.

Por limitaciones de tiempo no se pudieron maquinar las piezas 1, 2 y 3, pero para demostrar el funcionamiento se imprimieron en 3D con un filamento de plástico, mostrando como resultado un 90% entre lo simulado y lo teórico, dejando por lado un 10%, por las modificaciones y ajustes realizados a lo largo del proyecto.

Para continuar, en el capítulo 4, específicamente en las tablas 4.1 y 4.2 se visualizan los datos del estudio eléctrico realizado en cada uno de los elementos que constituye el robot humanoide. Las características eléctricas mostradas en estas tablas, ponen manifiesto la necesidad de efectuar un cálculo asertivo, ya que la corriente y el voltaje

son elevados.

Según los cálculos realizados en el capítulo 5 se obtuvo un cable número 18 AWD/MCM, conforme a la norma ALT/SAE. Este análisis se realizó de acuerdo a la corriente total del sistema (20 A) y acorde a la figura 5.11, donde se muestra una tabla de especificaciones eléctricas, pero también se puede utilizar un número de cable 16 AWD/MCM ya que la corriente máxima admisible es de 27 A. En este caso la corriente admisible en el cable es mayor, pero no es impedimento para la distribución eléctrica en el robot.

Finalmente, de acuerdo al objetivo general se puede intuir que se cumplió con lo esperado. El diseño ofrece la solución al problema de estabilidad que el robot puede experimentar al moverse por superficies irregulares, además, de utilizar solo lo necesario referente a los materia de diseño y no incurrir en excesos, el cableado eléctrico no entorpecerá el funcionamiento y por lo tanto, el sistema electromecánico es viable.

Personalmente la realización de este proyecto fue satisfactorio y sumamente interesante, ya que involucraba elementos mecánicos y eléctricos, los cuales son temas aprendidos durante toda la carrera. La experiencia de haber realizado este proyecto me fue enriquecedor para mi persona.

6.1. Recomendaciones

- Antes de maquinar las piezas se deberá comprobar las dimensiones donde irán colocado los rodamientos para evitar un mal ajuste de los cojinetes y perdidas económicas.
- Se debe llevar a cabo el maquinado de las piezas en su respectivo material (acero y aluminio) con el propósito de hacer pruebas más concretas de acuerdo al sistema mecánico.
- Se deberá hacer un análisis dinámico con la intención de obtener el tiempo de vida y número de ciclos de cada elemento del conjunto mecánico.
- Toda la información del robot (planos, diseños, tesis) deberán estar en un sistema de almacenamiento digital (vía red), donde la información pueda ser distribuida entre todos las personas participantes de la construcción del robot humanoide, en cualquier momento y lugar.
- Se deberá contar con un tiempo prudente para la compra de materiales en el extranjero, con el fin de evitar retrasos en la implementación de los distintos elementos adquiridos vía web.

Bibliografía

- [1] P. Raindo and R. José, “White moon: Diseño e implementación de un robot tipo ameba,” Tesis de licenciatura, Ingeniería Informática, 2010.
- [2] D. J. Núñez, D. Dr Torres, and M. C. V. Rodríguez, “Desarrollo y modelado de un robot humanoide,” Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Sinaloa, marzo 2011.
- [3] C. Pérez I, “Análisis y diseño de una cabeza robótica para aplicación interactiva-robot,” Tesis de licenciatura, Ingeniería en Automatización y Electrónica Industrial, Escuela superior de ingeniería, 2010.
- [4] H. Jesús C, “Diseño e integración de un actuador para el robot asistencial asibot 2,” Tesis de licenciatura, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, 2011.
- [5] M. Vargas. (2014) Robot humanoide toma forma en laboratorio de ucr. [Online]. Available: http://www.nacion.com/vivir/ciencia/Robot-humanoide-forma-laboratorio-UCR_0_1457254300.html
- [6] J. M. Rico Martínez, “Esfuerzos principales y eigenvalores.” Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Guanajuato, F. I. M. E. E., 2005.
- [7] C. A. Castro, “Teorías de falla bajo cargas estáticas.” Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de Salamanca., 2014.
- [8] P. Dogde, “Catalogo general.” Cables eléctricos, 2003.
- [9] I. F. Chávez Arbaiza, “Diseño del torso móvil para un robot humanoide.” Instituto Tecnológico de Costa Rica, 2015.
- [10] F. D. Suárez Bonilla, “Integración del hardware y software del robot humanoide del arco-lab de la eie.” Universidad de Costa Rica, 2015.
- [11] T. Fong, I. Nourbakhsh, and K. Dautenhahn, “A survey of socially interactive robots,” *Robotics and Autonomous Systems*, 2003.
- [12] P. M. Kennedy and J. G. L. Guix, *Hacia el siglo XXI*. Plaza & Janes, 1993.

