



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, ENSAMBLE Y PRUEBAS DE UN ROBOT PARALELO 3UPS + 1RPU PARA REHABILITACIÓN DE RODILLA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

NAVARRETE CISNEROS JOSUÉ RICARDO
josue.navarrete@epn.edu.ec

SÁNCHEZ RUÍZ GEOVANNY XAVIER
geovanny.sanchez01@epn.edu.ec

DIRECTOR:
NG. ZAMBRANO OREJUELA OSCAR IVÁN, MSC.
ivan.zambrano@epn.edu.ec

Quito, diciembre 2019

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Josué Ricardo Navarrete Cisneros** y **Geovanny Xavier Sánchez Ruíz**, bajo mi supervisión.

Ing. Zambrano Iván

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros, **Josué Ricardo Navarrete Cisneros y Geovanny Xavier Sánchez Ruíz**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Josué Ricardo Navarrete Cisneros

Geovanny Xavier Sánchez Ruíz

DEDICATORIA

A mi familia por haberme apoyado durante todo el trayecto en la universidad, gracias a ellos he logrado cumplir una de las metas más importantes en mi vida, cada uno cumplió con su pequeño papel en todo esto, en especial mis padres que han sabido guiarme por el camino correcto y de la manera adecuada.

Josué Ricardo Navarrete Cisneros

DEDICATORIA

Dedico este trabajo escrito a mi familia, quienes estuvieron presentes a lo largo de este trayecto brindándome su apoyo incondicional y su comprensión.

Aquellas personas llamadas amigos, cuyo acompañamiento, convivencia y bromas en esta etapa de mi vida me permitieron convertirme en una mejor persona.

Geovanny Xavier Sánchez Ruíz

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres, hermanos y sobrinos, que me han dado el apoyo y la confianza necesaria para siempre seguir adelante.

A mis amigos: Santiago, Cristian, Andrés, Steven y Edison, aquellos con los que he compartido momentos geniales, junto con Jos y Genesis.

En la universidad agradezco a todos los que me han ayudado a ver la vida de una manera más sencilla o a veces más complicada, aquellos que aconsejas y te aconsejan, aquellos con los que das y recibes abrazos de sinceridad; unidos por una meta común. Gracias a Karina y Jessy, las amigas inseparables, con las cuales empezamos y terminamos juntos este arduo camino, pero con una amistad mucho más fortalecida. A Joss, Kevin y Teo que han hecho de la universidad un lugar divertido y menos estresante que, junto con Aldair, John, Danny, David, David G., Xavier, Henry, Lized, Miguel y Geison crearon un ambiente de confianza, apoyo y amistad. A Guadalupe que ha sido como una hermana que aprecio de corazón.

A Gary que ha sido una gran persona y amigo desde el inicio de la carrera.

Esas grandes amistades que agradezco que hayan perdurado junto a mi desde prepo: Gaby M; Bryan; David, que siempre ha sido una persona seria y sincera, y a Caty que pese a tanta distancia siempre contamos con el apoyo de forma mutua.

A CromosomaZ que han sido el suspiro de estrés y diversión, pero más que nada, han sido los protagonistas de una alegría enorme en mi vida, gracias muchachos.

A nuestro apreciado director del proyecto, Ing. Iván Zambrano, por brindarnos la oportunidad de participar en este proyecto que, a pesar de su complejidad de desarrollo y obstáculos sumamente difíciles de superar, nos ha servido para adquirir ciertas destrezas profesionales y más que todo, me ha hecho entender que el trabajo duro es gratificante cuando el esfuerzo y el sacrificio están de por medio.

Continuando con los agradecimientos, no podría haber llegado tan lejos de no ser por las personas que nos han ayudado durante todo el proyecto: Henry, Gaby, Lucy, Francis y Naty; que también han puesto su granito de arena en este trabajo tan significativo para mí.

Y finalmente, a la persona que ha estado a mi lado desde el inicio de mi carrera universitaria, quien me ha brindado su apoyo incondicional, su tiempo y cariño. Vivi muchas gracias por permanecer en mi vida y luchar a mi lado.

Josué Ricardo Navarrete Cisneros

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que en algún punto de mi camino llamado vida me sirvieron como apoyo, símbolos de esfuerzo y consejeros convirtiéndose en parte importante.

Al Ing. Iván Zambrano por ser el impulsor y guía en este presente proyecto.

Geovanny Xavier Sánchez Ruíz

ÍNDICE

DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
1 MARCO TEÓRICO	3
1.1 Robots paralelos.....	3
1.1.1 Manipuladores completamente paralelos.....	3
1.2 Clasificación del robot paralelo.	5
1.2.1. Robot delta.	5
1.2.2. Robots paralelos impulsados por cable.....	6
1.3. Planos y ejes del movimiento del cuerpo humano.....	6
1.3.1.Planos.....	6
1.3.2. Ejes.....	7
1.4. Movimientos principales de la rodilla.....	7
1.4.1. Flexo-extensión.....	7
1.4.2. Rotación.....	8
1.5. Tipos de robots para la rehabilitación de miembros inferiores.....	8
1.5.1. Exoesqueletos	8
1.5.2. Entrenadores de la marcha.....	9
1.5.3. Sistemas para rehabilitación de miembros inferiores.	10
1.6. Elementos de sujeción.....	10
1.6.1. Rigidez de elementos de sujeción.....	10
1.6.2. Rigidez de miembros a sujetar.....	12
1.6.3. Constante de rigidez	13
1.6.4. Tensión externa en elementos de sujeción	13
1.7. Elementos utilizados para el análisis de movimiento.....	14

1.7.1. Kinovea.....	14
1.7.2. Módulo MPU-6050 por medio del módulo Arduino	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Antecedentes del robot paralelo.....	15
2.2. Selección de componentes del robot	16
2.2.1. Selección de componentes sin necesidad de adaptación	16
2.2.2. Selección de componentes con necesidad de adaptación	24
2.3. Diseño de plataformas y elementos para las juntas	27
2.3.1. Diseño de elementos para la pata UPS (pata 1, 2 y 3).....	27
2.3.2. Diseño de elementos para la pata RPU (pata 4)	28
2.3.3. Diseño de la plataforma móvil.....	36
2.3.4. Diseño de la plataforma fija.....	39
2.4. Elementos de sujeción	42
2.4.1. Elementos de sujeción de la pata 4.....	42
2.4.2. Elementos de sujeción de las patas 1, 2 y 3	45
2.5. Construcción y ensamble del robot paralelo 3UPS-1RPU	48
2.5.1. Construcción de las piezas	48
2.5.2. Ensamble del robot paralelo.....	50
2.6. Protocolo de pruebas mecánicas de funcionalidad	54
2.7. Costos del robot.....	56
2.7.1. Costo de materia prima.....	56
2.7.2. Costo de insumos	57
2.7.3. Costos de elementos normalizados	58
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	60
3.1. Resultados.....	60
3.1.1. Plataformas móvil y fija	60
4. CONCLUSIONES	68
4.1.1. Recomendaciones	68
Referencias Bibliográficas	69
Anexos.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Robot paralelo con sus partes principales.....	3
Figura 1.2. Robot planar.	4
Figura 1.3. Robot espacial.	4
Figura 1.4. Robot paralelo tipo delta.	6
Figura 1.5. Partes de un robot paralelo impulsado por cables.....	6
Figura 1.6. Planos y ejes de la movilidad del cuerpo humano.....	7
Figura 1.7. Flexión de rodilla a partir de la posición cero	8
Figura 1.8. Extensión pasiva de rodilla a partir de la posición cero	8
Figura 1.9. Rotación externa e interna de cadera derecha a partir de la posición cero. 8	
Figura 1.10. Exoesqueleto cyberdyne.....	9
Figura 1.11. Entrenador de marcha.	9
Figura 1.12. Máquina de ejercicios terapéuticos en la rehabilitación de rodilla.....	10
Figura 1.13. Partes de elementos de sujeción (pernos)	10
Figura 1.16. Partes de elementos de sujeción(tornillos	12
Figura 2.1. Prototipo virtual del robot paralelo 3UPS+RPU SolidWorks	15
Figura 2.2. Robot paralelo 3UPS+1RPU.....	16
Figura 2.3. Cilindro electromecánico Festo ESBF_BS-32-100-10P.....	17
Figura 2.4. Brida basculante SNCL.....	18
Figura 2.5. Brida basculante SNCB-32-R3.....	18
Figura 2.6. Junta de revolución ensamblada.....	19
Figura 2.7. Ángulos de desplazamiento junta de revolución.....	19
Figura 2.8. Conjunto paralelo Festo EAMM-U-50-D32	20
Figura 2.9. Manguito de fijación Festo EAMH-50-5-C13.6.	21
Figura 2.10. Gráfica del torque de fricción en función de la velocidad.....	22
Figura 2.11. Gráfica del torque efectivo en función de la velocidad.....	23
Figura 2.12. motor Maxon 148877 3D SolidWorks.....	23
Figura 2.13. Junta esférica Cicrosa.....	24
Figura 2.14. Dibujo 3D de junta esférica con agujeros para rosca (A).....	25
Figura 2.15. Dibujo 3D de junta esférica con agujeros para rosca (B).....	25
Figura 2.16. Dibujo 3D en SolidWorks de Junta universal Belden.....	26
Figura 2.17. Dibujo 3D en SolidWorks de junta universal Belden maquinada.	26
Figura 2.18. Acople para la junta universal	27
Figura 2.19. Acople para la junta esférica.	28
Figura 2.20. Acople para la junta de revolución.	28
Figura 2.21. Acople para el vástago de la junta prismática.	29
Figura 2.22. Eje para la junta universal de la pata 4.	29
Figura 2.23. Cargas externas aplicadas al eje.	30
Figura 2.24. Espesores y elementos para el análisis del eje.	30
Figura 2.25. Cargas aplicadas al eje de la pata 4 del robot paralelo 3UPS+1RPU.....	30
Figura 2.26. Carga total del sistema actuando sobre el rodamiento a 45°	32
Figura 2.27. Carga total del sistema actuando sobre el rodamiento a 0°	34
Figura 2.28. Chumacera.	35
Figura 2.29. Acople para la junta universal de la pata 4.	35
Figura 2.30. Soporte eje-rodamiento.....	36
Figura 2.31. Modelo final de la junta universal con rodamiento.....	36
Figura 2.32. Análisis de plataforma móvil de acero inoxidable 304 de espesor 3mm. 37	
Figura 2.33. Análisis de plataforma móvil de acero inoxidable con espesor 4mm.	38

Figura 2.34. Análisis de plataforma móvil de aluminio AA3003 H14 con espesor de 6mm.	38
Figura 2.35. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 1.	40
Figura 2.36. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 2.	40
Figura 2.37. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 3.	41
Figura 2.38. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 4.	41
Figura 2.39. Elementos de sujeción de juntas universales y revolución.	42
Figura 2.40. Diagrama de cuerpo libre de la pata 4.	42
Figura 2.41. Representación en corte de los agujeros roscados en la junta universal.	45
Figura 2.42. Ensamble de eje, rodamiento y chumacera.	51
Figura 2.43. Junta universal de la pata 4.	51
Figura 2.44. Conjunto paralelo ensamblado con el motor y el actuador.	51
Figura 2.45. Elementos de transmisión del conjunto paralelo.	52
Figura 2.46. Ensamble de la junta de revolución de la pata 4.	52
Figura 2.47. ensamble de la junta universal de las patas 1, 2 y 3	53
Figura 2.48. Ensamble de la junta esférica.	53
Figura 2.49. Estado inicial del robot paralelo 3UPS+1RPU	54
Figura 2.50. Sistemas de coordenadas del robot paralelo 3UPS+1RPU.	54
Figura 2.51. Dimensionamiento de los planos XY, XZ y ZY.	55
Figura 2.52. Elementos usados en la medición de movimientos alrededor de los ejes Ym y Zm.	55
Figura 3.1. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión de cadera.	61
Figura 3.1. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de rodilla.	62
Figura 3.2. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de rotación interna y externa de rodilla con rotación ψ	63
Figura 3.3. Angulo negativo de rotación del robot del robot paralelo 3UPS+1RPU alrededor del eje Z.	64
Figura 3.4. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de rotación interna y externa de rodilla con rotación $-\psi$	65
Figura 3.5. Angulo positivo de rotación del robot paralelo 3UPS+1RPU alrededor del eje Z.	66
Figura 3.6. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de tobillo con rotación Θ	66
Figura 3.7. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de tobillo con rotación $-\Theta$	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Combinación de mecanismos espaciales.....	5
Tabla 1.2. Parámetros de rigidez de varios materiales.....	13
Tabla 2.1. Partes del robot paralelo.	16
Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del cilindro electromecánico Festo ESBF_BS-32-100-10P.....	17
Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de brida basculante SNCL-32.....	18
Tabla 2.4. Especificaciones técnicas brida basculante SNCB-32-R3.....	18
Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de junta de revolución SNCL/SNCB.....	19
Tabla 2.6. Especificaciones técnicas conjunto paralelo EAMM-U-50-D32.....	20
Tabla 2.7. Especificaciones técnicas manguito de fijación EAMH-50-5-C13.6.....	21
Tabla 2.8. Cálculo del torque necesario para el motor.	23
Tabla 2.9. Especificaciones técnicas junta esférica Cicrosa 123R.....	24
Tabla 2.10. Separación de cargas aplicadas al eje.	31
Tabla 2.11. Análisis estático del eje de la pata 4.....	31
Tabla 2.12. Cálculos para selección del rodamiento (Caso 1).....	33
Tabla 2.13. Cálculos para selección del rodamiento (Caso 2).....	34
Tabla 2.14. Pesos de las patas del robot.	39
Tabla 2.15. Pesos para la base de cada pata del robot.	39
Tabla 2.16. Cargas externas aplicadas al robot paralelo 3UPS+1RPU.....	43
Tabla 2.17. Analisis de elementos de sujeción (pernos).	43
Tabla 2.18. Análisis de rigidez de los miembros a sujetar.....	44
Tabla 2.19. Análisis de rigidez de varios materiales.....	44
Tabla 2.20. Análisis de la constante de rigidez.	44
Tabla 2.21. Análisis de la tensión externa del perno.	45
Tabla 2.22. Análisis de pernos.....	46
Tabla 2.23. Análisis de elementos de sujeción (tornillos).	46
Tabla 2.24. Análisis de la rigidez de miembros a sujetar.....	46
Tabla 2.25. Rigidez total de los miembros.	47
Tabla 2.26. Análisis de constante de rigidez.....	47
Tabla 2.27. Análisis de la tensión externa en el tornillo.....	47
Tabla 2.28. Elementos fabricados en un centro de mecanizado CNC.....	48
Tabla 2.29. Elementos fabricados en un torno paralelo.	49
Tabla 2.30. Tornillos utilizados para el ensamble.....	50
Tabla 2.31. Tuercas utilizadas para el ensamble.	50
Tabla 2.32. Arandelas utilizadas para el ensamble.	50
Tabla 2.33. Costos de materia prima.	56
Tabla 2.34. Costos de insumos.....	57
Tabla 2.35. Costos de elementos normalizados.....	58
Tabla 2.36. Costos de mano de obra.	59
Tabla 2.37. Costos generales del robot.....	59
Tabla 3.0.1. Resultados de la simulación de la plataforma móvil.	60

RESUMEN

El presente trabajo busca obtener el diseño mecánico, construcción y pruebas mecánicas del robot paralelo tipo 3UPS+RPU para rehabilitación de rodilla, para el cual se tienen investigaciones previas realizadas por la Escuela Politécnica Nacional que han logrado la obtención de un modelo dinámico con el cual se realiza las respectivas validaciones prácticas. En el presente proyecto se elaboran los cálculos de esfuerzos y deformaciones obteniendo el diseño y fabricación de acoples y plataformas; además de la selección adecuada de componentes. Una vez ensamblado el robot paralelo se realizan las pruebas mecánicas en las que se comparan los valores resultantes del modelo matemático con el diseño final del robot, estas pruebas se las realiza por medio de un giroscopio que permite la obtención de los ángulos de inclinación de la plataforma móvil y también por medio del software Kinovea el cual ayuda a la medición de las longitudes de los actuadores prismáticos y de ciertos ángulos de inclinación. Para finalizar este trabajo se tiene un listado de costos de todos los elementos utilizados para este robot incluyendo la parte mecánica y electrónica.

Palabras clave: diseño, ensamble, pruebas mecánicas, rehabilitación de rodilla, robot paralelo

ABSTRACT

The present work seeks to obtain the Mechanical design, construction and Mechanical tests of the parallel robot for knee rehabilitation type 3UPS + 1RPU, for which research has been carried out by Escuela Politécnica Nacional that have achieved the obtaining of a dynamic model with which the respective practical validations were carried out. In this project, stress and strain calculations are carried out to obtain the design and manufacture of couplings and platforms, in addition to the appropriate selection of components. Once the parallel robot is assembled, the mechanical tests are performed in which the resulting values of the mathematical and they are compared with the final design of the robot, these tests are carried out by means of a gyroscope that allows obtaining the angles of the orientation of the mobile platform and also through the Kinovea software which helps to measure the length of the prismatic actuators and the inclination angles. To finish this work, you have a list of costs of all the elements used for this robot that includes the mechanical and electronic parts.

Keywords: design, assembly, mechanical testing, knee rehabilitation, parallel robot.

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN, ENSAMBLE Y PRUEBAS DE UN ROBOT PARALELO 3UPS + 1RPU PARA REHABILITACIÓN DE RODILLA.

INTRODUCCIÓN

Un robot paralelo se define como una máquina cinemática paralela o manipulador paralelo que basa su funcionamiento en mecanismos de cadenas cinemáticas cerradas, formando un sistema electromecánico gobernado por un programa de computadora o un control eléctrico y/o electrónico (Briot & Khalil, 2015). Por otro lado, los robots paralelos han sido desarrollados con el fin de satisfacer distintas aplicaciones como: pick and place, centros de mecanizado, cirugía robótica y rehabilitación (Díaz, 2018). De la mayoría de las investigaciones realizadas en este tipo de robots se determina que pueden clasificarse según las características de movimiento teniendo en cuenta los grados de libertad (Merlet, 2006)

En cuanto a la construcción de mecanismos paralelos, se forman por dos eslabones llamados plataformas: uno fijo que forma la base, y uno móvil ubicado en la parte superior, estas plataformas están unidas por patas fijas a la base, para mejorar la dinámica del robot (Isidro, 2012). Para el caso en particular del robot paralelo 3UPS+1RPU cuenta con articulaciones primaticas, esféricas, de revolución y universales.

En Ecuador, en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional (EPN), la elaboración del prototipo del robot paralelo 3UPS+1RPU forma parte del proyecto PIMI N° EPN-15-04-2018-010-MP. La configuración del robot cuenta con tres eslabones prismáticos (unidos mediante un par universal y uno esférico), y un eslabón prismático unido mediante un par de revolución y un par universal (Armas, 2018).

El presente proyecto cuenta con la finalidad de la creación y fabricación de los componentes (juntas y acoples) necesarios para el completo ensamble del robot paralelo 3UPS+1RPU.

En la etapa final, para asegurar la correcta funcionalidad del robot paralelo 3UPS+1RPU se valida con el modelo dinámico no lineal desarrollado por (Pulloquina, 2018) mediante el uso del software de análisis de movimiento conocido como Kinovea.

Objetivo general

Diseñar, construir, ensamblar y realizar las pruebas mecánicas de un robot 3UPS+1RPU para rehabilitación de rodilla.

Objetivos específicos

- Seleccionar y fabricar los componentes adecuados para la construcción del robot paralelo.
- Realizar el montaje y pruebas de funcionamiento del robot paralelo 3UPS+1RPU.
- Validar con un protocolo de pruebas mecánicas y análisis de resultados del robot paralelo.
- Determinar la coincidencia entre las simulaciones en Matlab y el mecanismo real del robot paralelo.
- Obtener un análisis de costos del robot paralelo 3UPS+1RPU.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Robots paralelos

Un robot paralelo consta de dos plataformas, una fija y otra móvil, esta última conocida como efector final o plataforma móvil, Figura 1.1 La plataforma móvil está vinculada a la base a través de cadenas cinemáticas independientes, que tienden a ser simétricas y están unidas a las plataformas a través de diferentes tipos de uniones, como prismáticas, revolución, universales y esféricas (Blanco, Antunez, & Abundez, 2019)

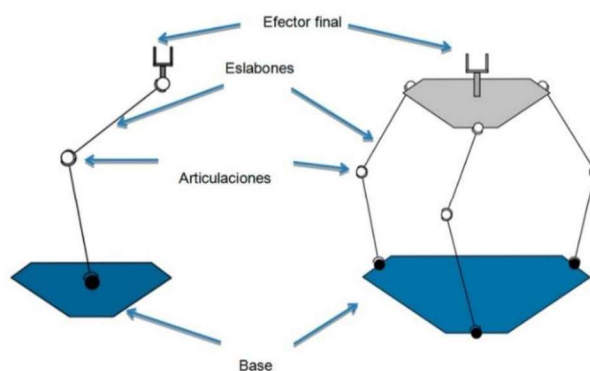


Figura 1.1. Robot paralelo con sus partes principales.
(Fuente: (Taghirad, 2013))

1.1.1 Manipuladores completamente paralelos.

Los robots paralelos para los cuales el número de cadenas es estrictamente igual al número de G.D.L. del efector final se llaman manipuladores totalmente paralelos. Este tipo de robot se determinan mediante la ecuación definida por Gosselin:

$$P(n - 6) = -6$$

Ecuación 1.1

Donde:

P: representa el número de cadenas.

n: número de cuerpos rígidos dentro de una cadena.