- [13] Albers, “Conceptual design of humanoid robots, third iarp international workshop on humanoid and human friendly robotics,” *Tsukuba Research Center, AIST Tsukuba, Ibaraki*, 2002.
- [14] F. M. Rivas, J. M. Canas, and J. González, “Aprendizaje automático de modos de caminar para un robot humanoide,” *Proceedings of Robot*, pp. 120–127, 2011.
- [15] B. Karan, “Calibration of kinect-type rgb-d sensors for robotic applications,” *Institute of Technical Sciences, Serbian Academy of Sciences and Arts*, 2014.
- [16] I. Sánchez, “Cámaras térmicas,” *Funcionamiento y Protocolo de uso*, Universidad Simón Bolívar, 2007.
- [17] S. M. Rafael Sisto, “Control y comportamiento de robots omnidireccional,” Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay, Noviembre 2009.
- [18] G. Herrera, “Navegación autónoma de un robot móvil,” Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, mayo 2014.
- [19] R. Budynas and K. Nisbett, *Diseno en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill, 2008.
- [20] M. Vargas. (2017) Aceros vargas. [Online]. Available: <http://www.acerosvargas.com/>
- [21] Furukawa, “Aluminios pfk.” Peru: Corporación furukawa, pp. 61–62.
- [22] S. Porras, “Rodamientos.” Universidad de Castilla- La Mancha, 2003.

Apéndice A

Se incluye cada uno de los planos elaborados para el mejoramiento de la base.