La definición de manipuladores totalmente paralelos nos permite caracterizar cadenas. Existen dos casos principales: robots planares (tres grados de libertad en el plano), y robots espaciales que no se mueven solo dentro de un plano.

Robot planar

Como se observa en la Figura 1.2 este tipo de robot se caracteriza por tener un efector con tres grados de libertad, un efector final con tres grados de libertad, dos traslacionales y un rotacional. Tres cadenas soportan el efector final; las cadenas están unidas al efector final en tres puntos y genéricamente el efector final es un triángulo (Merlet, 2006).

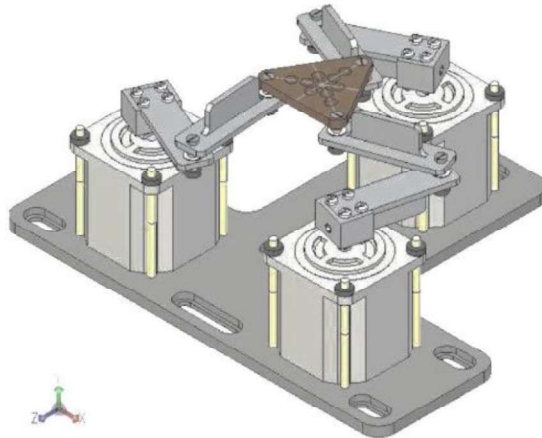


Figura 1.2. Robot planar.
(Fuente: (Juan & Yordy, 2015))

Robot espacial

De acuerdo a la Figura 1.3 este robot se caracteriza por tener la capacidad de desenvolverse en todo el espacio tridimensional, pueden tener hasta 6 grados de libertad (Juan & Yordy, 2015).

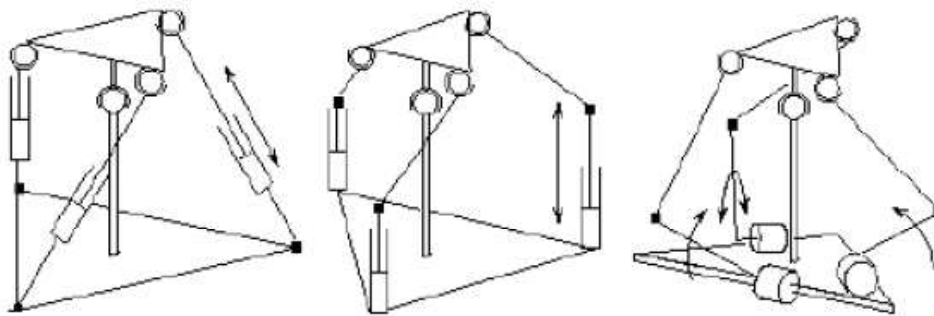


Figura 1.3. Robot espacial.
(Fuente: (Juan & Yordy, 2015))

1.2 Clasificación del robot paralelo.

Los mecanismos paralelos pueden ser clasificados por su propiedad de movilidad, tomando como ejemplo los robots paralelos de dos G.D.L. clasificados en tres categorías: RR., TT y RT donde:

R: indica movilidad rotacional.

T: indica movilidad traslacional.

La combinación de las juntas para este tipo de robot paralelo puede presentar dos libertades rotacionales, dos traslacionales, una libertad rotacional y otra traslacional respectivamente.

Para los mecanismos espaciales, hay 12 tipos de libertad por propiedad de movilidad, como se indica en la Tabla 1.1

Tabla 1.1. Combinación de mecanismos espaciales.

Numero	Grados de libertad	Combinación de movilidad
1	2	RR, TT, RT
2	3	RRR, TTT, RRT, TTR
3	4	RRRT, TTTR, RRTT
4	5	RRRT, TTTR

(Fuente: (Juan & Yordy, 2015))

1.2.1. Robot delta.

Un robot delta es un tipo de robot paralelo que consta de tres patas conectados a uniones universales en la base, Figura 1.4. La característica clave del diseño es el uso de paralelogramos en las patas, que mantienen la orientación del efector final.

Un robot Delta es un robot paralelo, que también puede verse como una generalización espacial de un mecanismo plano de cuatro barras. Tiene cuatro grados de libertad: tres traslacionales y uno rotacional. El concepto clave de un robot delta es el uso de paralelogramos. Un paralelogramo permite que un enlace de salida permanezca en una orientación fija con respecto a un enlace de entrada. El uso de tres de estos paralelogramos restringe completamente la orientación de la plataforma móvil, que permanece solo con tres grados de libertad puramente traslacionales. La base del robot es montada encima del espacio de trabajo. Todos los actuadores se encuentran en esta base.



Figura 1.4. Robot paralelo tipo delta.
(Fuente: (Taghirad, 2013))

1.2.2. Robots paralelos impulsados por cable.

Los robots paralelos impulsados por cables están conformados por controladores de cables eléctricos, en reemplazo de actuadores lineales de manipuladores paralelos, lo que conduce inmediatamente a un mayor espacio de trabajo. La Figura 1.5 indica las partes del robot mencionado.

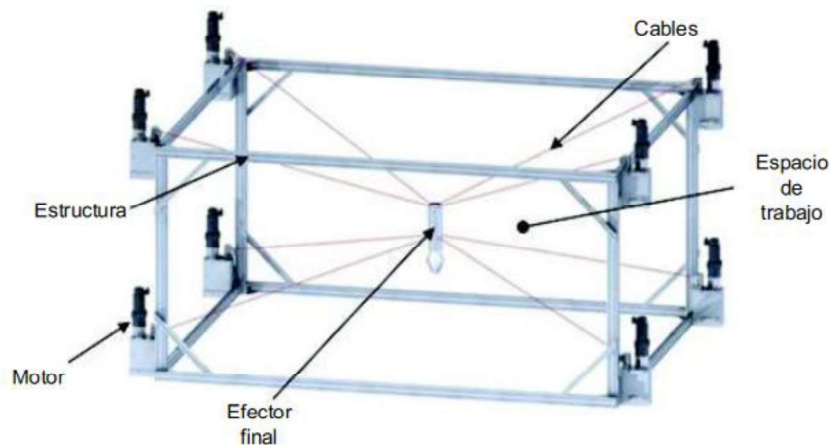


Figura 1.5. Partes de un robot paralelo impulsado por cables.
(Fuente: (Aguas, 2018))

1.3. Planos y ejes del movimiento del cuerpo humano

1.3.1. Planos

La movilidad articular realizada por el cuerpo humano se desarrolla en tres planos principales, Figura 1.6 conocidos como:

- Plano sagital medio: plano vertical que se extiende en dirección anteroposterior y divide el cuerpo en las porciones derecha e izquierda.

- Plano coronal o frontal: plano vertical perpendicular al plano sagital, dividiendo al cuerpo en las porciones anterior y posterior.
- Plano transverso u horizontal: plano transversal horizontal que divide el cuerpo en las secciones superior e inferior, y se extiende en ángulo recto respecto a los otros dos planos, siendo el plano movimiento rotacional.

1.3.2. Ejes

La mayoría de los movimientos articulares se producen rotacionalmente y actúan sobre una línea perpendicular al plano de movimiento, Figura 1.6. Existen tres ejes de rotación clasificándolos en:

- Eje sagital: pasa horizontalmente desde la mitad posterior a la anterior del cuerpo, es formado por la intersección del plano sagital con el plano horizontal.
- Eje frontal: pasa horizontalmente de izquierda a derecha y es formado por la intersección de los planos frontal y horizontal.
- Eje vertical o longitudinal: pasa verticalmente de la mitad inferior a la superior del cuerpo, siendo formado por la intersección entre los planos sagital y frontal.

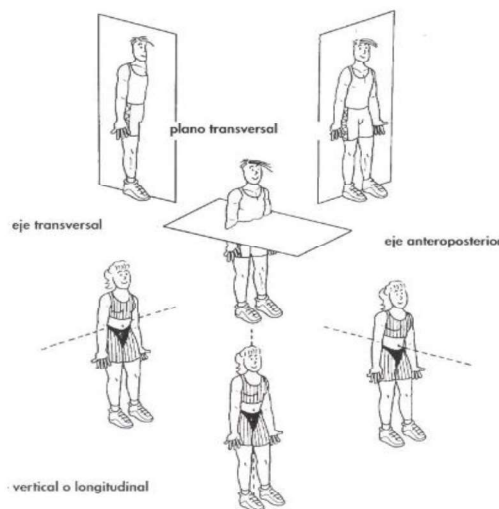


Figura 1.6. Planos y ejes de la movilidad del cuerpo humano.
(Fuente: (Chaparro, 2014))

1.4. Movimientos principales de la rodilla.

1.4.1. Flexo-extensión.

El rango de movilidad normal para la flexión, Figura 1.7 es de 130°-140° grados y se realiza sobre un eje transversal en el plano sagital. Este eje presenta cierta oblicuidad

(inferior en la cara medial). La flexo-extensión, Figura 1.8 se comprende basándonos en un modelo planar de dos grados de libertad que permite los movimientos de rodamiento (rotación anteroposterior) y de deslizamiento (traslación anteroposterior)

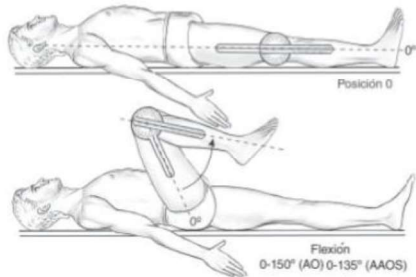


Figura 1.7. Flexión de rodilla a partir de la posición cero.
(Fuente: (Ataugard, 2019))

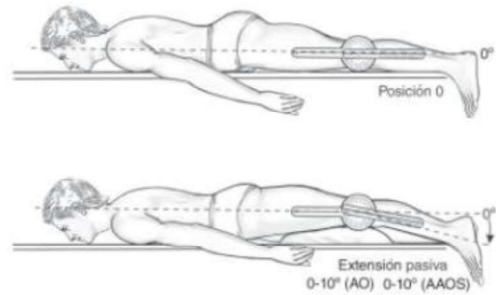


Figura 1.8. Extensión pasiva de rodilla a partir de la posición cero.
(Fuente: (Ataugard, 2019))

1.4.2. Rotación.

Este movimiento sólo es posible durante la flexión y se realiza sobre el eje longitudinal de la rodilla. La rotación interna máxima es de 30°-35°, mientras que la externa es de 40°-50°, Figura 1.9.

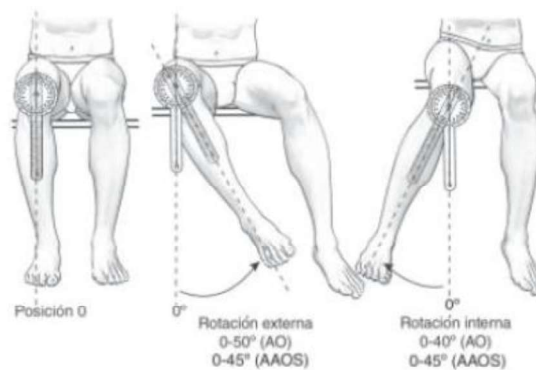


Figura 1.9. Rotación externa e interna de cadera derecha a partir de la posición cero.
(Fuente: (Ataugard, 2019))

1.5. Tipos de robots para la rehabilitación de miembros inferiores.

1.5.1. Exoesqueletos

Sistema biomecánico, donde el mecanismo se encuentra adaptado a la estructura física del cuerpo humano. Con un control que puede estar conectado a las mismas señales del cerebro. Con actuadores analógicos que generan o reproducen las

funciones del cuerpo. Actuando como un sólo sistema integrado que puede desarrollar varias actividades, Figura 1.10. (Ayala, 2016).



Figura 1.10. Exoesqueleto cyberdyne.
(Fuente: (Álvarez, 2018))

1.5.2. Entrenadores de la marcha.

Sistema avanzado de soporte de peso corporal combinado con una banda caminadora. Los motores son controlados y sincronizados, de manera precisa por computadora, con la velocidad de la banda caminadora, moviendo las piernas del paciente por medio de trayectorias que imitan los patrones fisiológicos de la marcha. Además, una interfaz permite al terapeuta operar fácilmente el equipo y ajustar los parámetros de entrenamiento a las necesidades de cada paciente, Figura 1.11. (Lokomat, 2014).



Figura 1.11. Entrenador de marcha.
(Fuente: (Lokomat, 2014))

1.5.3. Sistemas para rehabilitación de miembros inferiores.

Máquina de ejercicios terapéuticos para mover las articulaciones de la cadera y rodilla de pacientes con espasticidad. Moughamir y otros desarrollaron una máquina para entrenamiento y rehabilitación de miembros inferiores llamado Multilso. Hashimoto y otros desarrollaron un manipulador de tres G.D.L. (grados de libertad) para sostener los miembros inferiores durante la rehabilitación de cadera y rodilla en el plano sagital, Figura 1.12.



Figura 1.12. Máquina de ejercicios terapéuticos en la rehabilitación de rodilla.
(Fuente: (Tullius, 2019))

1.6. Elementos de sujeción

1.6.1. Rigidez de elementos de sujeción

La zona de sujeción de elementos de unión (perno o tornillo), generalmente se encuentra formada de dos partes, la parte sin roscar y la parte roscada, Figura 1.13.

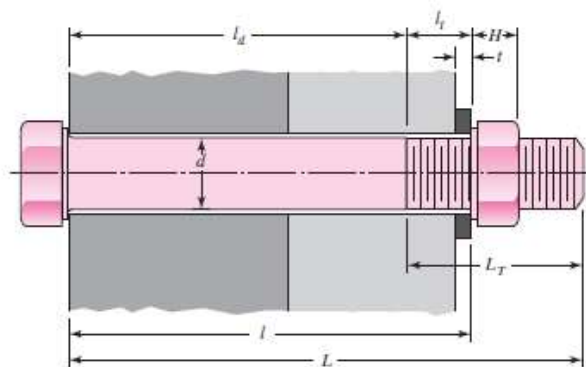


Figura 1.13. Partes de elementos de sujeción (pernos)
(Fuente: (Richar & Keith, 2008))

Donde:

L: longitud total

d: diámetro nominal

l: longitud a sujetar

ld: Longitud de la parte útil sin rosca

$$ld = L - Lt$$

Ecuación 1.2.

lt: longitud de la parte roscada

$$lt = l - ld$$

Ecuación 1.3.

Lt: longitud roscada

$$L_T = \begin{cases} 2d + 6mm, L \leq 125, d \leq 48mm \\ 2d + 12mm, 125 < L \leq 200mm \\ 2d + 25mm, L \geq 200mm \end{cases}$$

Ecuación 1.4.

De acuerdo con Shigley, 2008 los parámetros físicos a considerar en los tornillos, Figura 1.14 son semejantes a los usados en los pernos, con la diferencia del uso de la Ecuación 1.5 para obtener el agarre efectivo l' .

$$l' = \begin{cases} h + \frac{t_2}{2}, t_2 < d \\ h + \frac{d}{2}, t_2 \geq d \end{cases}$$

Ecuación 1.5.

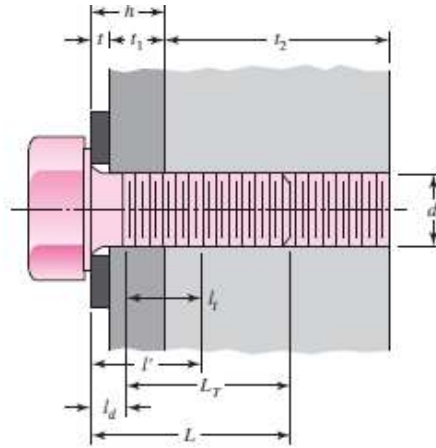


Figura 1.14. Partes de elementos de sujeción(tornillos)
(Fuente; (Richar & Keith, 2008))

La rigidez de los elementos de sujeción se establece tomando en consideración solamente parámetros físicos y propiedades mecánicas.

$$kb = \frac{AdAtE}{Ad tl + At ld}$$

Ecuación 1.6

Donde:

Ad: área de la parte sin roscar

$$Ad = \pi d^2 / 4$$

Ecuación 1.7.

At: área de esfuerzo de tensión

El área de esfuerzo a la tensión de la parte roscada se determina mediante la tabla del Anexo I

1.6.2. Rigidez de miembros a sujetar

La rigidez de los miembros a sujetar se determina mediante el análisis de elemento finitos de Wileman con el uso de la siguiente ecuación.

$$\frac{Km}{Ed} = Ae^{\frac{Bd}{t}}$$

Ecuación 1.8.

Donde:

A,B: coeficiente obtenidos de la Tabla 1.2

d: diámetro nominal

E: módulo de agarre

l: longitud de agarre

Tabla 1.2. Parámetros de rigidez de varios materiales.

Material	Relación de Poisson	Módulo de elasticidad		A	B
		GPa	Mpsi		
Acero	0.291	207	30	0.78715	0.62873
Aluminio	0.334	71	10.3	0.9670	0.63816
Cobre	0.326	119	17.3	0.75968	0.63553
Hierro fundido	0.211	100	14.5	0.77871	0.61616
Expresión general				0.78952	0.62914

(Fuente; (Richar & Keith, 2008))

La rigidez total, Ecuación 1.7 se determina considerando a cada elemento a sujetar como resortes colocados en serie.

$$\frac{1}{Km} = \frac{1}{Km1} + \frac{1}{Km2} \dots \dots$$

Ecuación 1.9.

1.6.3. Constante de rigidez

La constante de rigidez permite relacionar las rigideces de los materiales a sujetar con el tipo de perno a usar.

$$C = \frac{Kb}{Kb + Km}$$

Ecuación 1.10.

1.6.4. Tensión externa en elementos de sujeción

Las cargas externas aplicadas a los elementos de sujeción son tomadas en cuenta en la determinación de la cantidad de pernos o tornillos mínimos que garanticen la unión entre los distintos elementos, para ello se considera precargas, resistencia de prueba mínima del perno (Anexo II), factor de seguridad y área de esfuerzo a la tensión.

$$N = \frac{CnP}{SpAt - Fi}$$

Ecuación 1.11.

Donde:

C: constante de rigidez

n: factor de seguridad

Sp: resistencia de prueba mínima del perno

At: área de esfuerzo a la tensión

Fi: precarga

$$F_i = 0,75 * A_t * S_p$$

Ecuación 1.12.

1.7. Elementos utilizados para el análisis de movimiento

1.7.1. Kinovea

Kinovea es un software gratuito y de código abierto que sirve para el análisis de video dedicado al deporte. Está dirigido principalmente a los entrenadores, atletas y profesionales médicos. También puede ser útil para su ergonomía y en el estudio de animación. Esta herramienta sirve para observar, analizar, hacer mediciones y comparar videos de gestos deportivos (Tinoco, A. , 2014).

1.7.2. Módulo MPU-6050 por medio del módulo Arduino

El sensor MPU-6050 contiene un acelerómetro MEMS y un giroscopio MEMS en un solo chip. Es muy preciso, ya que contiene un hardware de conversión analógico a digital de 16 bits para cada canal. Por lo tanto, captura los canales X, Y y Z al mismo tiempo. El sensor utiliza el bus I2C para interactuar con el Arduino (Arduino, 2018).

2. METODOLOGÍA

2.1. Antecedentes del robot paralelo

Para la construcción del robot paralelo 3UPS+1RPU se toma en consideración el modelo virtual diseñado y analizado por Pulloquina, 2018, Figura 2.1 con el escrito: “Análisis de compatibilidad del modelo dinámico de un robot paralelo tipo 3UPS+1RPU para rehabilitación de rodilla, mediante simulación de mecanismos en Msc-Adams”.

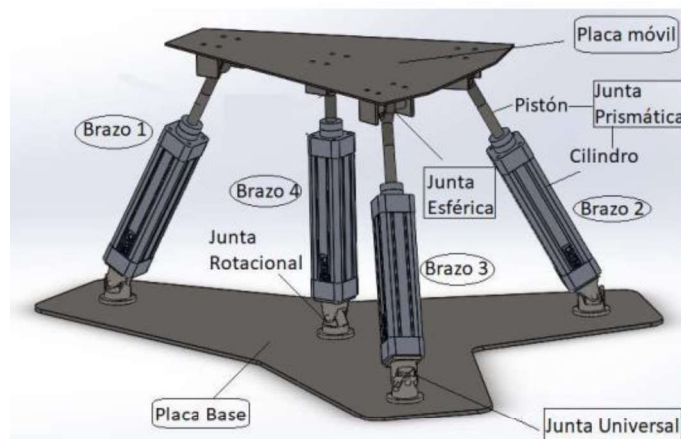


Figura 2.1. Prototipo virtual del robot paralelo 3UPS+RPU SolidWorks
(Fuente: (Flores & López, 2019))

En este prototipo virtual se identifican las patas RPU (pata 4) y UPS (patas 1,2 y 3). En la pata RPU se tiene una disposición de una junta de revolución en su parte inferior, mientras que en la parte superior se presenta una junta universal con dos grados de libertad, esta última está conformada por una cruceta y sus respectivos soportes, proporcionando los dos grados de libertad que necesita esta junta.

Elementos básicos que conforman el robot

El prototipo virtual del robot 3UPS + 1RPU, está conformado por una plataforma fija, una plataforma móvil, cuatro juntas prismáticas, cuatro juntas universales, una junta de revolución y cuatro juntas esféricas cuyas ubicaciones están descritas en la Figura 2.2

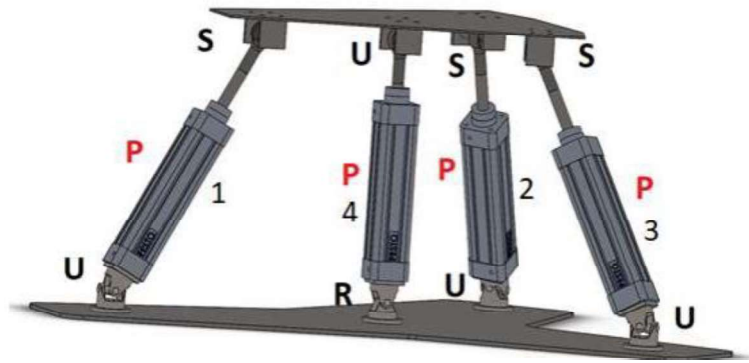


Figura 2.2. Robot paralelo 3UPS+RPU.
(Fuente: (Flores & López, 2019))

Tabla 2.1. Partes del robot paralelo.

P	Junta prismática
U	Junta universal
R	Junta de revolución
S	Junta esférica

(Fuente: Autores)

Debido a que gran parte de los componentes tienen mucha aplicabilidad en la industria, pueden ser encontrados en el mercado mientras que otros elementos deben ser fabricados y también se han tenido que realizar modificaciones a ciertos componentes para adaptar su funcionalidad al robot paralelo.

2.2. Selección de componentes del robot

La selección de componentes se realiza conociendo las especificaciones técnicas de los elementos y la adaptabilidad mediante procesos de maquinado, por lo que esta sección se encuentra dividida en dos partes:

- Selección de componentes sin necesidad de adaptación.
- Selección de componentes con necesidad de adaptación.

2.2.1. Selección de componentes sin necesidad de adaptación

Estos elementos son seleccionados una vez conocidas sus especificaciones, geometrías y usos; además de la facilidad para adaptarse con otros elementos.

Junta prismática

Para la junta prismática, Figura 2.3 se utilizan cilindros electromecánicos Festo ESBF_BS_LS32 en todas las patas. Esta junta prismática es seleccionada en base a los siguientes factores:

- Precisión en el desplazamiento lineal por medio del número de vueltas del vástago inferior.
- Desplazamiento de 300mm para desplazar el robot sobre el eje Z (Flores y López, 2019, p36).
- Facilidad de encontrar este elemento en el mercado.
- Disponibilidad de acoples en el mercado.



Figura 2.3. Cilindro electromecánico Festo ESBF_BS-32-100-10P
(Fuente: Autores)

Tabla 2.2. Especificaciones técnicas del cilindro electromecánico Festo ESBF_BS-32-100-10P

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	ESBF_BS-32-100-10P
Función	ESBF cilindro normalizado
Tamaño	32
Tipo de accionamiento	BS Husillo de bola
Carrera	300mm
Paso del Husillo en mm	10P 10mm
Máx. Fuerza de avance	1000N
Peso	1,02 kg

(Fuente:(Catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019))

Junta de revolución

La junta de revolución utilizada en el diseño es de marca Festo conformada por dos elementos: una brida basculante SNCL, Figura 2.4 y una SNCB, Figura 2.5.

- Brida basculante SNCL



Figura 2.4. Brida basculante SNCL
(Fuente: Autores)

Tabla 2.3. Especificaciones técnicas de brida basculante SNCL-32

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	Swivel flange SNCL-32
Materiales	Fundición inyectada de aluminio, exento de cobre y PTFE
Diámetro para eje	10mm
Peso	71g

(Fuente: Catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p54)

- Brida basculante SNCB

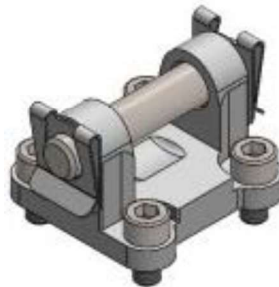


Figura 2.5. Brida basculante SNCB-32-R3
(Fuente: Autores)

Tabla 2.4. Especificaciones técnicas brida basculante SNCB-32-R3

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	Swivel flange SNCB-32-R3
Materiales	Fundición inyectada de aluminio, con recubrimiento protector, sin cobre ni PTFE
Diámetro del eje	10mm
Peso	103g

(Fuente: Catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p55)

Junta de revolución ensamblada

La junta ensamblada se la puede observar en la Figura 2.6. Su selección se basa en los siguientes factores.

- Adaptación directa a los productos Festo.
- Desplazamiento suficiente para la movilidad el robot sobre el eje Z. (Flores y López, 2019, p36).
- Facilidad de encontrar este elemento en el mercado.
- Disponibilidad de acoples en el mercado.

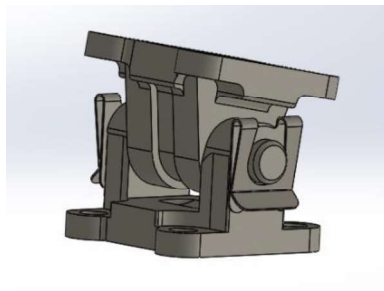


Figura 2.6. Junta de revolución ensamblada.
(fuente: Autores)

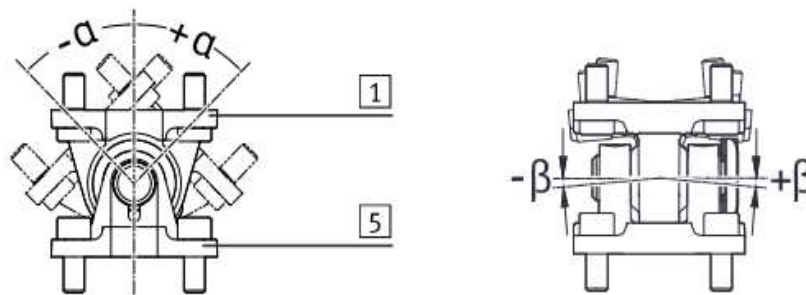


Figura 2.7. Ángulos de desplazamiento junta de revolución.
(Fuente: (Instrucciones de ensamblaje Festo Swivel flange SNC.../CRSNCS))

Tabla 2.5. Especificaciones técnicas de junta de revolución SNCL/SNCB

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	Swivel flange SNCL/SNCB
α	$\pm 47^\circ$
β	No existe ángulo β
Peso total:	174 g

(Fuente: (Instrucciones de ensamblaje Festo Swivel flange SNC.../CRSNCS))

Conjunto paralelo

El conjunto paralelo, Figura 2.8 es un grupo de varios componentes utilizados para acoplar el cilindro electromecánico con el motor por medio de manguitos de fijación, una polea dentada y una banda de transmisión, Figura 2.45.

Este conjunto paralelo fue seleccionado debido a que es necesario para acoplar la junta prismática al motor.

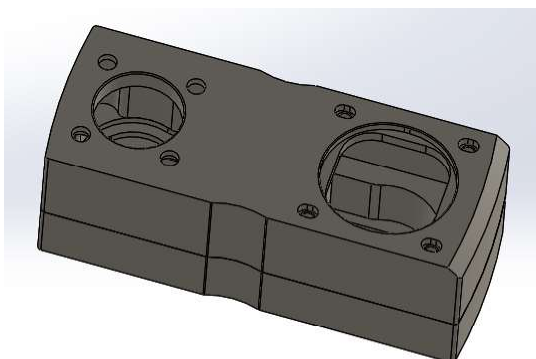


Figura 2.8. Conjunto paralelo Festo EAMM-U-50-D32
(Fuente: Autores)

Tabla 2.6. Especificaciones técnicas conjunto paralelo EAMM-U-50-D32

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	EAMM-U-50-D32
Material del cuerpo	Aleación de forja de aluminio
Material de casquillo tensor	Acero inoxidable resistente a la corrosión
Material de disco para correa dentada	Acero inoxidable resistente a la corrosión
Material correa dentada	Policloropreno
Tornillos	Acero galvanizado
Momento de giro transmisible	1 Nm
Momento de inercia de la masa	12,1 kgmm ²
Velocidad máxima de giro	6000 rpm
Par de accionamiento sin carga	0,01 Nm
Peso	608 g

(Fuente: (Catálogo Festo conjuntos paralelos EAMM-U, 2018, p11))

Manguito de fijación

Debido a que el motor a utilizarse no es de la misma marca que el conjunto paralelo, se procedió a adquirir un manguito de fijación con distintas especificaciones, Tabla 2.7 a la que vienen en el conjunto paralelo. Este manguito de fijación (Figura 2.9.) fue seleccionado debido al diámetro del eje del motor.

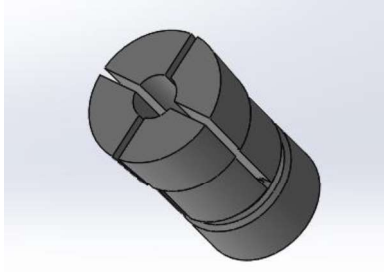


Figura 2.9. Manguito de fijación Festo EAMH-50-5-C13.6.
(Fuente: Autores)

Tabla 2.7. Especificaciones técnicas manguito de fijación EAMH-50-5-C13.6

Especificaciones técnicas	
Marca	Festo
Modelo	EAMH-50-5-C13.6
Material	Acero inoxidable
Tamaño	50
Para diámetro del árbol del motor	5mm
Velocidad máxima de giro	6000 rpm
Momento de inercia de la masa	0,44 kg mm ²
Temperatura ambiente	-10 °C hasta 60 °C
Peso	19g

(Fuente: (Catálogo Festo conjuntos paralelos EAMM-U, 2018, p22))

Motor para la junta prismática

Para determinar los motores adecuados se usa el manual del cilindro electromecánico Festo ESBF_BS_LS-32, permitiendo determinar el torque necesario para vencer la inercia del robot y el torque de trabajo. A continuación, se tienen las ecuaciones necesarias para el cálculo del torque obtenidas del catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p16.

$$M_{reib} = M_{leerlauf} + M_v$$

Ecuación 2.1

Donde: M_{reib} = torque por fricción

$M_{leerlauf}$ = torque sin carga

M_v = torque en función de la velocidad

$$M_{antrieb} = M_{reib} + M_{nutz}$$

Ecuación 2.2

Donde: $M_{antrieb}$ = torque requerido

M_{nutz} = torque efectivo

Según el catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p16; el torque sin carga ($M_{leerlauf}$) se selecciona para un cilindro electromecánico de tamaño 32 con un paso de 10 mm/rev, obteniendo un valor de $M_{leerlauf} = 0.1$ Nm. (Anexo III).

Para la obtención de M_v (Torque por fricción en función de la velocidad) se toma a partir de la Figura 2.10. La velocidad empleada para este análisis es de 10mm/s con lo cual se obtiene un torque por fricción de $M_v = 0.021$ Nm.

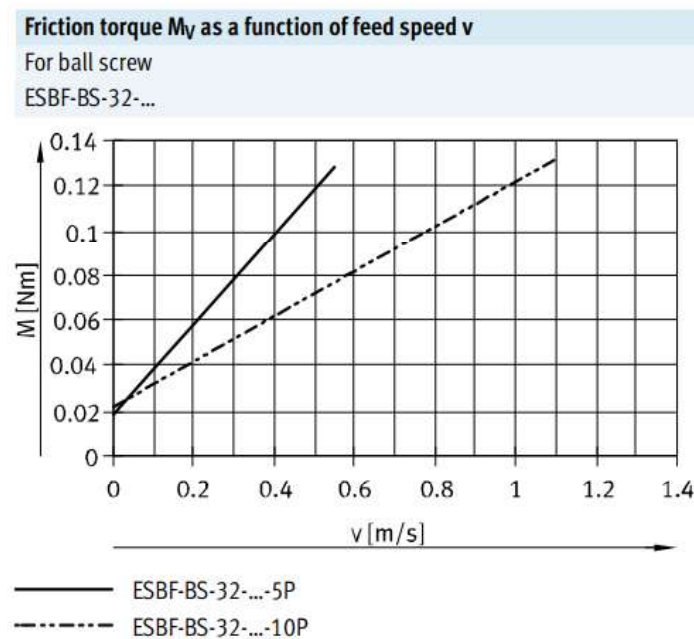


Figura 2.10. Gráfica del torque de fricción en función de la velocidad.
(Fuente: (Catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p17))

Para la obtención de M_{NUTZ} (torque efectivo) es necesario determinar la carga externa efectuada sobre el cilindro electromecánico. Las cargas externas por considerar son:

- Peso de la plataforma móvil = 72 N
- Peso de la pierna del paciente = 200 N
- Peso de las juntas superiores del robot = 37 N

Todas estas cargas se distribuyen para los 4 patas de la plataforma, por lo cual se tiene una carga de 77 N por cada pata, con este valor se obtuvo el torque efectivo de $M_{NUTZ} = 0.8mNm$ gracias a la Figura 2.11 que se muestra a continuación:

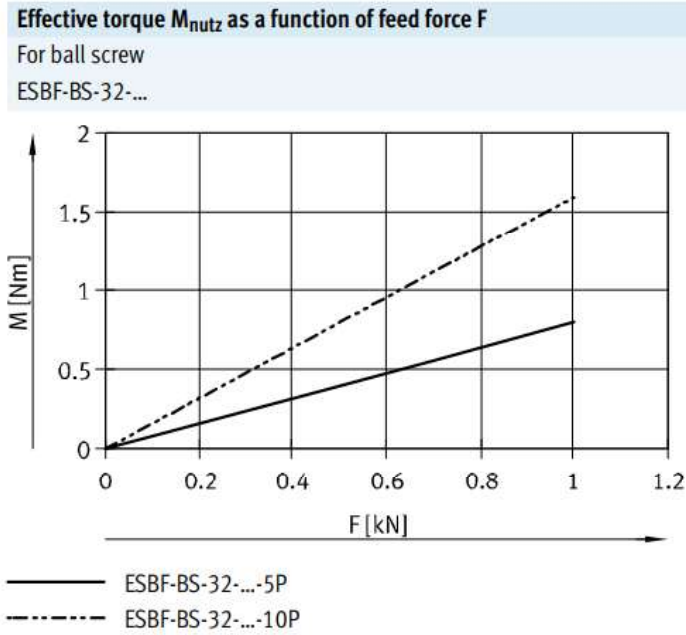


Figura 2.11. Gráfica del torque efectivo en función de la velocidad.
 (Fuente: (Catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p18))

Con los valores obtenidos anteriormente se utilizan las ecuaciones Ecuación 2.1 y Ecuación 2.2.

Tabla 2.8. Cálculo del torque necesario para el motor.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$M_{leerlauf} = 0.1 \text{ Nm}$	$M_{reib} = M_{leerlauf} + M_v$	$M_{reib} = 0.12$
$M_v = 0.021 \text{ Nm}$ $M_{reib} = 0.12$	$M_{atrief} = M_{reib} + M_{NUTZ}$	$M_{atrief} = 0.2 \text{ Nm}$
$M_{NUTZ} = 0.8 \text{ mNm}$		

(Fuente: Autores)

Los motores, Figura 2.12 seleccionados para el funcionamiento del robot paralelo son motores Maxon 148877 con características detalladas en el Anexo IV.

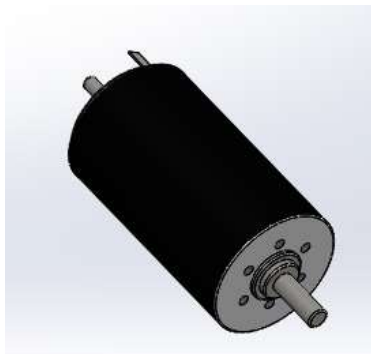


Figura 2.12. motor Maxon 148877 3D SolidWorks
 (Fuente: Autores)

2.2.2. Selección de componentes con necesidad de adaptación

Debido a que algunos componentes que se encuentran en el mercado no cumplen completamente con las características geométricas requeridas, es necesario realizarles procesos de maquinado, tal es el caso de las juntas esféricas y de las juntas universales. A continuación, se detalla las modificaciones realizadas a los componentes:

Junta esférica

Esta junta esférica, Figura 2.13 es seleccionada debido a los siguientes factores

- Junta esférica con mayor ángulo de trabajo del mercado.
- Posibilidad de ser maquinada para adaptaciones.
- Disponibilidad en el mercado.

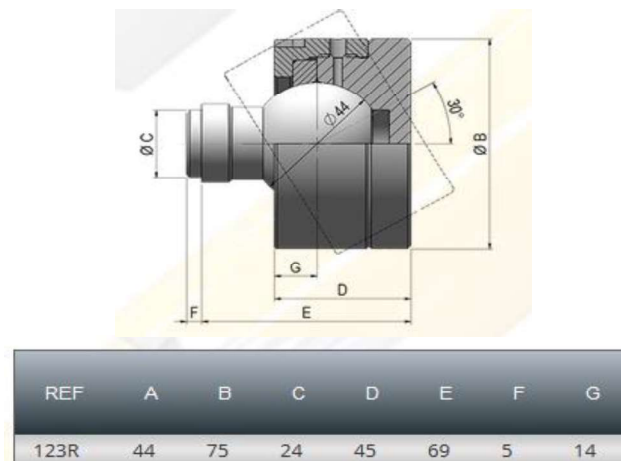


Figura 2.13. Junta esférica Cicrosa.
(Fuente: (Catálogo de componentes Cicrosa, p30))

Tabla 2.9. Especificaciones técnicas junta esférica Cicrosa 123R

Especificaciones técnicas	
Marca	Cicrosa
Modelo	123R
Material	Acero F-1140
Ángulo máximo de inclinación	± 30°
Fuerza máxima sobre rótula	8 toneladas
Peso	1,5 kg

(Fuente: (Catálogo de componentes Cicrosa, p30))

Los maquinados en esta pieza se los realiza para la sujeción a los acoples y al cilindro electromecánico por medio de pernos. Los mecanizados son los siguientes:

- Tres agujeros de 9mm de profundidad en la parte superior con broca 5,2 Figura 2.14.

- Un agujero de 10mm de profundidad en la parte interior con broca 8,5. Figura 2.15
- Machuelado en la parte superior para perno M6.
- Machuelado en la parte inferior para perno M10.

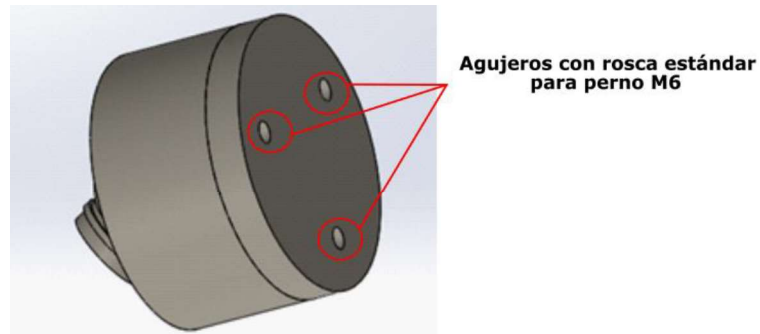


Figura 2.14. Dibujo 3D de junta esférica con agujeros para rosca (A)
(Fuente: Autores)

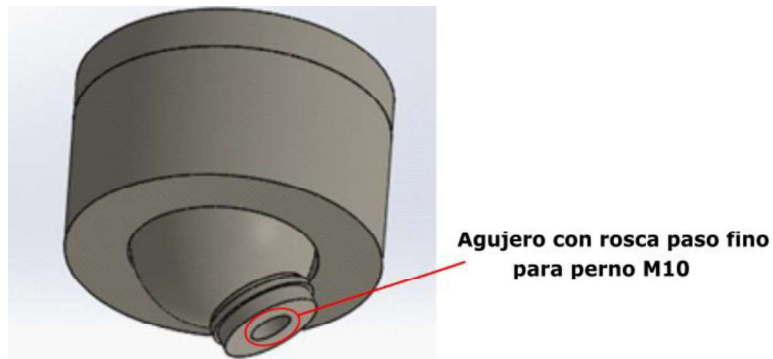


Figura 2.15. Dibujo 3D de junta esférica con agujeros para rosca (B)
(Fuente: Autores)

Junta universal de las patas externos (pata 1, 2 y 3)

Esta junta universal, Figura 2.16 fue seleccionada debido a los siguientes factores

- Junta universal con mayor ángulo de trabajo que se encuentra en el mercado.
- Posibilidad de ser maquinada para adaptaciones.
- Disponibilidad en el mercado.