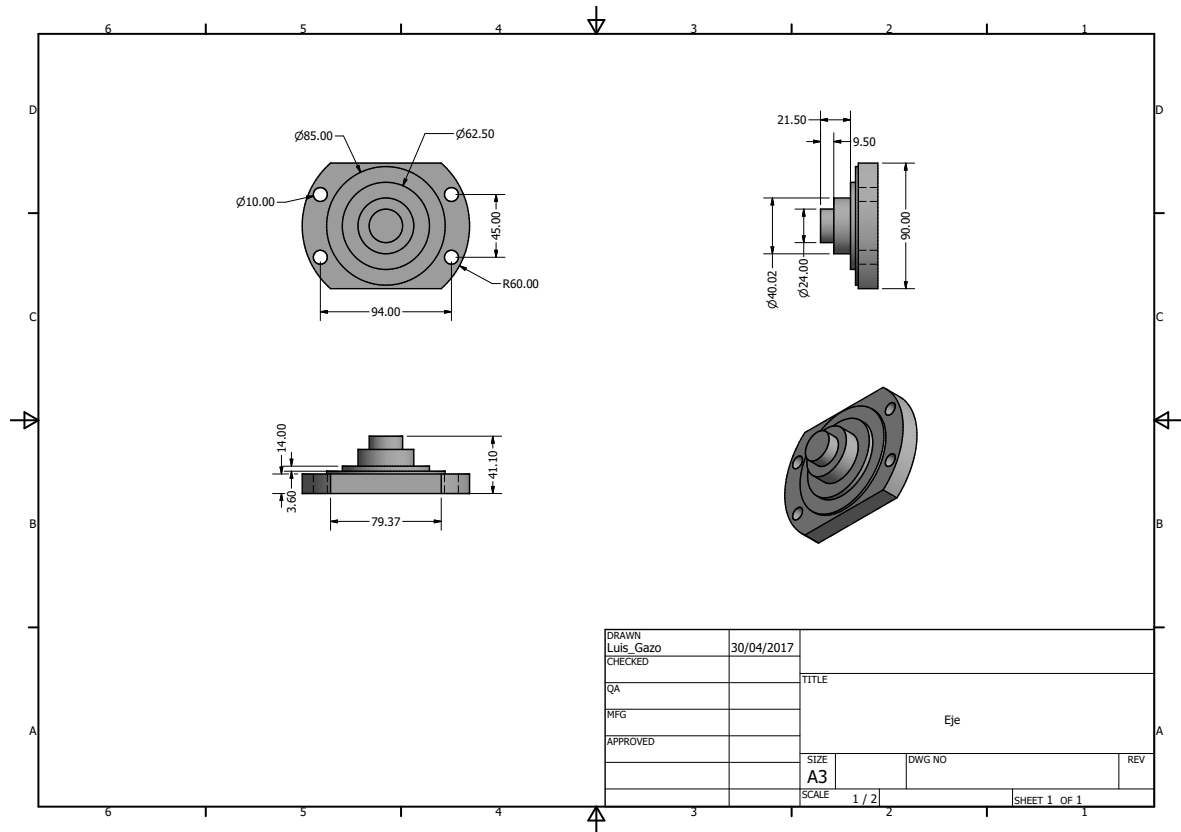


Figura A.1: Pieza 1, eje.

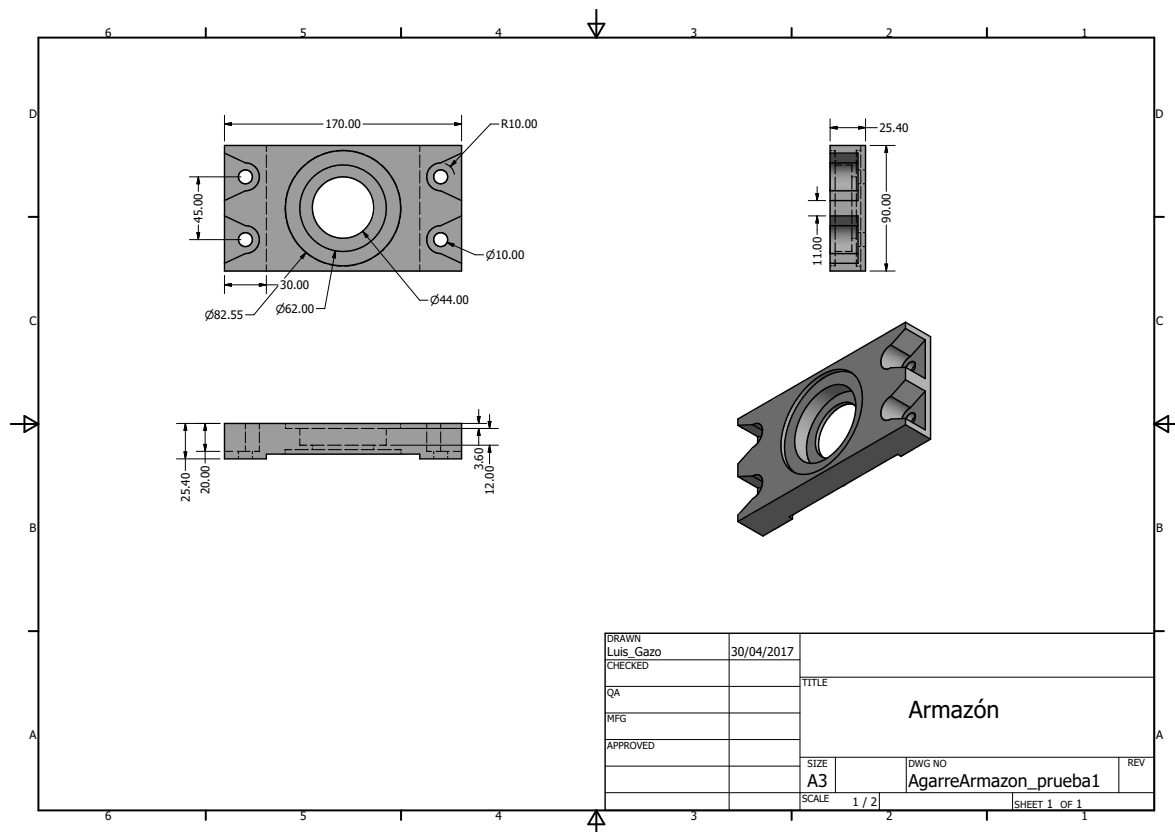


Figura A.2: Pieza 2, agarre de armazón.