Figura 2.16. Dibujo 3D en SolidWorks de Junta universal Belden
(Fuente: Autores)

Los maquinados en esta pieza, Figura 2.17 se los realiza para la sujeción a los acoples del conjunto paralelo y a la plataforma fija por medio de pernos. Los mecanizados son los siguientes:

- Refrentado en ambos extremos de la junta universal para correcta alineación de los ejes inferiores.
- Dos agujeros de 13 mm de profundidad y de diámetro 4,2mm en ambos extremos de la junta universal Belden UJ-NB1250x00.
- Machuelado para rosca M5 paso normal (0,8) en ambos extremos de la junta universal.

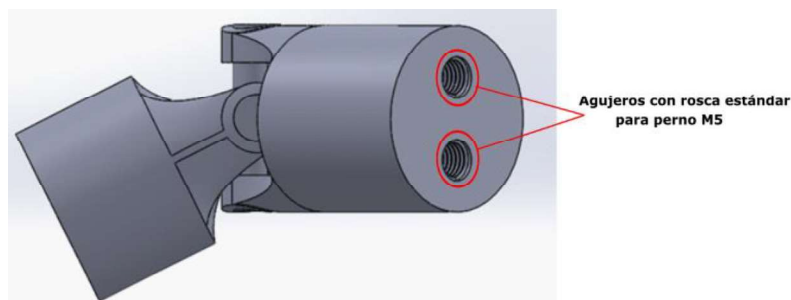


Figura 2.17. Dibujo 3D en SolidWorks de junta universal Belden maquinada.
(Fuente: Autores)

Junta universal de la pata 4

La junta universal para la pata 4 debe poseer una mayor rigidez en su diseño, por lo que se procedió a diseñar una junta que posea los dos grados de libertad requeridos.

2.3. Diseño de plataformas y elementos para las juntas

Debido a la necesidad de acoplar las juntas a las plataformas fija y móvil; y además de alinear el eje de las juntas en un mismo plano, se realiza el diseño y fabricación de acoples. A continuación, se detallan los elementos diseñados para cada pata del robot:

2.3.1. Diseño de elementos para la pata UPS (pata 1, 2 y 3)

Acople para la junta universal

Este acople, Figura 2.18 es utilizado entre las juntas universales de las patas externos y los conjuntos paralelos con lo cual se realiza la unión de ambas partes, para su correcta funcionalidad debe utilizarse pernos de cabeza avellanada M5x18mm.

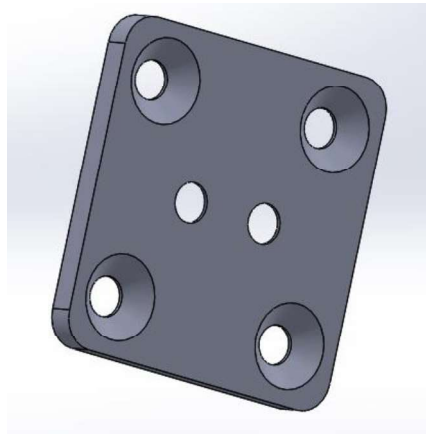


Figura 2.18. Acople para la junta universal
(Fuente: Autores)

Acople para la junta esférica

Para las juntas esféricas se fabricaron acoples, Figura 2.19 que permiten alinear los ejes de las juntas de la plataforma móvil y además permite la sujeción de la junta esférica con la plataforma móvil. Para la sujeción de la junta esférica se utiliza pernos de cabeza avellanada M6x16mm y para la sujeción a la plataforma móvil se utiliza pernos con cabeza cilíndrica M6x35mm con sus respectivas tuercas autoblocantes.

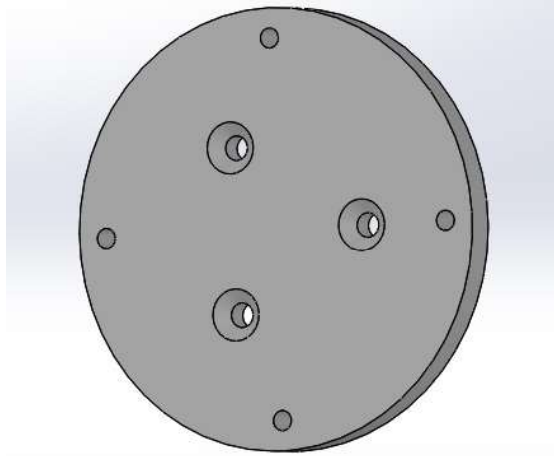


Figura 2.19. Acople para la junta esférica.
(Fuente: Autores)

2.3.2. Diseño de elementos para la pata RPU (pata 4)

Acople para la junta de revolución

Este acople, Figura 2.20 es utilizado para la unión entre la plataforma fija y la junta de revolución además de contribuir a la alineación de los ejes de las juntas inferiores. Este elemento posee cuatro agujeros pasantes de 6,4mm.

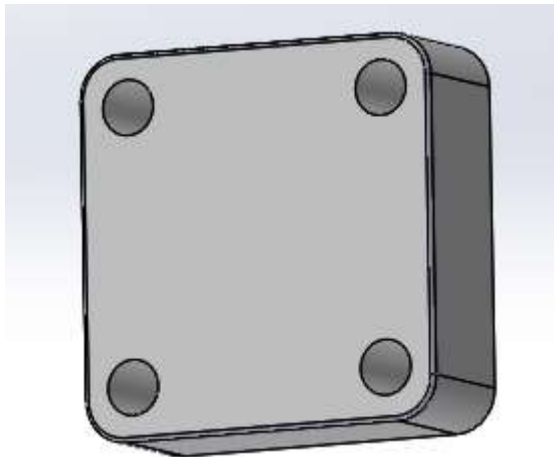


Figura 2.20. Acople para la junta de revolución.
(Fuente: Autores)

Acople para el vástago de la junta prismática

Para unir la junta prismática con la junta universal de la pata cuatro se utiliza este elemento, Figura 2.21 permitiendo el roscado del vástago de la junta prismática (rosca M10 paso fino) y la sujeción de la junta universal por medio de 4 pernos M6x18mm con

sus respectivas tuercas autoblocantes. La fabricación de este elemento se lo realizó en un centro de mecanizado CNC.

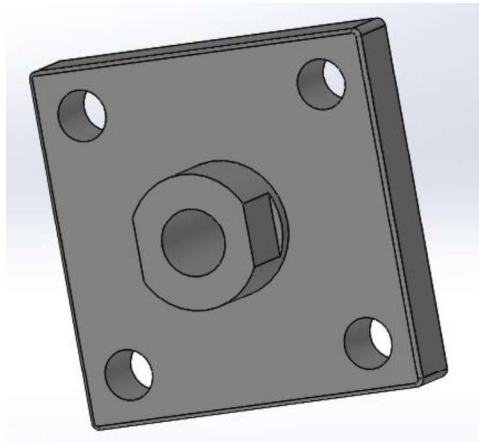


Figura 2.21. Acople para el vástago de la junta prismática.
(Fuente: Autores)

Eje para la junta universal de la pata 4

Para la junta universal del pata cuatro se utiliza un eje, Figura 2.22 brindando la posibilidad de rotar sobre el eje Z del robot, en un extremo del eje se une con una junta de revolución Festo y al otro extremo con un rodamiento 16006 obteniendo los dos grados de libertad necesarios para esta junta.

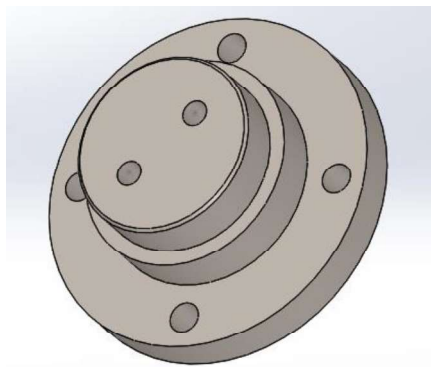


Figura 2.22. Eje para la junta universal de la pata 4.
(Fuente: Autores)

Las cargas por considerar para el diseño del eje son el peso del pie del paciente W_1 de 200N (Aquino & Pozo, 2017) y el peso de la plataforma de aluminio W_2 de 17,27N
Figura 2.23.

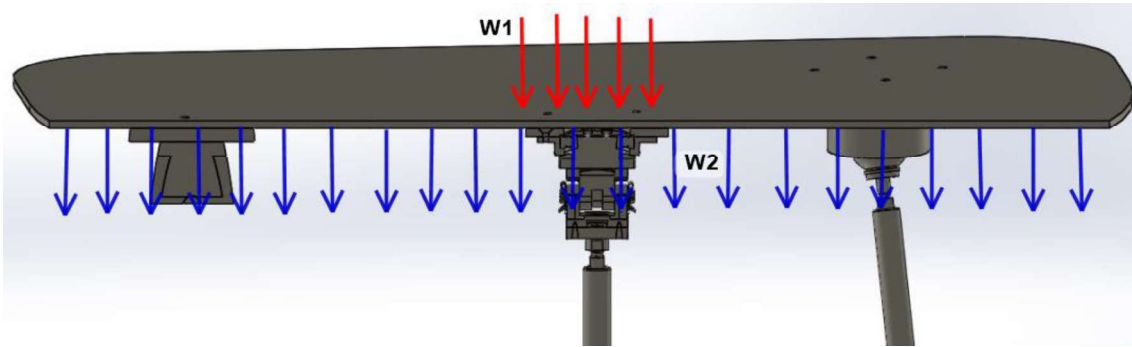


Figura 2.23. Cargas externas aplicadas al eje.
(Fuente: Autores)

En el análisis del eje se considera el espesor de los elementos indicados en la Figura 2.24, el traslado de las cargas al eje y la aplicación de la fuerza $W1$ se realiza en un ángulo de 45° de acuerdo con lo escrito por José Luis Pulloquina en el año 2018. La Figura 2.25 indica las diferentes fuerzas aplicadas directamente al eje con el dimensionamiento A, B, C de 8 mm, 8 mm y 7 mm respectivamente.

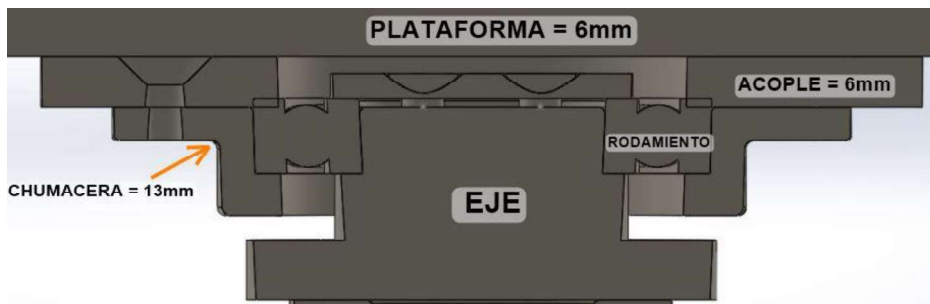


Figura 2.24. Espesores y elementos para el análisis del eje.
(Fuente: Autores)

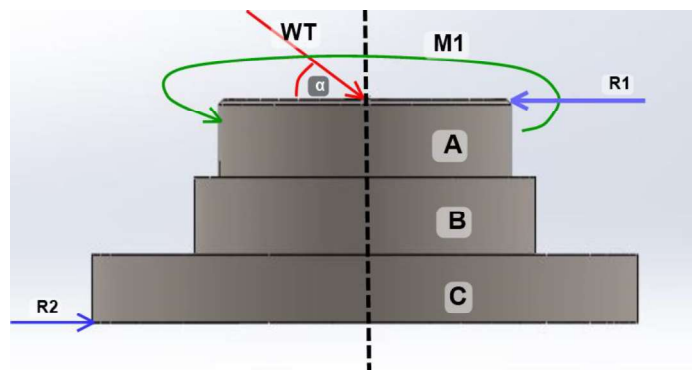


Figura 2.25. Cargas aplicadas al eje de la pata 4 del robot paralelo 3UPS+1RPU.
(Fuente: Autores)

Tabla 2.10. Separación de cargas aplicadas al eje.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$L1 = 6 \text{ mm}$ $L2 = 6 \text{ mm}$ $L3 = 13 \text{ mm}$ $W1 = -200 \text{ N}$ $W2 = -16,27 \text{ N}$	$\sum M = 0$ $M = W1 \cos 45^\circ * (L1 + L2 + L3)$ $W_y = W1 * \text{sen } 45^\circ + W2$	$M = 3,53 \text{ Nm}$ $W_y = 157,69 \text{ N}$
$M = 3,53 \text{ Nm}$ $A = 8 \text{ mm}$ $B = 8 \text{ mm}$ $C = 7 \text{ mm}$	$\sum M_C = 0$ $\sum M_C = M + R1 * (A + B + C)$	$R1 = -153,48 \text{ N}$
$W1 = -200 \text{ N}$ $R1 = -153,48 \text{ N}$	$\sum F_x = 0$ $\sum F_x = -W1 \cos 45^\circ - R1 + R2$	$R2 = 294,09 \text{ N}$

(Fuente: Autores)

El cálculo estático de los esfuerzos principales se obtiene al aplicar la teoría de Coulomb-Mohr para materiales dúctiles, tomando en consideración un diámetro de 30 mm del eje en la zona A. En la Tabla 2.11. se obtienen los valores del análisis estático de la pata 4.

Tabla 2.11. Análisis estático del eje de la pata 4.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$M = 3,53 \text{ Nm}$ $A = 8 \text{ mm}$	$\sum M_A = 0$ $\sum M_A = M + R2 * A$	$M_A = 5,88 \text{ N}$
$M_A = 5,88 \text{ Nm}$ $d = 30 \text{ mm}$ $I = \pi d^4 / 4$	$\sigma_x = \frac{M d}{I}$	$\sigma_x = 277,28 \text{ KPa}$
$\sigma_x = 277,28 \text{ KPa}$	$\frac{\sigma_{max}, \sigma_{min}}{2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{(\sigma_x - \sigma_y)^2}{4} + \tau_{xy}^2}$	$\sigma_{max} = 334,28 \text{ KPa}$ $\sigma_{min} = -57,42 \text{ KPa}$
$\sigma_{max} = 334,28 \text{ KPa}$ $n = 1,5$ $S_{ut} = 55 \text{ MPa}$	$\sigma_{max} \leq \frac{S_y}{n}$	$334,28 \text{ KPa} \leq 36,66 \text{ MPa}$

(Fuente: Autores)

Selección del rodamiento

Se realiza un análisis considerando las fuerzas actuantes, considerando los siguientes parámetros críticos.

- Para el cálculo de la fuerza radial máxima, el ángulo de la pata 4 se encuentra en la posición máxima de inclinación 45° , Figura 2.26 (CASO 1)
- Para el cálculo de la fuerza axial máxima, el ángulo de la pata 4 se encuentra a 0° , Figura 2.27 (CASO 2)
- El peso de la pierna del paciente de 200N (Aquino & Pozo, 2017) y de la plataforma es 72N obteniendo una carga total de 272N; y suponiendo que la carga es perpendicular y actúa totalmente en la junta universal de la pata 4.
- Se asume un rodamiento rígido de bolas 16006

En el catálogo de rodamientos SKF se obtienen los valores de C , C_o y f_o .

$$C = 11900 \text{ [N]}$$

$$C_o = 7350 \text{ [N]}$$

$$f_o = 15$$

- CASO 1: Plataforma móvil posee una inclinación de 45 grados.

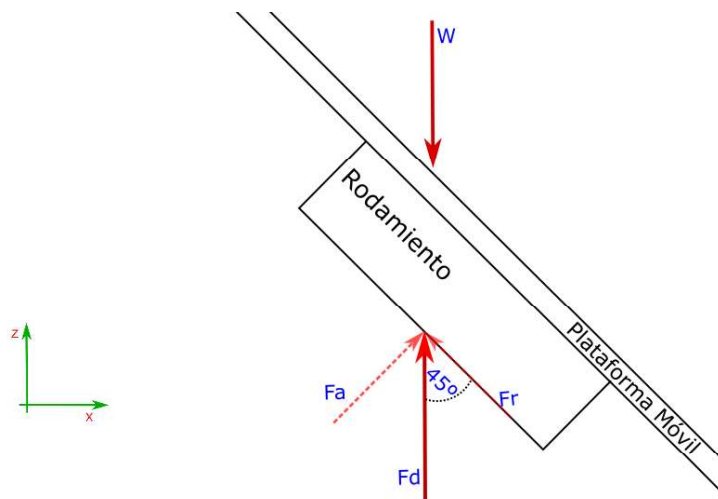


Figura 2.26. Carga total del sistema actuando sobre el rodamiento a 45°
(Fuente: Autores)

Tabla 2.12. Cálculos para selección del rodamiento (Caso 1).

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$W = 272 \text{ [N]}$	$\sum F_z = 0$ $F_D = W$	$F_D = 272 \text{ [N]}$
$F_D = 272 \text{ [N]}$	$F_a = F_r = F_D * \cos(45)$	$F_a = F_r = 192,33 \text{ [N]}$
$F_a = F_r$ $= 192,33 \text{ [N]}$	$f_o * \frac{F_a}{C_o}$	$f_o * \frac{F_a}{C_o} = 0,39$
$C_o = 7350 \text{ [N]}$		$e = 0,23$
$f_o = 15$		
$e = 0,23$		
$X = 0,56$	$\frac{F_a}{F_r} > e \rightarrow P = X * F_r + Y * F_a$	$P = 482,67 \text{ [N]}$
$Y = 1,95$		

(Fuente: Autores)

Para el cálculo de la carga equivalente se utiliza la tabla del Anexo V y luego se compara la relación de $\frac{F_a}{F_r}$ con e ; utilizando las ecuaciones del anexo VI se tiene que $F_a = F_r$ por lo que la relación de $\frac{F_a}{F_r} = 1$. Comparando estos valores se tiene que $\frac{F_a}{F_r} > e$; $1 > 0,23$; permitiendo utilizar la ecuación respectiva para el cálculo de la carga dinámica equivalente (P).

Comparando la capacidad de carga dinámica C con la carga equivalente P y verificando de se cumpla que $C > P$

$$11900 \text{ [N]} > 482,67 \text{ [N]}$$

Se obtuvo que para el Caso 1, el rodamiento sí cumple con los requerimientos.

- CASO 2: Plataforma móvil posee una inclinación de 0 grados.

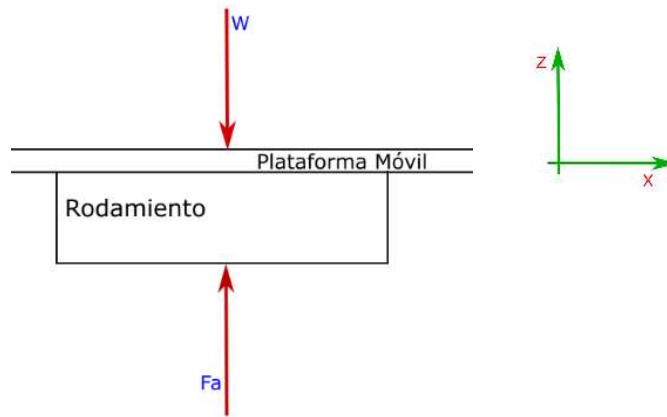


Figura 2.27. Carga total del sistema actuando sobre el rodamiento a 0°
(Fuente: Autores)

Tabla 2.13. Cálculos para selección del rodamiento (Caso 2).

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$W = 272 [N]$	$\sum F_z = 0$	$F_a = 272 [N]$
$F_a = 272 [N]$	$F_a = W$	
$C_o = 7350 [N]$	$F_a \leq 0,5 * C_o$	$272 [N] \leq 3675[N]$

(Fuente: Autores)

Obteniendo que para el Caso 2, el rodamiento sí cumple con la comparación. Respecto a los análisis realizados, el rodamiento 16006 sí cumple con los requerimientos.

Chumacera para rodamiento 16006

Esta chumacera, Figura 2.28 localizada en la junta universal de la pata cuatro permite el soporte del rodamiento 16006 y juntarlo con el acople de la Figura 2.29, este elemento fue construido en un centro de mecanizado debido a su complejidad.

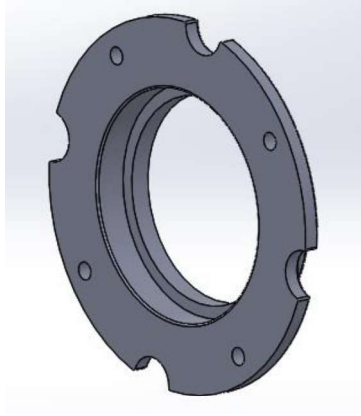


Figura 2.28. Chumacera.
(Fuente: Autores)

Acople para la junta universal de la pata 4

Este acople, Figura 2.29 permite la unión de la junta universal de la pata cuatro y de la plataforma móvil, para su correcta funcionalidad este elemento contiene 4 agujeros para pernos avellanados M6x18mm y 4 agujeros para pernos de cabeza cilíndrica M6x18mm.

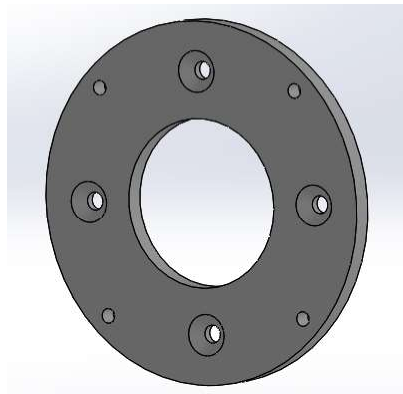


Figura 2.29. Acople para la junta universal de la pata 4.
(Fuente: Autores)

Soporte eje-rodamiento

Este elemento, Figura 2.30 ubicado en la junta universal de la pata cuatro posee dos agujeros para pernos M5x12mm de rosca normal con cabeza avellanada, esta placa proporciona un apoyo axial al rodamiento y a su vez juntando el extremo del eje con el diámetro interno del rodamiento.

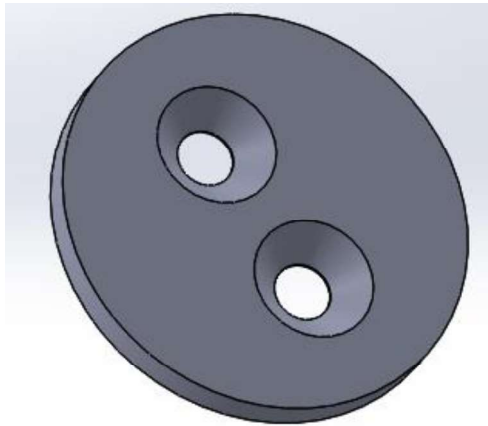


Figura 2.30. Soporte eje-rodamiento.
(Fuente: Autores)

Diseño final de la junta universal con rodamiento

El diseño final de esta junta se la muestra en la Figura 2.31

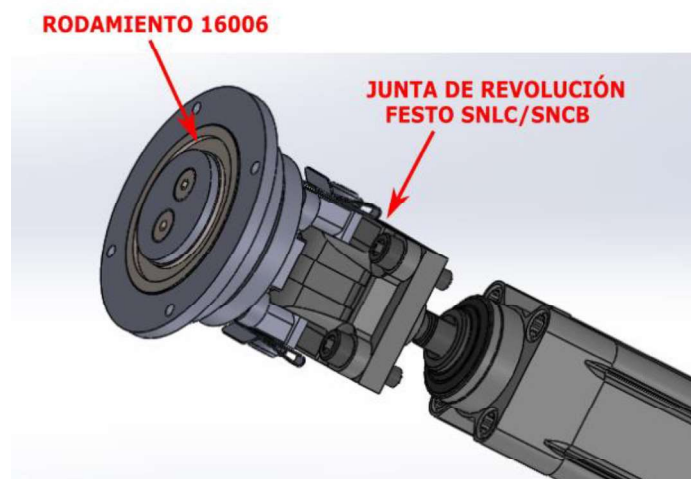


Figura 2.31. Modelo final de la junta universal con rodamiento.
(Fuente: Autores)

2.3.3. Diseño de la plataforma móvil

Para el diseño de la plataforma móvil se toman en cuenta las siguientes necesidades:

- El área debe ser lo menor posible para reducir el peso de la plataforma además debe conservarse la estética del modelo.
- No debe existir un pandeo considerable de la plataforma.
- El espesor debe ser el menor posible para evitar el peso en exceso.
- El material debe ser liviano, pero con alta resistencia.

Teniendo en cuenta las necesidades anteriores se realiza simulaciones en SolidWorks2018 permitiendo encontrar un dimensionamiento óptimo para la plataforma móvil. A continuación, se describe el análisis tomando las siguientes consideraciones:

- El análisis se realiza con dos materiales distintos: una aleación de aluminio liso comercial, AA 3003 H14 y con acero inoxidable 304.
- Análisis con espesores de planchas comerciales de 3mm y 4mm para la plataforma de acero y de 6mm para la de aluminio.
- Mallado mediano.
- Sujeción de la plataforma móvil en la pata 4.
- Efecto del peso propio de la plataforma = 72 N.
- Peso del pie de un paciente corresponde a -200N en el eje Z (Aquino & Pozo, 2017)
- Fuerzas realizadas por los cilindros electromecánicos de las patas 2 y 3 considerando un torque nominal (máximo torque continuo) de los motores, cuyos sentidos y direcciones sean opuestas y perpendiculares a la plataforma móvil.
- Las fuerzas máximas producidas por los cilindros se consideraron como las fuerzas que debe vencer el cilindro electromecánico.

Plataforma de acero inoxidable 304 con espesor de 3mm

En esta simulación, Figura 2.32 se obtuvo una deformación máxima de 7.219mm en el extremo derecho de la plataforma.

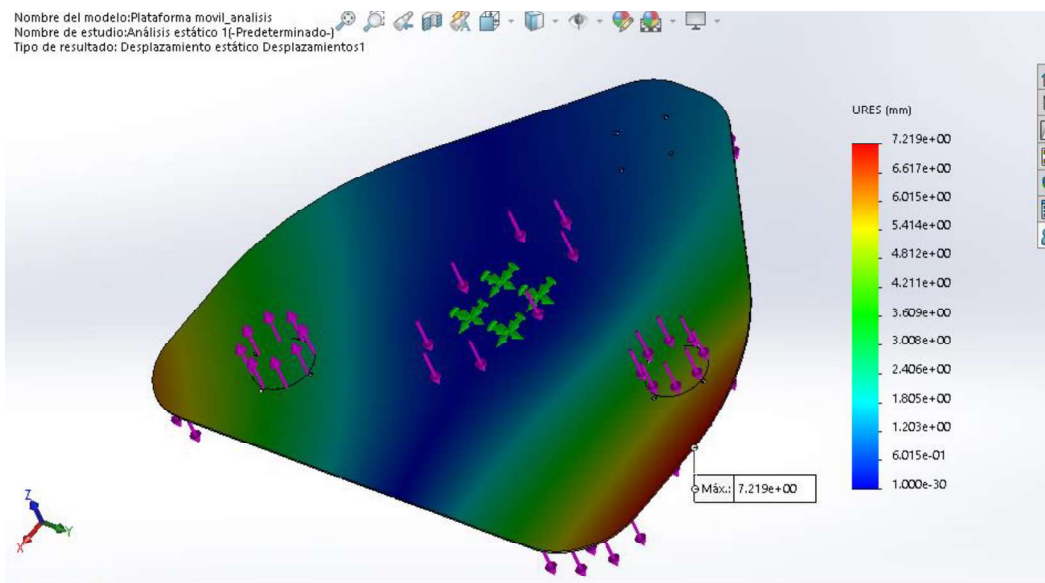


Figura 2.32. Análisis de plataforma móvil de acero inoxidable 304 de espesor 3mm.
(Fuente: Autores)

Plataforma de acero inoxidable 304 con espesor de 4mm

En esta simulación, Figura 2.33 se obtuvo una deformación máxima de 3.364mm en el extremo derecho de la plataforma.

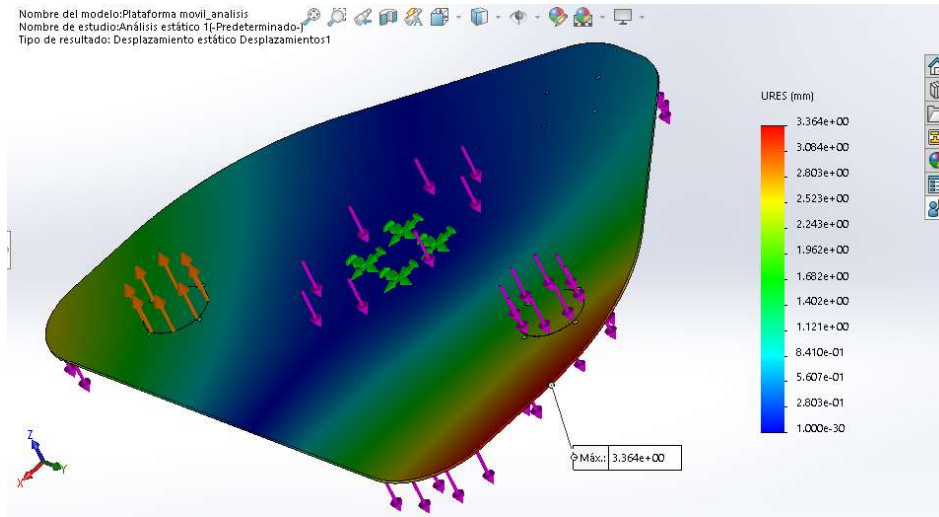


Figura 2.33. Análisis de plataforma móvil de acero inoxidable con espesor 4mm.
(Fuente: Autores)

Plataforma de aluminio AA 3003 H14 con espesor de 6mm

En esta simulación, Figura 2.34 se obtuvo una deformación máxima de 2,606mm en el extremo derecho de la plataforma.

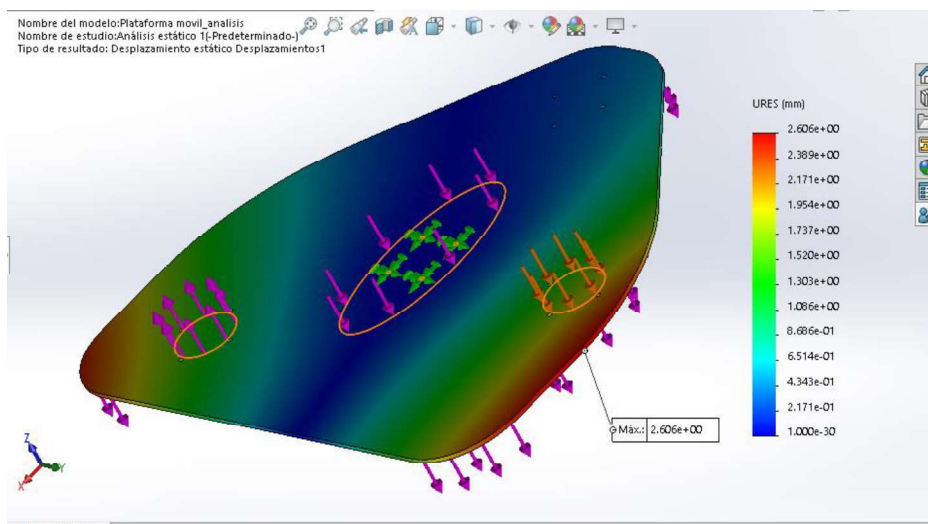


Figura 2.34. Análisis de plataforma móvil de aluminio AA3003 H14 con espesor de 6mm.
(Fuente: Autores)

2.3.4. Diseño de la plataforma fija

Para el caso de la plataforma fija se toman las siguientes consideraciones:

- Material de la plataforma es una aleación de aluminio comercial existente en el país, AA 3003 H14.
- Análisis de la plataforma con un espesor de 6mm
- Mallado mediano.
- Sujeciones localizadas en los soportes de la plataforma fija
- Efecto del peso propio de la plataforma.
- Peso del pie de un paciente corresponde a -200N en el eje Z (Aquino & Pozo, 2017)
- Peso de la plataforma móvil de 6mm de espesor (60,92 N)
- Peso de las patas 1,2,3 y 4 , tablas 2.14. y 2.15.
- Colocación de todo el peso soportado por cada una de las patas, elaborando 4 análisis distintos.

Pesos de las patas del robot

Tabla 2.14. Pesos de las patas del robot.

Pesos de las patas del robot			
UPS		RPU	
Cilindro Electromecánico	1,02 kg	Cilindro Electromecánico	1,02 kg
Junta esférica	1,5 kg	Conjunto Paralelo	0,6 kg
Junta Universal	0,5 kg	Motor Maxon 148877	0,48 kg
Conjunto Paralelo	0,6 kg	Junta de revolución	0,4 kg
Motor Maxon 148877	0,48 kg	Junta Universal	1 kg
Acoples	0,6 kg		
Peso Total (Kg):	4,7 kg	Peso Total:	3,5 kg
Peso Total (N):	46,11 N	Peso Total:	34,33 N

(Fuente: Autores)

Tabla 2.15. Pesos para la base de cada pata del robot.

Pesos para la base de cada pata del robot[N]						
Plataforma móvil	Pata 1	Pata 2	Pata 3	Pata 4	Pierna del paciente	Peso total
60,92	46,11	46,11	46,11	34,33	200	433,58

(Fuente: Autores)

Con los pesos obtenidos se procede a hacer la simulación colocando la carga máxima en la base de cada una de las patas del robot.

Peso en la pata 1 del robot

La Figura 2.35 indica la simulación con una deformación máxima de 0,158mm colocando todo el peso del robot y de la pierna en la pata 1.

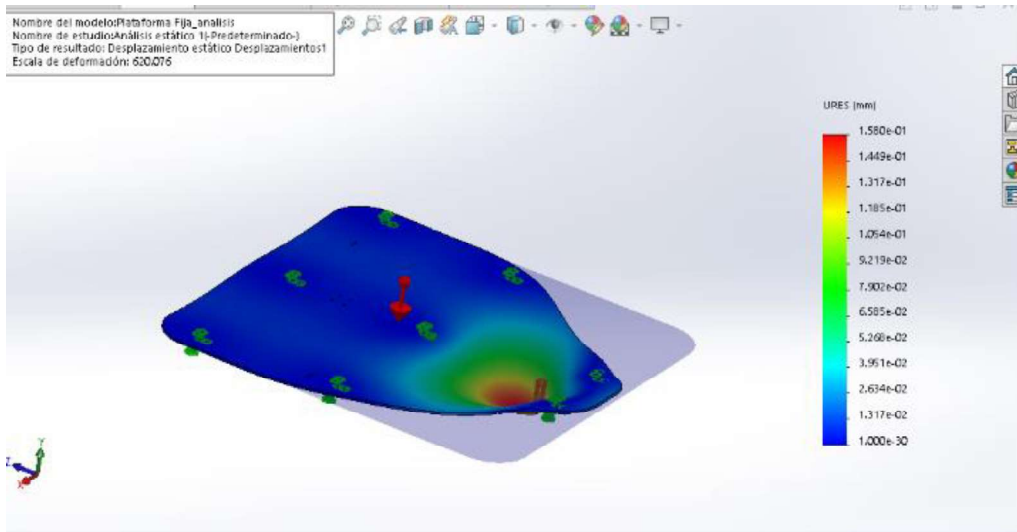


Figura 2.35. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 1.
(Fuente: Autores)

Peso en la pata 2 del robot

En la Figura 2.36 se indica la simulación, obteniendo una deformación máxima de 0,11mm colocando todo el peso del robot y de la pierna en la pata 2

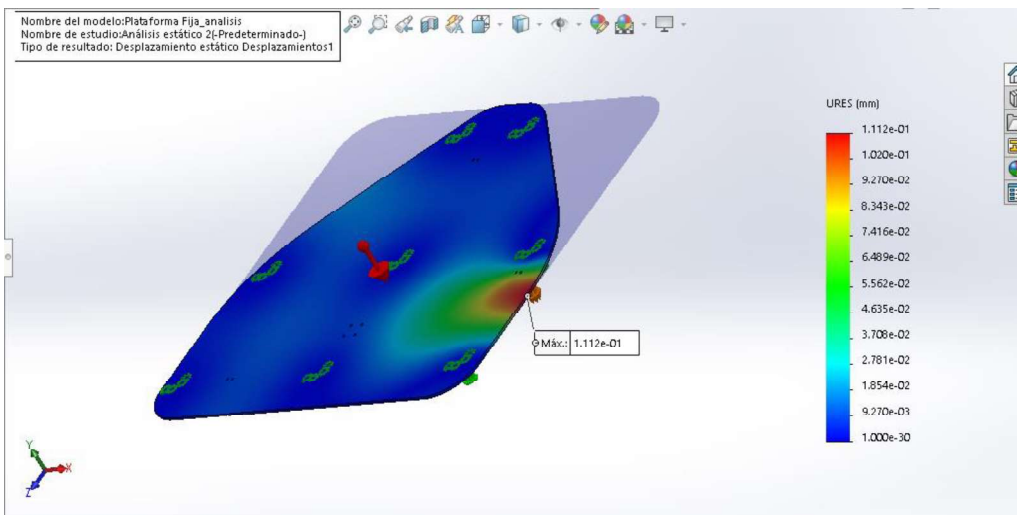


Figura 2.36. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 2.
(Fuente: Autores)

Peso en la pata 3 del robot

La Figura 2.37 indica una deformación máxima de 0,36 mm colocando todo el peso del robot y de la pierna en la pata 3

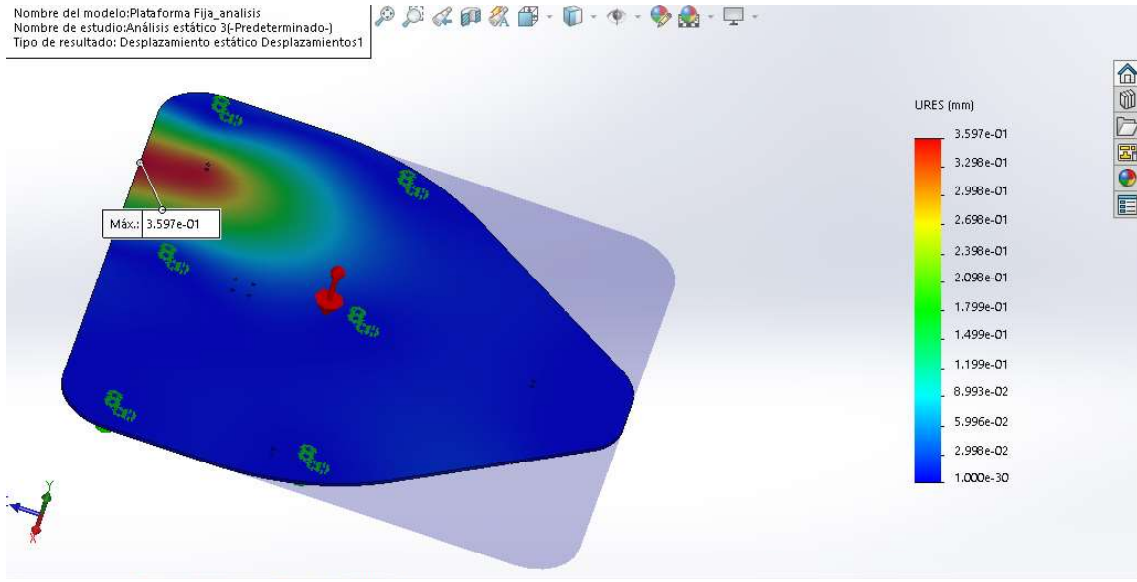


Figura 2.37. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 3.
(Fuente: Autores)

Peso en la pata 4 del robot

En la Figura 2.38 se muestra una deformación máxima de 0,27mm colocando todo el peso del robot y de la pierna en la pata 4.

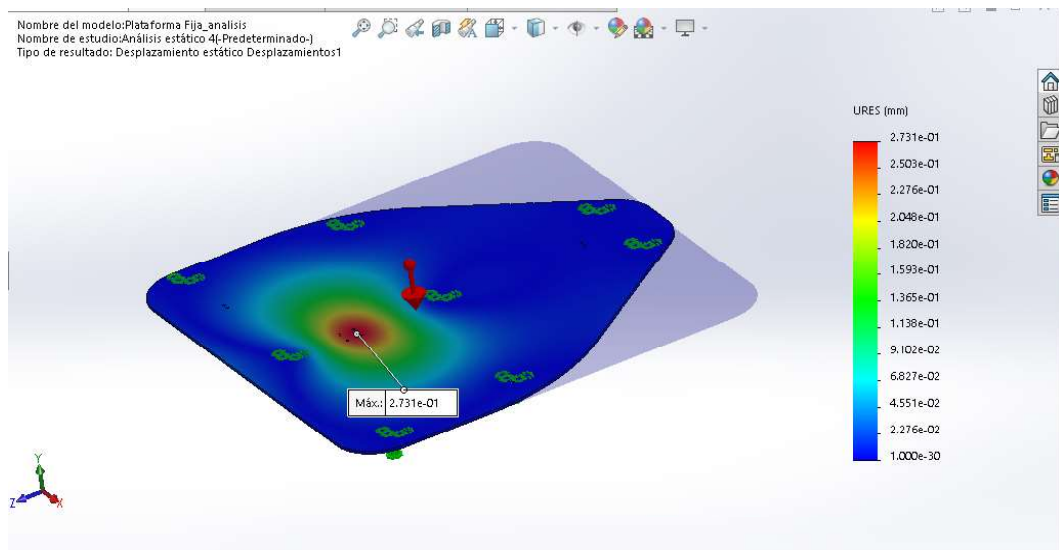


Figura 2.38. Análisis de plataforma fija con el peso en la pata 4.
(Fuente: Autores)

2.4. Elementos de sujeción

Los elementos de sujeción utilizados en la construcción del robot paralelo 3UPS+1RPU son de tipo no permanente, se considera como elementos críticos aquellos que se encuentran en la parte inferior permitiendo la sujeción entre las juntas (universales y revolución) y la plataforma fija, Figura 2.39.