Nuevos planos: Modificaciones en los diseño A1 Y A2, además del nuevo plano, figura A5.

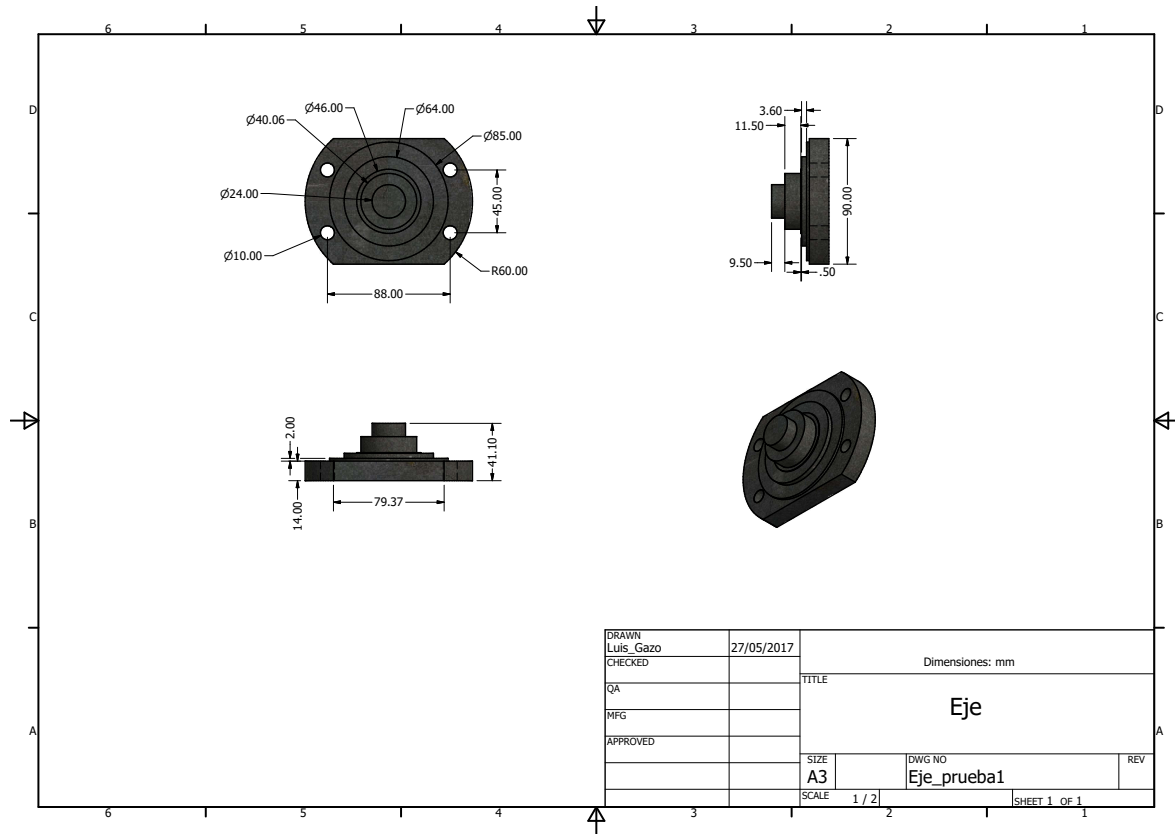


Figura A.3: Pieza 1, eje.

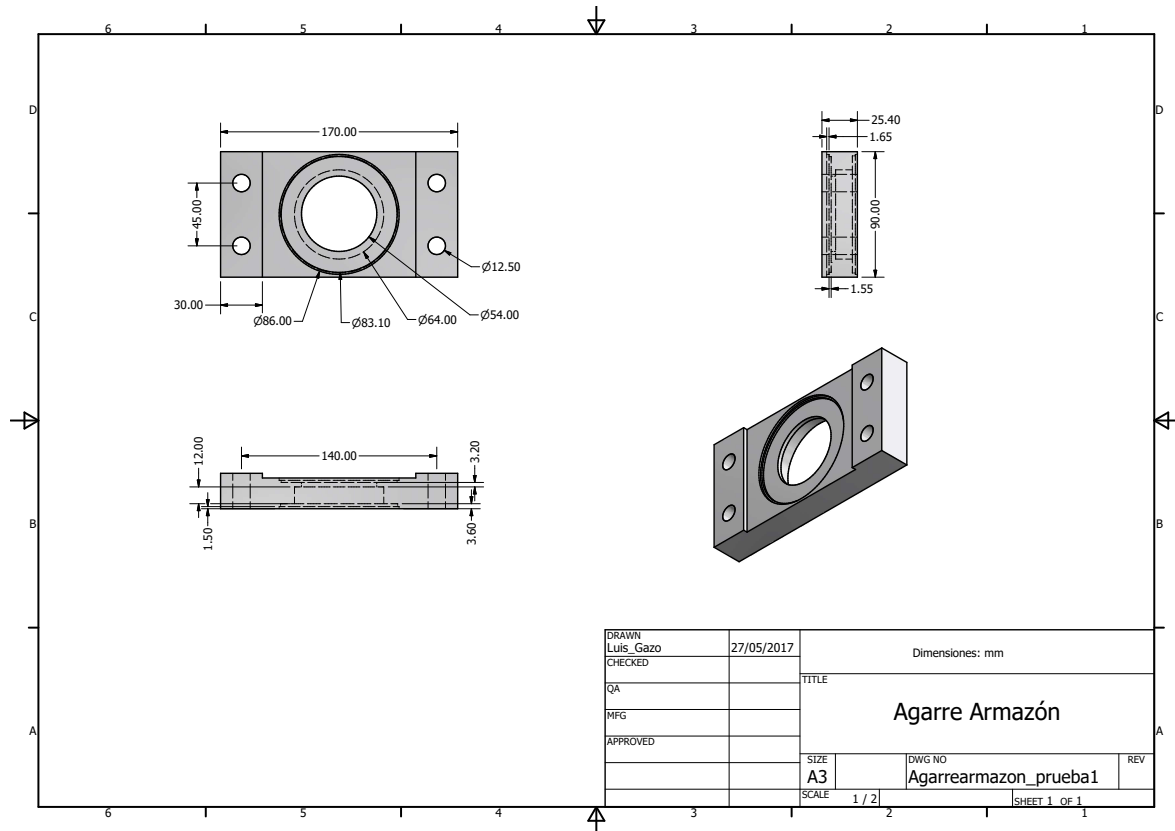


Figura A.4: Pieza 2, agarre de armazón.