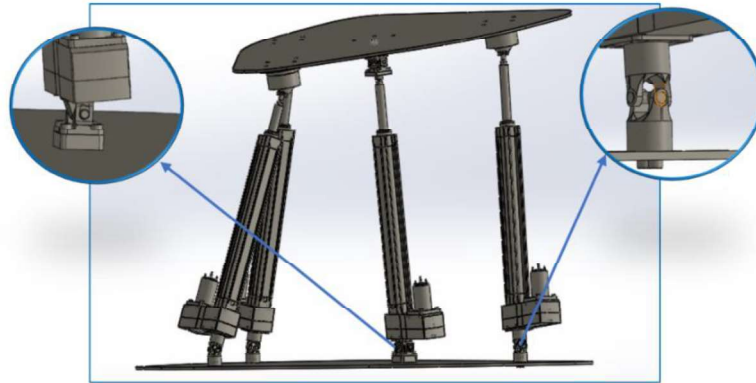


Figura 2.39. Elementos de sujeción de juntas universales y revolución.
(Fuente: Autores)

2.4.1. Elementos de sujeción de la pata 4

La parte inferior del actuador lineal 4 se encuentra unida a la plataforma fija mediante pernos M6 de acero, permitiendo estabilidad con el acople y libre movilidad a la junta de revolución.

El análisis se realiza considerando el área de la plataforma fija de 0,41 m² (Figura 2.35.) y su espesor de 6mm, una densidad de 2700 Kg/m³; determinando su masa total (6,642 Kg) y su peso total (65,09 N) que se distribuirá a lo largo de los cuatro actuadores lineales, considerando 16,27 N por cada pata.

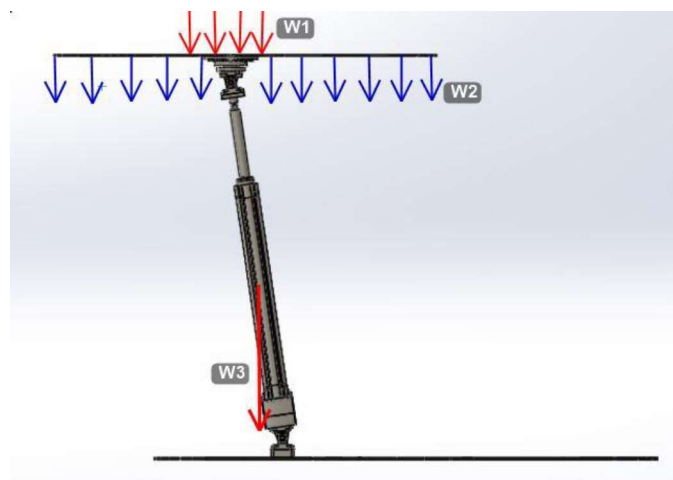


Figura 2.40. Diagrama de cuerpo libre de la pata 4.
(Fuente: Autores)

En la Tabla 2.16 se encuentran los datos de entrada, se toma en cuenta una fuerza en el eje Z de -200 N correspondiente al peso del paciente (Pulloquina, 2018) W1, peso de la plataforma móvil W2 y el peso del actuador lineal W3 aplicado a su centro de gravedad.

Tabla 2.16. Cargas externas aplicadas al robot paralelo 3UPS+1RPU.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$W1 = -200 \text{ N}$ $W2 = -16,27 \text{ N}$ $W3 = -7,81 \text{ N}$	$W_T = W1 + W2 + W3$	$W_T = -224,08 \text{ N}$

(Fuente: Autores)

La rigidez del elemento de sujeción (perno) se considera el área de esfuerzo a la tensión de 20.1 mm^2 del anexo I y al tratarse de un perno M6 ($d=6\text{mm}$) de acero con un módulo elástico de 207 GPa, una longitud total de 40 mm y área de esfuerzo a la tensión de 20.1 mm^2 . Los elementos para sujetar, Figura 2.39 cuentan con un espesor total l de 29.6 mm

Tabla 2.17. Analisis de elementos de sujeción (pernos).

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$d = 6 \text{ mm}$ $l = 29,6 \text{ mm}$ $L = 40 \text{ mm}$ $Ad = 9\pi \text{ mm}^2$ $E = 207 \text{ GPa}$ $lt = 7,6 \text{ mm}$ $At = 20,1 \text{ mm}^2$ $ld = 22 \text{ mm}$	$Ad = \pi d^2 / 4$ $Lt = 2d + 6 \text{ mm}$ $ld = L - Lt$ $lt = l - ld$ $Kb = \frac{AdAtE}{Ad tl + At ld}$	$Ad = 9\pi \text{ mm}^2$ $Lt = 18 \text{ mm}$ $ld = 22 \text{ mm}$ $lt = 7,6 \text{ mm}$ $Kb = 25,378 \text{ MN/m}$

(Fuente: Autores)

La rigidez de los miembros a sujetar se obtiene mediante el uso del análisis de elementos finitos de Wileman, tomando en cuenta el material de cada uno de ellos, siendo en este caso aluminio con un módulo elástico de 71GPa (Tabla 1.2), se considera longitudes de 5.6mm, 15mm y 6mm respectivamente para cada miembro (junta de revolución, acople y plataforma fija.) y los coeficientes A, B que se encuentran descritos en la Tabla 1.2

Tabla 2.18. Análisis de rigidez de los miembros a sujetar.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$d = 6mm$ $l = 5.6 mm$ $A = 0,79670$ $B = 0,63816$ $E = 71 GPa$	$\frac{Km}{Ed} = Ae^{Bd/l}$	$Km1 = 844,025 MN/m$
$d = 6mm$ $l = 15 mm$ $A = 0,79670$ $B = 0,63816$ $E = 71 GPa$	$\frac{Km}{Ed} = Ae^{Bd/l}$	$Km2 = 549,881 MN/m$
$d = 6mm$ $l = 6mm$ $A = 0,79670$ $B = 0,63816$ $E = 71 GPa$	$\frac{Km}{Ed} = Ae^{Bd/l}$	$Km3 = 806,415 MN/m$

(Fuente: Autores)

La rigidez total se determina considerando a cada miembro como resortes que se encuentran en serie.

Tabla 2.19. Análisis de rigidez de varios materiales.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$Km1 = 844,025 MN/m$ $Km2 = 549,881 MN/m$ $Km3 = 806,415 MN/m$	$\frac{1}{Km} = \frac{1}{Km1} + \frac{1}{Km2} + \dots + \frac{1}{Kmn}$	$Km = 235,658 MN/m$

(Fuente: Autores)

Constante de rigidez

La constante de rigidez se obtiene mediante la Ecuación 1.10, permitiendo relacionar las rigideces de los materiales a sujetar con el tipo de perno a usar.

Tabla 2.20. Análisis de la constante de rigidez.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$Km = 235,658 MN/m$ $Kb = 25,378 MN/m$	$C = \frac{Kb}{Kb + Km}$	$C = 0,097$

(Fuente: Autores)

Tensión externa en el perno

La tensión externa en el perno considera la aplicación de las cargas externas, para ello se toma en cuenta una precarga F_i , resistencia de prueba mínima del perno S_p (Anexo II) factor de seguridad n , área de esfuerzo a la tensión A_t y las carga aplicadas W_1 , W_2 y W_3 , Figura 2.40.

Tabla 2.21. Análisis de la tensión externa del perno.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$Sp = 225MP$ $At = 20,1mm^2$	$Fi = 0,75 * At * Sp$	$Fi = 3,393 KN$
$C = 0.097$ $n = 5$ $Sp = 225MP$ $At = 20,1mm^2$ $Fi = 3,393 KN$ $P = 224,08N$	$N = \frac{CnP}{SpAt - Fi}$	$N \approx 1perno$

(Fuente: Autores)

2.4.2. Elementos de sujeción de las patas 1, 2 y 3

Las juntas universales de las patas 1, 2 y 3 se encuentran sujetas a la plancha de aluminio de 6mm mediante tornillos M5 de acero inoxidable. Los agujeros roscados cuentan con una profundidad de 9mm como se indica en la Figura 2.41.

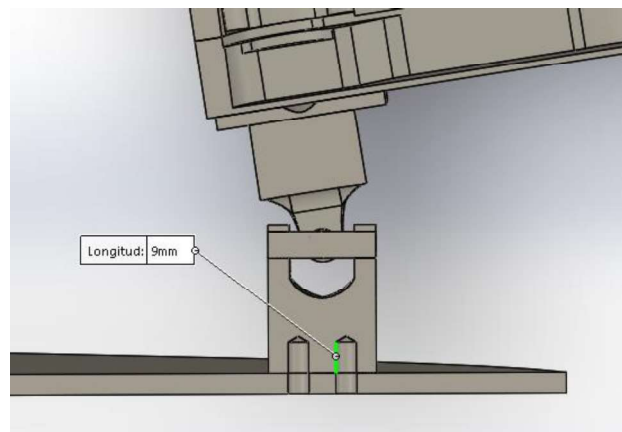


Figura 2.41. Representación en corte de los agujeros roscados en la junta universal.
(Fuente: Autor)

De acuerdo con Shigley, 2008 los parámetros físicos a considerar son iguales que los usados en los pernos con la diferencia del agarre efectivo l' (Ecuación 1.5). Para un sujetador de 5mm de diámetro la longitud de la parte útil sin rosca ld es de 3mm.

En el análisis se considera las fuerzas aplicadas, para este tipo de juntas son las detalladas en el anexo I.

Tabla 2.22. Análisis de pernos.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$h = 6 \text{ mm}$ $d = 5 \text{ mm}$	$l' = h + \frac{d}{2}$ $Ad = \pi d^2/4$	$l' = 8,5 \text{ mm}$ $Ad = 19,63 \text{ mm}^2$
$l' = 8,5 \text{ mm}$ $ld = 3 \text{ mm}$	$lt = l' - ld$	$lt = 5,5 \text{ mm}$

(Fuente: Autores)

La rigidez del sujetador M5 al tratarse de un acero de bajo contenido de carbono su módulo elástico $E=207 \text{ GPa}$. se selecciona al área de esfuerzo de tensión $At= 14.2 \text{ mm}^2$.

Tabla 2.23. Análisis de elementos de sujeción (tornillos).

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$Ad = 19,63 \text{ mm}^2$ $E = 207 \text{ GPa}$ $lt = 5,5 \text{ mm}$ $At = 14,2 \text{ mm}^2$ $ld = 3 \text{ mm}$	$Kb = \frac{AdAtE}{Ad lt + At ld}$	$Kb = 383,22 \text{ MN/m}$

(Fuente: Autores)

Rigidez de los miembros a sujetar.

Se toma en cuenta el espesor de la placa de aluminio (6 mm) y la profundidad del agujero roscado de la junta universal y aplicando la Ecuación 1.8 se selecciona los coeficientes A y B.

Tabla 2.24. Análisis de la rigidez de miembros a sujetar.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$d = 5 \text{ mm}$ $l = 6 \text{ mm}$ $A = 0,79670$ $B = 0,63816$ $E = 71 \text{ GPa}$	$\frac{Km}{Ed} = Ae^{Bd/l}$	$Km1 = 481,372 \text{ MN/m}$
$d = 5 \text{ mm}$ $l = 9 \text{ mm}$ $A = 0,78715$ $B = 0,62873$ $E = 207 \text{ GPa}$	$\frac{Km}{Ed} = Ae^{Bd/l}$	$Km2 = 1155,29 \text{ MN/m}$

(Fuente: Autores)

La rigidez total se determina considerando a cada miembro como resortes que se encuentran en serie.

Tabla 2.25. Rigidez total de los miembros.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$K_{m1} = 481,372 \text{ MN/m}$ $K_{m2} = 1155,29 \text{ MN/m}$	$\frac{1}{K_m} = \frac{1}{K_{m1}} + \frac{1}{K_{m2}} + \dots + \frac{1}{K_{mn}}$	$K_m = 339,792 \text{ MN/m}$

(Fuente: Autores)

Constante de rigidez.

La constante de rigidez se obtiene mediante la Ecuación 1.10 permitiendo relacionar las rigideces de los materiales a sujetar con el tipo de perno a usar.

Tabla 2.26. Análisis de constante de rigidez.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$K_b = 383,22 \text{ MN/m}$ $K_m = 339,792 \text{ MN/m}$	$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$	$C = 0,53$

(Fuente: Autores)

Tensión externa en el tornillo

El cálculo de la tensión externa en el perno considera las cargas externas, para ello se toma en cuenta una precarga F_i , resistencia de prueba mínima del perno S_p (Anexo II) factor de seguridad n . área de esfuerzo a la tensión A_t y las carga aplicadas W_1 , W_2 y W_3 (Figura 2.40).

Tabla 2.27. Análisis de la tensión externa en el tornillo.

Datos de entrada	Ecuaciones	Resultados
$S_p = 225 \text{ MP}$ $A_t = 14,2 \text{ mm}^2$ $C = 0,53$ $n = 5$ $S_p = 225 \text{ MP}$ $A_t = 14,2 \text{ mm}^2$ $F_i = 2,396 \text{ KN}$ $P = 224,08 \text{ N}$	$F_i = 0,75 * A_t * S_p$ $N = \frac{CnP}{S_p A_t - F_i}$	$F_i = 2,396 \text{ KN}$ $N \approx 1 \text{ perno}$

(Fuente: Autores)

2.5. Construcción y ensamble del robot paralelo 3UPS-1RPU

2.5.1. Construcción de las piezas

Para realizar el ensamblaje del robot paralelo 3UPS+1RPU primero fue necesaria la construcción y maquinado de las piezas descritas en la sección 2.3. A continuación se detallan las piezas fabricadas en el centro de mecanizado CNC con su respectivo anexo de la programación en SolidCAM:

Los elementos de la Tabla 2.28 fueron fabricadas en un centro de mecanizado.

Tabla 2.28. Elementos fabricados en un centro de mecanizado CNC.

Nombre	Elementos fabricados	Anexo
Acople para la junta universal		ANEXO DIGITAL VII
Acople para la junta de revolución		ANEXO DIGITAL VIII
Acople para el vástago de la junta prismática		ANEXO DIGITAL IX
Chumacera para el rodamiento 1234567		ANEXO DIGITAL X
Acople para el motor Maxon 148877		ANEXO DIGITAL XI

(Fuente: Autores)

Los elementos de Tabla 2.29. fueron fabricadas en un torno paralelo:

Tabla 2.29. Elementos fabricados en un torno paralelo.

Nombre	Elementos fabricados
Acople para la junta esférica	
Acople para la junta universal de la pata 4	
Eje para la junta universal de la pata 4	
Soporte eje rodamiento	

(Fuente: Autores)

2.5.2. Ensamble del robot paralelo

Para el ensamblaje del robot paralelo se necesitaron los siguientes elementos de sujeción:

Tabla 2.30. Tornillos utilizados para el ensamble.

Tornillos		
UPS	Tornillo avellanado Allen M5x18 DIN7991	4
	Tornillo Allen cilíndrico M4x20 DIN912	4
	Tornillo avellanado Allen M5x16 DIN7991	2
	Tornillo Allen cilíndrico M6x12 DIN912	4
	Tornillo Allen cilíndrico M6x20 DIN912	4
	Tornillo Allen cilíndrico M6x16 DIN912	4
RPU	Tornillo Allen cilíndrico M6x35 DIN912	4
	Tornillo Allen cilíndrico M6x25 DIN912	4
	Tornillo avellanado Allen M6x18 DIN7991	3
	Tornillo avellanado Allen M6x18 DIN7991	4
	Tornillo avellanado Allen M5x12 DIN7991	2

(Fuente: Autores)

Tabla 2.31. Tuercas utilizadas para el ensamble.

Tuercas		
UPS	Tuerca autoblocante M5 DIN 982	4
	Tuerca autoblocante M4 DIN 982	4
	Tuerca autoblocante M6 DIN 982	4
	Tuerca autoblocante M6 DIN 982	4
RPU	Tuerca autoblocante M6 DIN 982	4

(Fuente: Autores)

Tabla 2.32. Arandelas utilizadas para el ensamble.

Arandelas		
UPS	Para M4 DIN125B	4
	Para M6 DIN125B	4
RPU	Para M6 DIN125B	4

(Fuente: Autores)

Ensamble de la pata 4

Se empieza con el ensamblaje de la junta universal con rodamiento, iniciando con la colocación del rodamiento en la chumacera y luego el eje como se muestra en la Figura 2.42. Se coloca la junta de revolución y el acople para el vástago de la junta prismática en el eje, además la chumacera se une con el acople para la junta universal de la pata 4. La junta universal de la pata 4 ya ensamblada se muestra en la Figura 2.43.



Figura 2.42. Ensamble de eje, rodamiento y chumacera.
(Fuente: Autores)



Figura 2.43. Junta universal de la pata 4.
(Fuente: Autores)

Se instala el motor Maxon 148877 en el acople para motor ,Figura 2.44 utilizando pernos M4x15mm, posteriormente se coloca en el conjunto paralelo unido a la junta prismática por medio de 4 pernos M6x20mm. En el eje del motor y en el eje del actuador lineal se colocan los manguitos de fijación, cumpliendo la función de transmitir el movimiento entre el eje del motor y el eje de la junta prismática por medio de una banda dentada, Figura 2.45. Todo este proceso se repite para las cuatro patas.



Figura 2.44. Conjunto paralelo ensamblado con el motor y el actuador.
(Fuente: Autores)



Figura 2.45. Elementos de transmisión del conjunto paralelo.
(Fuente: Autores)

Como se observa en la Figura 2.46, la junta de revolución se une con el acople y la plataforma fija por medio de 4 pernos M6x35mm, tuercas autoblocantes y arandelas; y el otro extremo de la junta de revolución se la unió al conjunto paralelo con pernos M6x20mm.



Figura 2.46. Ensamble de la junta de revolución de la pata 4.
(Fuente: Autores)

Ensamble de las patas 1,2 y 3

Las juntas universales se unen a un extremo con la plataforma fija por medio de dos pernos Allen de cabeza cilíndrica M5x18mm, mientras que al otro extremo se coloca el acople de la junta universal por medio de dos tornillos Allen de cabeza avellanada M5x15 (Figura 2.47).



Figura 2.47. ensamblaje de la junta universal de las patas 1, 2 y 3.
(Fuente: Autores)

En la Figura 2.48. se puede observar la base de la junta esférica se une a la plataforma móvil por medio del acople mediante tornillos Allen avellanados M5x16mm y para sujetarlo a la plataforma fija se utiliza tornillos M6x20mm; y al otro extremo de la junta esférica se coloca el actuador lineal.



Figura 2.48. Ensamble de la junta esférica.
(Fuente: Autores)

2.6. Protocolo de pruebas mecánicas de funcionalidad

Las pruebas de funcionalidad del robot paralelo 3UPS+1RPU se realizan tomando en consideración un estado inicial, Figura 2.49 y dos sistemas de coordenadas; uno de la plataforma fija y otro de la plataforma móvil, Figura 2.50.

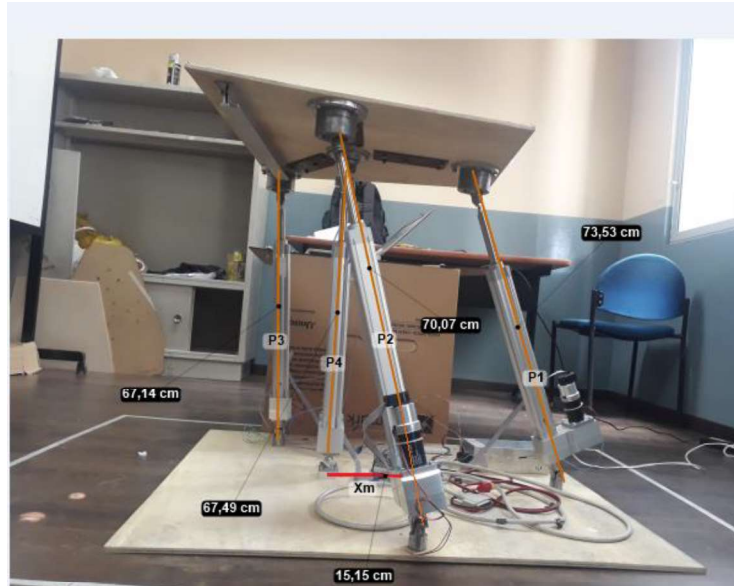


Figura 2.49. Estado inicial del robot paralelo 3UPS+1RPU.
(Fuente: Autores)

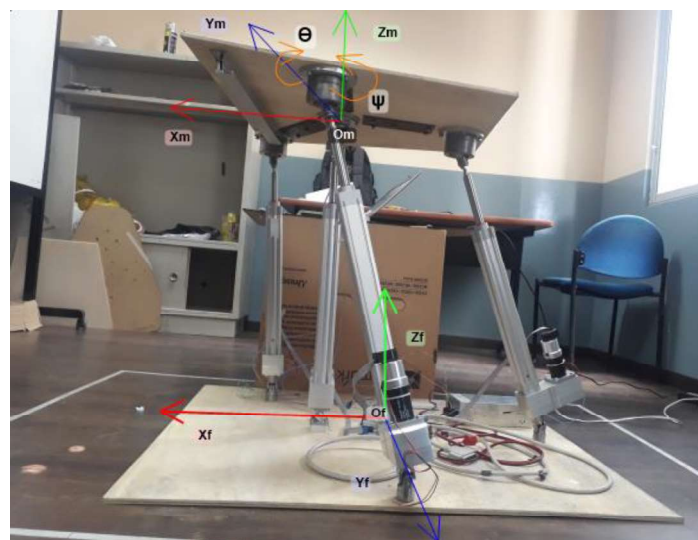


Figura 2.50. Sistemas de coordenadas del robot paralelo 3UPS+1RPU.
(Fuente: Autores)

Se dimensiona la zona de trabajo del robot paralelo 3UPS+1RPU para los planos XY, XZ y ZY, Figura 2.51, permitiendo la parametrización en las evidencias fotográficas.