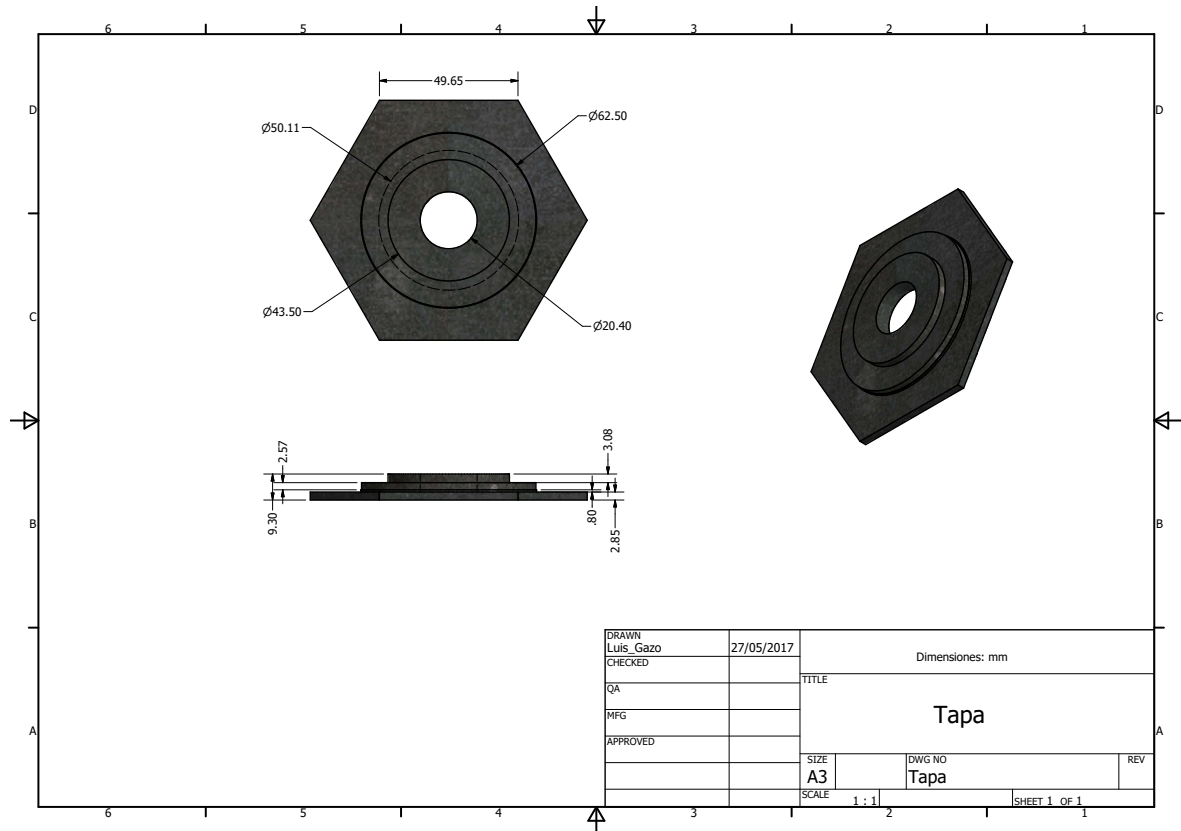


Figura A.5: Pieza 3, tapa.

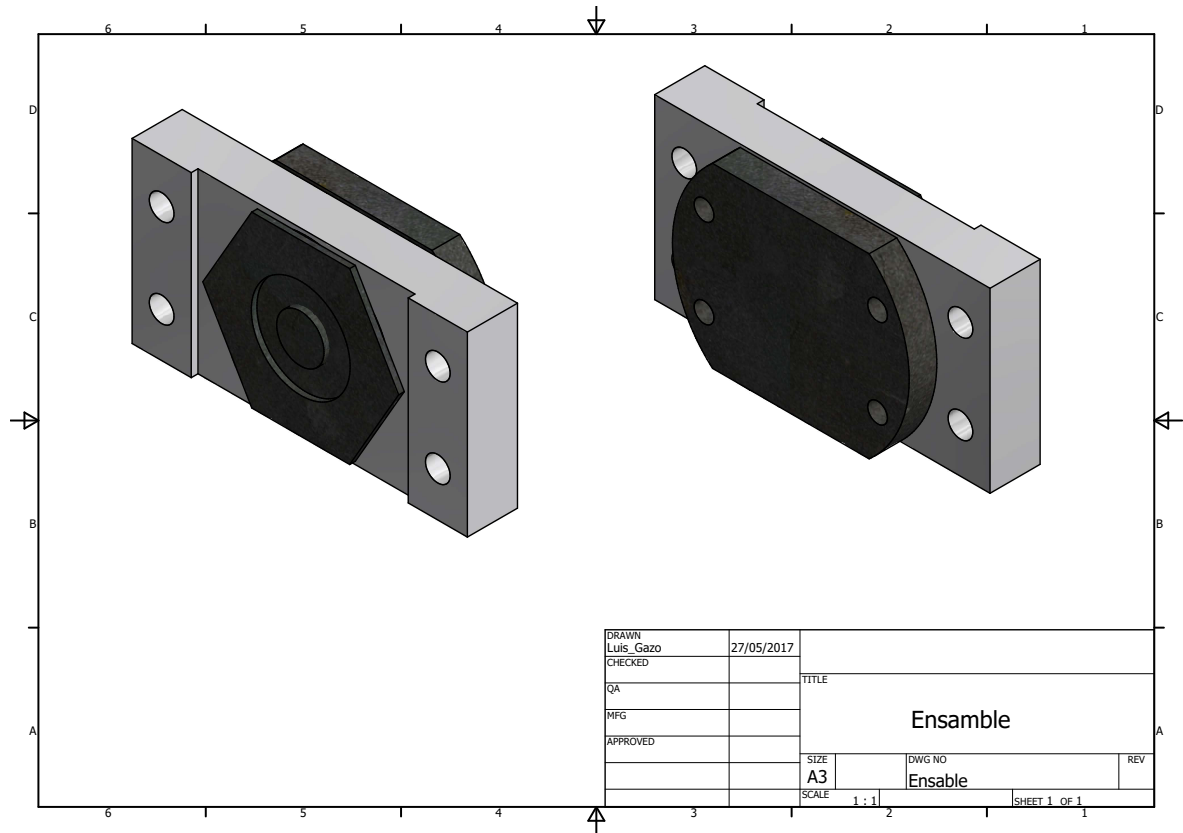


Figura A.6: Ensamble.