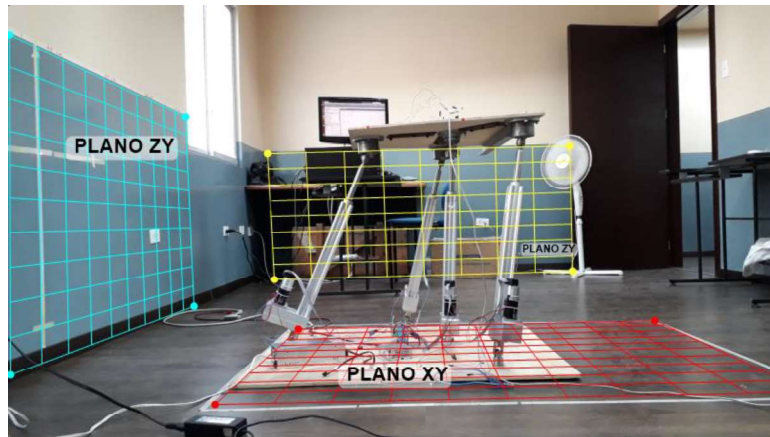


Figura 2.51. Dimensionamiento de los planos XY, XZ y ZY.
(Fuente: Autores)

Los movimientos alrededor de los ejes Y_m y Z_m son medidos mediante la colocación de un giroscopio en la plataforma móvil, Figura 2.52 siendo controlado mediante la programación del código fuente (Anexo XII) aplicado a una placa de Arduino.



Figura 2.52. Elementos usados en la medición de movimientos alrededor de los ejes Y_m y Z_m .
(Fuente: Autores)

Se coloca cámaras de video que permitan evidenciar el desplazamiento sufrido en los planos antes establecidos a partir de la posición inicial.

Los parámetros por considerar en las pruebas mecánicas del robot paralelo 3UPS+1RPU son:

- Funcionalidad de los elementos actuadores, juntas y acoples.
- Estabilidad mecánica de todos los componentes que conforman el mecanismo.

- Cumplimiento en los movimientos para la rehabilitación de rodilla establecidos a continuación.
- Inspección en el movimiento de flexión de cadera.
- Inspección en el movimiento de flexión-extensión de rodilla.
- Inspección en el movimiento de rotación interna y externa de rodilla.
- Inspección en el movimiento de flexión-extensión de tobillo.

La validación se realiza ingresando los datos de entrada (Θ , ψ , X_m y Z_m) al modelo matemático de Matlab elaborado por Pulloquina, 2018 y mediante movimientos manuales se coloca a cada actuador lineal en la posición requerida.

Las evidencias fotográficas son parametrizadas en el software de análisis de movimiento conocido como Kinovea, cuyos resultados son las mediciones de las longitudes y posiciones finales de cada actuador lineal.

2.7. Costos del robot

En esta sección se encuentran todos los costos referentes a mano de obra, materia prima, insumos y elementos normalizados:

2.7.1. Costo de materia prima

Tabla 2.33. Costos de materia prima.

Nombre	Especificación	Unidad	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Total (\$)
Cilindro de aluminio	Diámetro de 3.1/2"	mts	606,06	0,16	100,00
Cilindro de aluminio	Diámetro de 2.1/2"	mts	128,57	0,12	16,07
Cilindro de aluminio	Diámetro de 4.1/2"	mts	1099,33	0,08	87,5
Plancha de aluminio	122*244mm de 6mm espesor	U	180,00	1	180,00
				Total	384,02

(Fuente: Autores)

2.7.2. Costo de insumos

Tabla 2.34. Costos de insumos.

Nombre	Especificación	Unidad	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Total (\$)
Juntas esféricas	Cicrosa Mod. 123R	u	207,58	3	622,74
Juntas universales	Belden UJ NB1200*00	u	274,82	3	824,46
Brida basculante	SNCL tamaño 32	u	38,40	2	76,8
Brida basculante	SNCB tamaño 32	u	38,40	2	76,8
Rodamiento	Rígido de bolas 16006	u	12,50	1	12,5
Motor	Maxon 148877	u	657,48	4	2629,92
Encoder	Maxon 386053	u	341,32	4	1365,28
Freno	Maxon 228384	u	722,18	4	2888,72
Actuador prismático	Festo 32-300-BS	u	541,65	4	2166,6
Conjunto paralelo	EAMM-U-60-D32	u	256,30	4	1025,20
Manguito de fijación	Festo	u	180,00	4	720,00
Tarjeta	PCI-1720U	u	796,22	1	796,22
Regleta de conexión	ADAM 3937	u	105,25	2	210,50
Cable	Advantech PCL-10137-3E	u	48,05	2	96,10
Tarjeta encoder	Advantech PCI-1784U	u	819,10	1	819,10
Tarjeta multifunción	Advantech PCL-812PG	u	650,00	1	650,00
Regleta de conexión	IDC 20 pin socket	u	20,00	1	20,00
Control de potencia	Maxon ESCON 50/5	U	416,54	4	1666,16
Fuente/Alimentación	24V y 25A HRP-600-24	u	299,51	1	299,51
Fuente/Alimentación	5V y 1A Mean Well	u	81,67	1	81,67
				Total	17048,28

(Fuente: Autores)

2.7.3. Costos de elementos normalizados

Tabla 2.35. Costos de elementos normalizados.

Nombre	Especificación	Unidad	Costo Unitario	Cantidad	Total (\$)
Tornillo avellanado Allen	M5x18 DIN7991	U	0,10	4	0,40
Tornillo Allen cilíndrico	M4x20 DIN912	U	0,10	4	0,40
Tornillo avellanado Allen	M5x16 DIN7991	U	0,10	2	0,20
Tornillo Allen cilíndrico	M6x12 DIN912	U	0,12	4	0,48
Tornillo Allen cilíndrico	M6x20 DIN912	U	0,12	4	0,48
Tornillo Allen cilíndrico	M6x16 DIN912	U	0,12	4	0,48
Tornillo Allen cilíndrico	M6x35 DIN912	U	0,15	4	0,60
Tornillo Allen cilíndrico	M6x25 DIN912	U	0,14	4	0,56
Tornillo avellanado Allen	M6x18 DIN7991	U	0,12	7	0,98
Tornillo avellanado Allen	M5x12 DIN7991	U	0,10	2	0,2
Tuerca autoblocante	M5 DIN 982	U	0,08	4	0,32
Tuerca autoblocante	M4 DIN 982	U	0,08	4	0,32
Tuerca autoblocante	M6 DIN 982	U	0,08	12	0,96
Arandela	Para M4 DIN125B	U	0,05	4	0,20
Arandela	Para M6 DIN125B	U	0,05	8	0,40
				Total	6,98

(Fuente: Autores)

2.7.4. Costos de mano de obra

Tabla 2.36. Costos de mano de obra.

Nombre	Especificación	Unidad	Costo Unitario (\$)	Cantidad	Total (\$)
Junta esférica	Taladrado y machuelado x3	h	15,00	2.5	30,00
Junta universal	Refrentado, taladrado y machuelado x3	h	15,00	3	45,00
Maquinado CNC	3 acoples para la junta universal	h	37,00	2	74,00
Maquinado CNC	1 acople para la junta de revolución	h	37,00	0.5	18,50
Maquinado CNC	1 acople para el vástago del actuador lineal	h	37,00	0.5	18,50
Maquinado CNC	4 acoples para el motor Maxon 148877	h	37,00	3	111,00
Maquinado CNC	1 chumacera para el rodamiento 16006	h	37,00	0.6	22,2
Corte	Corte de cilindros de aluminio	h	5,00	4	20,00
Torneado	Acople para la junta esférica	h	15,00	0.4	6,00
Torneado	Acople para la junta universal, pata 4	h	15,00	0.4	6,00
Torneado	Eje para la junta universal	h	15,00	0,5	7,50
Torneado	1 soporte para el rodamiento	h	15,00	0,3	4,5
				Total	363,20

(Fuente: Autores)

Tabla 2.37. Costos generales del robot.

	Costo \$
Materia prima	384,02
Insumos	17048,28
Elementos normalizados	6,98
Mano de obra	363,20
TOTAL	17802,48

(Fuente: Autores)

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Plataformas móvil y fija

Plataforma móvil

En la sección 2.3.3 se realizaron las simulaciones correspondientes para la selección del espesor adecuado para la plataforma móvil obteniendo los siguientes datos:

Tabla 3.0.1. Resultados de la simulación de la plataforma móvil.

Material	Espesor de la plataforma	Máxima deformación	Peso
Acero inoxidable	3 mm	7,219 mm	10,79 kg
304	4 mm	3,364 mm	14,39 kg
Aluminio 3003 H14	6mm	2,606 mm	7,38 kg

(Fuente: Autores)

Observando la Tabla 3.0.1 se tiene que la mejor opción para la plataforma móvil es utilizar un material de Aluminio 3003-H14 con un espesor de 6mm debido a que se tiene una deformación máxima de 2,606 mm y con un peso de 7,38 kg.

Plataforma fija

En la sección 2.3.4 se realizó el análisis correspondiente para conocer si la plataforma fija tendría una deformación significativa, el material es de aluminio 3003 H14 y de espesor 6mm y se realizaron 4 análisis colocando el todo el peso del sistema en la base de cada pata del robot con lo cual se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla 3.2. Resultados de la simulación de la plataforma fija.

Ubicación de la carga máxima	Máxima deformación
Pata 1	0,158 mm
Pata 2	0,11 mm
Pata 3	0,36 mm
Pata 4	0,273 mm

(Fuente: Autores)

En la Tabla 3.2 se observa una deformación máxima de 0,36mm por lo cual el espesor planteado de 6mm y el material de aluminio 3003-H14 son adecuados para la base del

robot paralelo siempre y cuando los soportes se los coloque en las posiciones establecidas en el diseño.

3.1.2. Resultados de las pruebas mecánicas

Una vez finalizada la construcción del robot paralelo 3UPS+1RPU se realizó el protocolo de pruebas, donde se verifica el correcto funcionamiento de los distintos mecanismos mecánicos que permitan los movimientos en la rehabilitación de rodilla establecidos por Pulloquinga, 2018.

Los parámetros por comprobarse son:

- Inspección en el movimiento de flexión de cadera
- Inspección en el movimiento de flexión-extensión de rodilla
- Inspección en el movimiento de rotación interna y externa de rodilla
- Inspección en el movimiento de flexión-extensión de tobillo

Inspección en el movimiento de flexión de cadera

El movimiento de flexión de cadera debe cumplir con el principal requerimiento del movimiento en el eje Z, elevando la plataforma móvil cerca de 200 mm a partir de la posición inicial establecida (Figura 2.49).

Los resultados obtenidos de las extensiones máximas de cada actuador lineal se indican en la Tabla 3.3 y mediante el software Matlab al ingresar los datos de entrada ($\Theta = 0^\circ$, $\psi = 0^\circ$, $X_m = 150$ mm), fueron verificados en el robot con el uso del software Kinovea como se indica en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

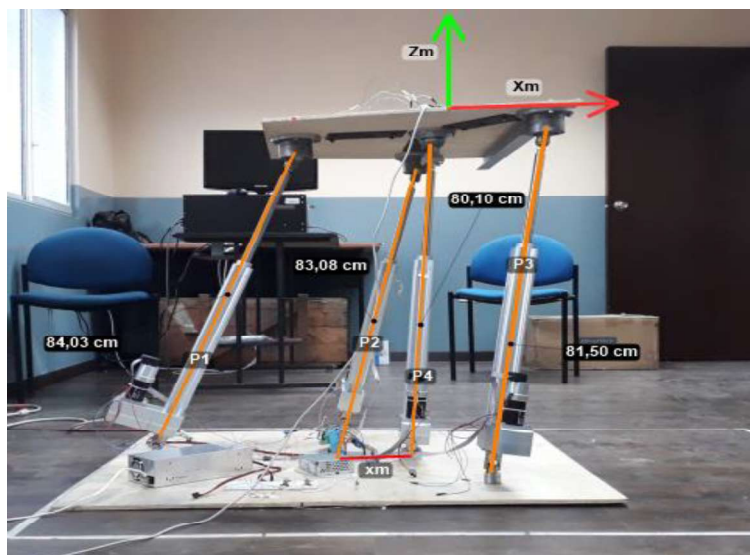


Figura 3.1. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión de cadera.

(Fuente: Autores)

Tabla 3.3. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión de cadera.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,15 [m]	P1	0,8382	0,84 [m]
Z_m	0,8 [m]	P2	0,8201	0,83 [m]
Θ	0 [rad]	P3	0,804	0,815 [m]
ψ	0 [rad]	P4	0,8	0,8 [m]
		Θ		0.001 [rad]
		ψ		0.003 [rad]

(Fuente: Autores)

Inspección en el movimiento de flexión-extensión de rodilla

El movimiento de flexión-extensión de rodilla, se obtuvo cuando la plataforma móvil del robot paralelo 3UPS+1RPU se encuentra a 200 mm y a -100 mm en el eje X, la posición inicial del actuador lineal 4 se encuentra a 100 mm de su mínima posición, evitando la colisión de los pistones restantes al realizar la maniobra.

La Figura 3.2. Indica los resultados medidos a los actuadores lineales al realizar el movimiento antes descrito y con parámetro de entrada ($\Theta=0^\circ$, $\psi=0^\circ$, $X_m=37$ mm, $Z_m=675$ mm), ingresados para la verificación en el software de Matlab.

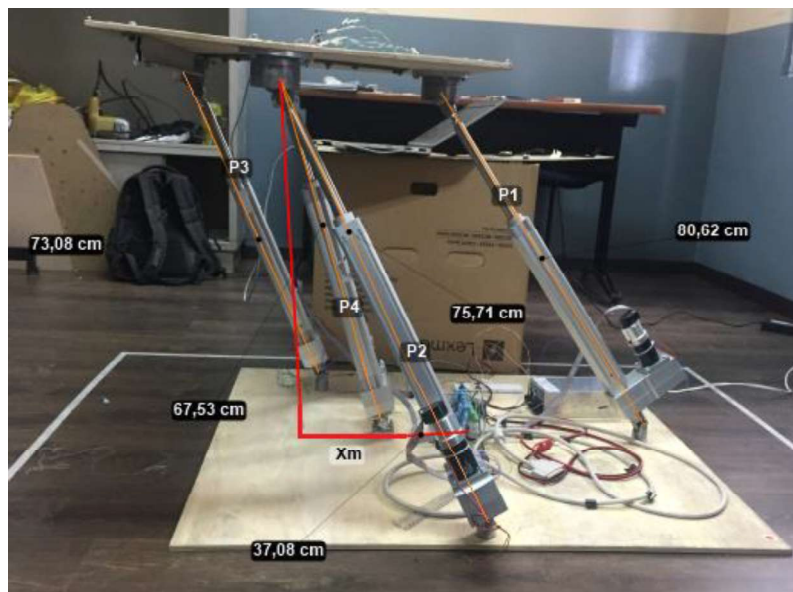


Figura 3.2. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de rodilla.

(Fuente: Autores)

En la Tabla 3.4. se encuentran los valores calculados mediante Matlab y los obtenidos en el robot paralelo 3UPS+1RPU.

Tabla 3.4. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión-extensión de rodilla.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,37 [m]	P1	0,8102	0,806 [m]
Z_m	0,675 [m]	P2	0,7632	0,757 [m]
Θ	0 [rad]	P3	0,7189	0,73 [m]
ψ	0 [rad]	P4	0,6957	0,675 [m]
		Θ		0,03228 [rad]
		ψ		0 [rad]

(Fuente: Autores)

Inspección en el movimiento de rotación interna y externa de rodilla

El movimiento de rotación interna y externa de rodilla se realiza con el movimiento alrededor del eje Z con límites $\psi = 15^\circ$, Figura 3.6 y $\psi = -15^\circ$, Figura 3.4 la movilidad se realizó con menores posibilidades de bloqueo tomando en consideración el estado inicial. En la Figura 3.3 se indica el recorrido de los actuadores lineales, medidos mediante Kinovea



Figura 3.3. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de rotación interna y externa de rodilla con rotación ψ .

(Fuente: Autores)

En la Tabla 3.5. se encuentran los valores calculados mediante Matlab y los obtenidos en el robot paralelo 3UPS+1RPU con los parámetros de entrada antes mencionados.

Tabla 3.5. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión-extensión de rodilla alrededor del eje Z con ψ positivo.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,15 [m]	P1	0,7276	0,735 [m]
Z_m	0,675 [m]	P2	0,6878	0,685 [m]
Θ	0 [rad]	P3	0,6933	0,7 [m]
ψ	0,2618 [rad]	P4	0,675	0,675 [m]
		Θ		0,00349 [rad]
		ψ		0,2618 [rad]

(Fuente: Autores)

En la Figura 3.5 se indica el recorrido de los actuadores lineales al aplicar los parámetros de entrada ($\Theta=0^\circ$, $\psi=-15^\circ$, $X_m=150$ mm, $Z_m=675$ mm), comparados con los resultados obtenidos en Matlab.

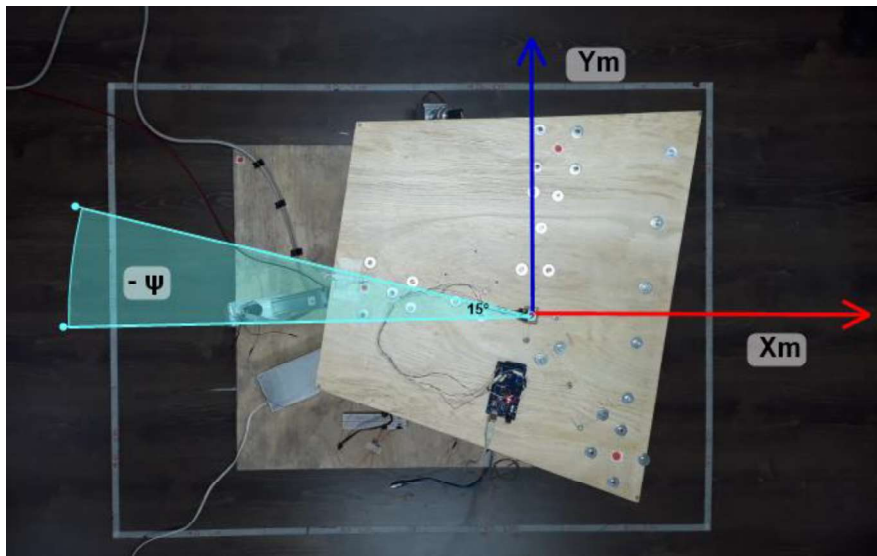


Figura 3.4. Angulo negativo de rotación del robot del robot paralelo 3UPS+1RPU alrededor del eje Z.

(Fuente: Autores)

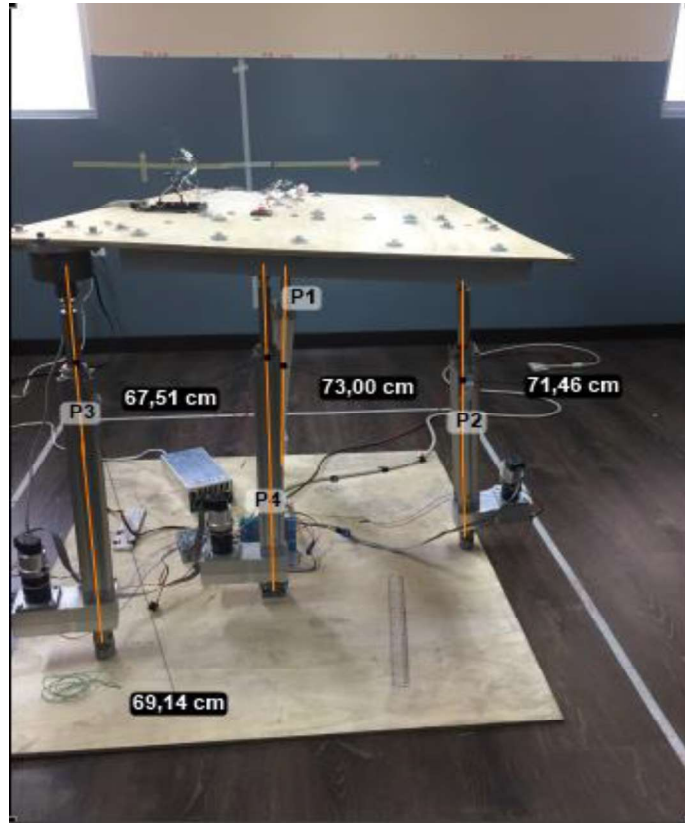


Figura 3.5. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de rotación interna y externa de rodilla con rotación $-\psi$.
(Fuente: Autores)

En la Tabla 3.6. se encuentran los valores calculados mediante Matlab y los obtenidos en el robot paralelo 3UPS+1RPU con los parámetros de entrada antes mencionados.