Apéndice B

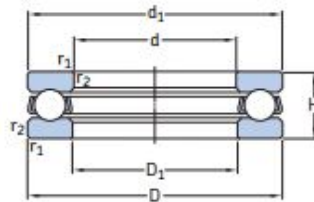
MECHANICAL PROPERTIES Heat Treated Condition	Condition	Ruling section mm	Tensile Strength MPa	Yield Strength MPa	Elong. %	Izod Impact J	Brinell Hardness
	R	250	780-850	480	15	34	201-255
	S	250	770-930	540	13	27	223-277
	S	150	770-930	570	15	54	223-277
	T	100	850-1000	665	13	54	248-302
	U	63	930-1080	740	12	47	269-331
	V	30	1000-1150	835	12	47	293-352
	W	20	1080-1230	925	12	40	311-375

Figura B.1: Propiedades del acero 4140 bonificado.

☐ **Material(s)**

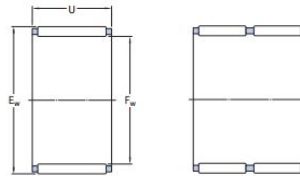
Name	Aluminum 6061	
General	Mass Density	2,7 g/cm ³
	Yield Strength	275 MPa
	Ultimate Tensile Strength	310 MPa
Stress	Young's Modulus	68,9 GPa
	Poisson's Ratio	0,33 ul
	Shear Modulus	25,9023 GPa
Part Name(s)	AgarreArmazon_prueba1	
Name	Generic	
General	Mass Density	7,86109 g/cm ³
	Yield Strength	479,999 MPa
	Ultimate Tensile Strength	699,997 MPa
Stress	Young's Modulus	210,014 GPa
	Poisson's Ratio	0,3 ul
	Shear Modulus	80,7747 GPa
Part Name(s)	Eje_prueba1 Tapa_Inventor	

Figura B.2: Configuración del software inventor con las especificaciones de los materiales.



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Factor de carga mínima A	Velocidades nominales		Masa	Designación
d	D	H	dinámica C	estática C_0			Velocidad de referencia	Velocidad límite		
mm			kN		kN	-	r. p. m.		kg	-
35	52	12	19,9	51	1,86	0,013	5 600	7 500	0,08	51107
	62	18	35,1	73,5	2,7	0,028	4 000	5 600	0,22	51207
	68	24	49,4	96,5	3,55	0,048	3 400	4 800	0,39	51307
	90	32	76,1	137	5,1	0,15	2 600	3 600	0,79	51407
40	60	13	25,5	63	2,32	0,02	5 000	7 000	0,12	51108
	68	19	44,2	96,5	3,6	0,058	3 800	5 300	0,28	51208
	78	26	61,8	122	4,5	0,077	3 000	4 300	0,53	51308
	90	36	95,6	183	6,8	0,26	2 400	3 400	1,1	51408
45	65	14	26,5	69,5	2,55	0,025	4 500	6 300	0,14	51109
	73	20	39	86,5	3,2	0,038	3 600	5 000	0,3	51209
	85	28	76,1	153	5,6	0,12	2 800	4 000	0,66	51309
	100	39	124	240	9	0,37	2 200	3 000	1,4	51409
50	70	14	27	75	2,8	0,029	4 300	6 300	0,16	51110
	78	22	49,4	116	4,3	0,069	3 400	4 500	0,37	51210
	95	31	81,9	170	6,3	0,19	2 600	3 600	0,94	51310
	110	43	159	340	12,5	0,6	2 000	2 800	2	51410
55	78	16	30,2	81,5	3	0,039	3 800	5 300	0,23	51111
	90	25	58,5	134	4,9	0,11	2 800	4 000	0,59	51211
	105	35	101	224	8,3	0,26	2 200	3 200	1,3	51311
	120	48	195	400	14,6	0,79	1 800	2 400	2,55	51411
60	85	17	41,6	122	4,55	0,077	3 600	5 000	0,27	51112
	95	26	59,2	140	5,1	0,12	2 800	3 800	0,65	51212
	110	35	101	224	8,3	0,26	2 200	3 000	1,35	51312
	130	51	199	430	16	0,96	1 600	2 200	3,1	51412 M
65	90	18	37,7	108	4	0,06	3 400	4 800	0,33	51113
	100	27	60,5	150	5,5	0,14	2 600	3 600	0,72	51213
	115	36	106	240	8,8	0,3	2 000	3 000	1,5	51313
	140	56	216	490	18	1,2	1 500	2 200	4	51413 M

Figura B.3: Catálogo de los rodamientos de bolas o radiales SKF.



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades nominales		Masa	Designación	Sello adecuado ⁴⁾ Designación
F_w	E_w	U	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite			
mm			kN		kN	r. p. m.		g	-	-
64	70	16	26,4	60	7,35	6 300	7 500	53	K 64x70x16	=
65	70	20	29,2	76,5	9,3	6 300	7 500	56	K 65x70x20	=
	70	30	41,8	125	15,3	6 300	7 500	83	K 65x70x30	=
	73	23	44	95	11,6	6 300	7 000	108	K 65x73x23	=
	73	30	53,9	125	15,6	6 300	7 000	141	K 65x73x30	=
68	74	20	33,6	83	10,4	6 000	7 000	71	K 68x74x20	=
	74	30	44,6	118	15	6 000	7 000	100	K 68x74x30	=
	74	35	46,8	125	15,3	6 000	7 000	120	K 68x74x35 ZW	=
70	76	20	34,1	86,5	10,6	6 000	6 700	71	K 70x76x20	=
	76	30	50,1	140	17,6	6 000	6 700	110	K 70x76x30	=
	78	30	57,2	137	17	6 000	6 700	148	K 70x78x30	G 70x78x5
72	80	20	39,6	85	10,6	5 600	6 300	98	K 72x80x20	=
73	79	20	35,2	90	11,2	5 600	6 300	75	K 73x79x20	=
75	81	20	35,8	93	11,6	5 600	6 300	79	K 75x81x20	=
	81	30	50,1	143	18	5 600	6 300	114	K 75x81x30	=
	83	23	47,3	110	13,7	5 300	6 300	124	K 75x83x23	=
	83	30	59,4	143	18	5 300	6 300	147	K 75x83x30	=
	83	35	60,5	146	18	5 300	6 300	182	K 75x83x35 ZW	=
	83	40	69,3	176	22	5 300	6 300	211	K 75x83x40 ZW	=
80	86	20	36,9	98	12,2	5 300	6 000	60	K 80x86x20	=
	88	30	68,2	176	22	5 000	6 000	138	K 80x88x30	=
	88	40	72,1	193	23,6	5 000	6 000	227	K 80x88x40 ZW	=
	88	46	84,2	232	28,5	5 000	6 000	260	K 80x88x46 ZW	=
85	92	20	42,9	108	13,2	4 800	5 600	102	K 85x92x20	=
90	97	20	42,9	114	13,7	4 500	5 300	109	K 90x97x20	=
	98	27	58,3	150	18,6	4 500	5 300	150	K 90x98x27	=
	98	30	64,4	173	21,6	4 500	5 300	172	K 90x98x30	=
95	103	30	66	180	22,8	4 300	5 000	165	K 95x103x30	=
	103	40	79,2	228	28,5	4 300	5 000	266	K 95x103x40 ZW	=
100	107	21	45,7	127	15,3	4 000	4 800	120	K 100x107x21	=
	108	27	55	143	17,6	4 000	4 800	185	K 100x108x27	=
	108	30	67,1	190	23,6	4 000	4 800	180	K 100x108x30	=
105	112	21	45,7	129	15,3	4 000	4 500	129	K 105x112x21	=
110	117	24	53,9	160	18,6	3 800	4 300	172	K 110x117x24	=
	118	30	73,7	220	26,5	3 800	4 300	217	K 110x118x30	=
115	123	27	60,5	170	20	3 600	4 000	200	K 115x123x27	=
120	127	24	56,1	176	20,4	3 400	4 000	165	K 120x127x24	=

Figura B.5: Catálogo de los rodamientos de agujas SKF.