Tabla 3.6. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión-extensión de rodilla alrededor del eje Z con ψ negativo.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,15 [m]	P1	0,7276	0,73 [m]
Z_m	0,675 [m]	P2	0,7208	0,71 [m]
Θ	0 [rad]	P3	0,6751	0,69 [m]
ψ	-0,2618 [rad]	P4	0,675	0,675 [m]
		Θ		0,00418 [rad]
		ψ		-0,2618 [rad]

(Fuente: Autores)

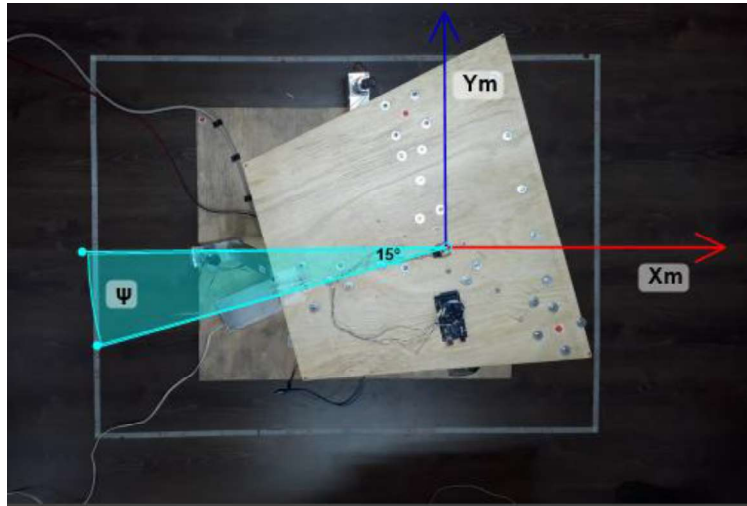


Figura 3.6. Angulo positivo de rotación del robot paralelo 3UPS+1RPU alrededor del eje Z.
(Fuente: Autores)

Inspección en el movimiento de flexión-extensión de tobillo

El movimiento de flexión y extensión de rodilla se realizó con el recorrido alrededor del eje y cumpliendo con rangos entre $\Theta=30^\circ$ y $\Theta=-30^\circ$ a partir de la posición inicial (Figura 2.49), permitiendo que las rotaciones se realicen sin restricción.

Los recorridos medidos en el robot paralelo 3UPS+1RPU se describen en la Figura 3.7 considerando los parámetros de entrada ($\Theta=0^\circ$, $\psi=30^\circ$, $X_m=150$ mm, $Z_m=675$ mm), comparados con resultados obtenidos en Matlab.

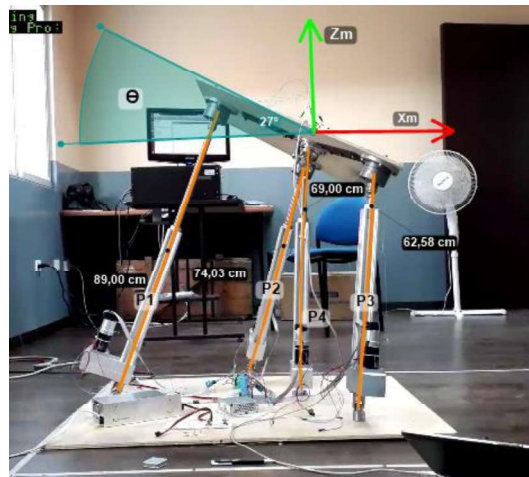


Figura 3.7. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de tobillo con rotación Θ .
(Fuente: Autores)

Tabla 3.7. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión-extensión de rodilla alrededor del eje Y con Θ positivo.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,15 [m]	P1	0,88	0,89 [m]
Z_m	0,675 [m]	P2	0,7424	0,74 [m]
Θ	0,48624 [rad]	P3	0,5916	0,62 [m]
ψ	0,29024 [rad]	P4	0,69	0,69 [m]
		Θ		0,48624 [rad]
		ψ		0,29024 [rad]

(Fuente: Autores)

Los recorridos medidos en el robot paralelo 3UPS+1RPU se describen en la Figura 3.8 considerando los parámetros de entrada ($\Theta=0^\circ$, $\psi=-30^\circ$, $X_m=150$ mm, $Z_m=675$ mm), comparados con resultados obtenidos en Matlab.

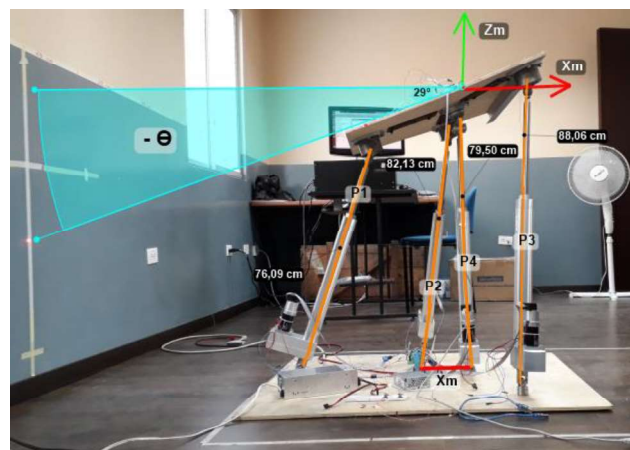


Figura 3.8. Posición de los actuadores lineales en el análisis para el movimiento de flexión-extensión de tobillo con rotación $-\Theta$.

(Fuente: Autores)

Tabla 3.8. Recorrido de los pistones en el movimiento de flexión-extensión de rodilla alrededor del eje Z con Θ negativo.

Datos de entrada	Posición	Pistones	Calculado [m]	Real
X_m	0,15 [m]	P1	0,7465	0,76 [m]
Z_m	0,675 [m]	P2	0,8152	0,82 [m]
Θ	-0,5235 [rad]	P3	0,8608	0,88 [m]
ψ	0 [rad]	P4	0,795	0,795 [m]
		Θ		0
		ψ		-0,5061 [rad]

(Fuente: Autores)

4. CONCLUSIONES

- Cuando la pata 4 se encuentra en un ángulo menor de 90° se encuentra en mayor probabilidad de caer en puntos de singularidad teniendo como consecuencia que este robot paralelo tendrá mayor estabilidad cuando la pata 4 está igual o mayor a 90° respecto a la plataforma fija.
- Se determinó que el rango de trabajo es de 0,19m a 0,35m a lo largo del eje x, teniendo como limitante el valor de inclinación de las juntas esféricas cuando $x=0,35m$ y entrando en zona de singularidad en $x=0,19m$.
- La comparación de los valores calculados mediante el software Matlab con los valores medidos en el robot paralelo presenta una diferencia entre 0,01m y 0,03m en las cuatro juntas prismáticas y una desviación angular de 0,1 radianes.
- El comportamiento de los motores ante las cargas presentes fue adecuado para esta aplicación, sin embargo, si se van a realizar modificaciones en el diseño del robot, debe considerarse la adquisición de motores con un mayor torque.
- El uso del software Kinovea ayudó a definir los parámetros necesarios para establecer el protocolo de pruebas en la validación mecánica del robot paralelo 3UPS+1RPU.

4.1.1. Recomendaciones

- Antes de empezar el funcionamiento del robot paralelo con los motores, debe considerarse evitar la zona de singularidades debido a que podría ocasionar una sobrecarga en los motores llegando a afectar su correcto funcionamiento, para lo cual primero debe validarse la región de singularidades por medio de pruebas.
- Para versiones próximas del robot paralelo 3UPS+1RPU se recomienda diseñar la junta de revolución con una mayor rigidez debido a que esta junta es la que impide la rotación del robot alrededor del eje X, por lo cual tiende a desgastarse más rápido que las otras juntas.
- Verificar que los ejes de las juntas de la plataforma fija, al igual que los ejes de las juntas de la plataforma móvil; se encuentren estrictamente en un mismo plano de trabajo, reduciendo el riesgo de caer en una zona de singularidad.

Referencias Bibliográficas

- Aguas, X. (2018). *Diseño, construcción y control de un prototipo de robot paralelo accionado por cuatro cables*. Quito: EPN.
- Álvarez, R. (06 de abril de 2018). *Exoesqueleto de Cyberdyne*. Obtenido de <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/hal-el-exoesqueleto-de-cyberdyne-que-se-controla-con-la-mente-finalmente-esta-listo-para-salir-a-la-venta>
- Aquino, M., & Pozo, E. (2017). *Modelo Dinámico de un robot Paralelo para la Rehabilitación de Rodilla*. Quito: EPN.
- Arduino. (11 de octubre de 2018). *ARDUINO.cl*. Obtenido de <https://arduino.cl/que-es-arduino/>
- Armas, C. (2018). *Desarrollo del Modelo Dinámico lineal en parámetros inerciales de un robot paralelo para rehabilitación de rodilla*. Quito: EPN.
- Ataugard. (15 de agosto de 2019). *Biomecánica de la rodilla*. Obtenido de http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lmt/de_l_lm/capitulo2.pdf
- Blanco, N., Antunez, C., & Abundez, A. (2019). Diseño de un Robot Paralelo para el Anavea. *Memorias del XXIV Congreso Internacional Anual de la Somim*, 1-2.
- Briot, S., & Khalil, W. (2015). *Dynamic of Parallel Robots*. Nantes, Francia: Springer International Publishing.
- Chaparro, D. (2014). *Desarrollo de un dispositivo para la rehabilitación de rodilla basado en un mecanismo paralelo*. Queretaro: Instituto Politécnico Nacional.
- Cristian, L., & Daniel, F. (2019). *Validación cinemática de un robot paralelo de tipología 3UPS+RPU*. Quito: EPN.
- Díaz, M. (2018). *Aplicaciones de los robots paralelos*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Isidro, J. (2012). *Robot Paralelo para la Rehabilitación de Tobillo*. Cuernavaca: Centro de investigación y desarrollo tecnológico.
- Juan, A., Guillermo, S., Romero, B., Luis, A., & Guillermo, U. (2016). Diseño mecánico de un exoesqueleto para rehabilitación de miembro superior. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 79-90.
- Juan, T., & Yordy, T. (2015). *Robot planar paralelo RRR*. Bogotá: universidad Piloto de Colombia.
- Lokomat. (17 de mayo de 2014). *Fundación Lescer*. Obtenido de http://www.infodca.com/ficha_show/469
- Merlet, J. (2006). *Parallel Robots (Vol. 128)*. (2, Ed.). Antipolis, Francia: G.M.L. GLADWELL.
- Pulloquina, J. (2018). *Análisis de compatibilidad del modelo dinámico de un robot paralelo tipo 3ups+1rpu para rehabilitación de rodilla, mediante simulación de mecanismos en msc-adams*. Quito: EPN.

- Richar, N., & Keith, B. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexic D.F.: McGraw-Hill.
- Taghirad, H. (2013). *Parallel robots mechanics and control*. New York: Taylor & Francis Group.
- Tinoco, A. . (2014). *Kinovea Perú.: Fandom*. Obtenido de <https://nntt-uma.fandom.com/es/wiki/Kinovea>.
- Tullius, M. (15 de Septiembre de 2019). *Swortech*. Obtenido de <http://www.swortec.ch/>







Anexos

ANEXO I

Diámetro mayor nominal d , mm	Serie de paso grueso			Serie de paso fino		
	Paso p , mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²	Paso p , mm	Área de esfuerzo de tensión A_t , mm ²	Área del diámetro menor A_r , mm ²
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5.5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1.5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

Anexo I. Diámetros y áreas de roscas métricas de paso grueso y fino.
(Fuente: (Richar & Keith, 2008))

ANEXO II

Clase de propiedad	Intervalo de tamaños, inclusive	Resistencia de prueba mínima, † MPa	Resistencia mínima a la tensión, † MPa	Resistencia mínima a la fluencia, † MPa	Material	Marca en la cabeza
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de bajo o medio carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de bajo o medio carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de bajo o medio carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de medio carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de medio carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1 040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1 220	1 100	Acero aleado, T y R	

Anexo II. Propiedades mecánicas de elementos sujetadores.
(Fuente: (Richar & Keith, 2008))

ANEXO III

Electric cylinders ESBF, with spindle drive



Technical data

Friction losses and driving torque

Friction losses

The friction losses comprise the no-load driving torque and the speed-dependent friction losses.

$$M_{\text{reib}} = M_{\text{leerlauf}} + M_{\text{v}}$$

M_{reib} = Friction torque

M_{leerlauf} = No-load driving torque

M_{v} = Friction torque dependent on the feed speed

Driving torque

The driving torque required for the cylinder comprises the friction torque and the effective torque.

$$M_{\text{antrieb}} = M_{\text{reib}} + M_{\text{nutz}}$$

M_{antrieb} = Required driving torque

M_{reib} = Friction torque

M_{nutz} = Effective torque

No-load driving torque – Ball screw ¹⁾									
Size	32			40			50		
Spindle pitch	[mm/rev]	5	10	5	10	16	5	10	20
No-load driving torque M_{leerlauf}	[Nm]	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3

Size	63			80			100			
Spindle pitch	[mm/rev]	5	10	25	5	15	32	5	20	40
No-load driving torque M_{leerlauf}	[Nm]	0.4	0.45	0.5	0.5	0.6	0.65	0.7	0.9	1.0

No-load driving torque – Lead screw ¹⁾										
Size	32			40			50			
Spindle pitch	[mm/rev]	2.5			3			4		
No-load driving torque M_{leerlauf}	[Nm]	0.1			0.2			0.3		

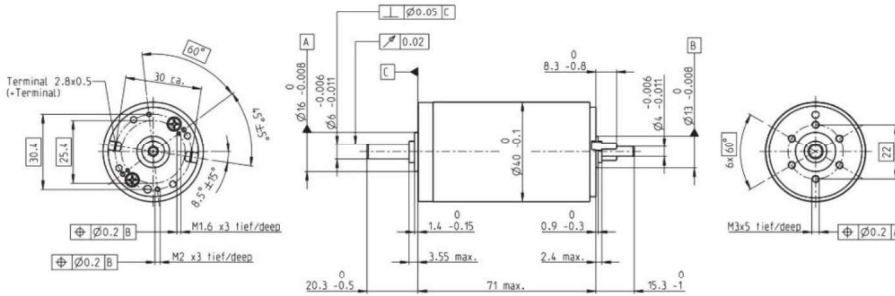
1) Corresponds to the required driving torque without load, at a spindle speed of 200 rpm.

Anexo III. Obtención del torque sin carga
(Fuente: catálogo Festo Electric cylinders ESBF, 2019, p16)

ANEXO IV

maxon DC motor

RE 40 Ø40 mm, Graphite Brushes, 150 Watt



M 1:2

- Stock program
- Standard program
- Special program (on request)

Article Numbers

148866 148867 148877 218008 218009 218010 218011 218012 218013 218014

Motor Data	148866	148867	148877	218008	218009	218010	218011	218012	218013	218014
Values at nominal voltage										
1 Nominal voltage	V	12	24	48	48	48	48	48	48	48
2 No load speed	rpm	6920	7580	7590	6420	5560	3330	2690	2130	1720
3 No load current	mA	241	137	68.6	53.6	43.7	21.9	16.6	12.5	9.66
4 Nominal speed	rpm	6380	6940	7000	5810	4930	2710	2060	1510	1080
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	94.9	177	187	186	180	189	190	192	190
6 Nominal current (max. continuous current)	A	6	6	3.17	2.66	2.23	1.4	1.13	0.909	0.73
7 Stall torque	mNm	1720	2420	2560	2040	1620	1020	814	855	523
8 Starting current	A	105	80.2	42.4	28.6	19.7	7.43	4.79	3.06	1.97
9 Max. efficiency	%	87	91	92	91	91	89	89	88	87
Characteristics										
10 Terminal resistance	Ω	0.115	0.299	1.13	1.68	2.44	6.46	10	15.7	24.4
11 Terminal inductance	mH	0.0245	0.0823	0.329	0.46	0.612	1.7	2.62	4.14	6.4
12 Torque constant	mNm/A	16.4	30.2	60.3	71.3	82.2	137	170	214	266
13 Speed constant	rpm/V	581	317	158	134	116	69.7	56.2	44.7	35.9
14 Speed / torque gradient	rpm/mNm	4.05	3.14	2.97	3.16	3.45	3.29	3.31	3.27	3.29
15 Mechanical time constant	ms	5.89	4.67	4.28	4.2	4.19	4.16	4.15	4.15	4.16
16 Rotor inertia	gcm ²	139	142	137	127	116	121	120	121	118

Specifications

- Thermal data**
- 17 Thermal resistance housing-ambient 4.7 KW
 - 18 Thermal resistance winding-housing 1.9 KW
 - 19 Thermal time constant winding 41.5 s
 - 20 Thermal time constant motor 736 s
 - 21 Ambient temperature -30...+100°C
 - 22 Max. permissible winding temperature +155°C

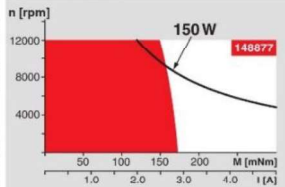
- Mechanical data (ball bearings)**
- 23 Max. permissible speed 12000 rpm
 - 24 Axial play 0.05 - 0.15 mm
 - 25 Radial play 0.025 mm
 - 26 Max. axial load (dynamic) 5.8 N
 - 27 Max. force for press fits (static) 110 N (static, shaft supported) 1200 N
 - 28 Max. radial loading, 5 mm from flange 28 N

- Other specifications**
- 29 Number of pole pairs 1
 - 30 Number of commutator segments 13
 - 31 Weight of motor 480 g

Values listed in the table are nominal. Explanation of the figures on page 49.

- Option**
- Preloaded ball bearings

Operating Range



Comments

- **Continuous operation**
In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.
= Thermal limit.
- **Short term operation**
The motor may be briefly overloaded (recurring).
- **Assigned power rating**

82 maxon DC motor

maxon Modular System

Planetary Gearhead
Ø42 mm
3 - 15 Nm
Page 245

Planetary Gearhead
Ø52 mm
4 - 30 Nm
Page 245

Encoder MR
256 - 1024 Imp.,
3 channels
Page 273

Encoder HEDL 5540
500 CPT,
3 channels
Page 276/278

Brake AB 28
24 VDC
0.4 Nm
Page 330

Industrial Version Encoder HEDL 9140
Page 281

Brake AB 28
Page 331

End cap
Page 335

Recommended Electronics:

- ESCON 50/5 Page 292
- EPOS2 24/5 313
- EPOS2 50/5 313
- EPOS2 70/10 313
- EPOS2 P 24/5 316
- EPOS3 70/10 EtherCAT 316
- ADS 50/10 373
- ADS_E 50/10 373

Notes 18

May 2012 edition / subject to change

Anexo IV. Especificaciones técnicas del motor Maxon 148877.
(Fuente: Catálogo Maxon DC Motor, 2012, p82)

ANEXO V

Tabla 8

Factores de cálculo para los rodamientos rígidos de bolas

$f_0 F_a/C_0$	Rodamientos de una hilera y de dos hileras Juego normal			Rodamientos de una hilera Juego C3			Juego C4		
	e	X	Y	e	X	Y	e	X	Y
0,172	0,19	0,56	2,3	0,29	0,46	1,88	0,38	0,44	1,47
0,345	0,22	0,56	1,99	0,32	0,46	1,71	0,4	0,44	1,4
0,689	0,26	0,56	1,71	0,36	0,46	1,52	0,43	0,44	1,3
1,03	0,28	0,56	1,55	0,38	0,46	1,41	0,46	0,44	1,23
1,38	0,3	0,56	1,45	0,4	0,46	1,34	0,47	0,44	1,19
2,07	0,34	0,56	1,31	0,44	0,46	1,23	0,5	0,44	1,12
3,45	0,38	0,56	1,15	0,49	0,46	1,1	0,55	0,44	1,02
5,17	0,42	0,56	1,04	0,54	0,46	1,01	0,56	0,44	1
6,89	0,44	0,56	1	0,54	0,46	1	0,56	0,44	1

Los factores de cálculo deben seleccionarse según el juego de funcionamiento en el rodamiento, que puede diferir del juego interno antes del montaje. Para obtener más información o conocer los factores de cálculo para otras clases de juegos, comuníquese con el Departamento de Ingeniería de Aplicaciones de SKF.
Los valores intermedios se pueden obtener por interpolación lineal.

Anexo V. Factores de cálculo para los rodamientos rígidos de bolas.
(Fuente: SKF Rodamientos, 2015, p315)

ANEXO VI

1 Rodamientos rígidos de bolas

Cargas		Rodamientos rígidos de una hilera de bolas	Rodamientos rígidos de bolas de acero inoxidable
Carga mínima Para obtener más información (→ página 86)	$F_{rm} = k_r \left(\frac{v n}{1000} \right)^{2/3} \left(\frac{d_m}{100} \right)^2$		
		El peso de los componentes soportados por el rodamiento, junto con las fuerzas externas, suele exceder la carga mínima requerida. Si no es el caso, el rodamiento debe someterse a una carga radial adicional. Para las aplicaciones en las que se utilizan rodamientos de una hilera o rodamientos rígidos de ...	
Capacidad de carga axial	Carga axial pura → $F_a \leq 0,5 C_0$ Rodamientos pequeños ¹⁾ y rodamientos de series livianas ²⁾ → $F_a \leq 0,25 C_0$	Carga axial pura → $F_a \leq 0,25 C_0$	
Una carga axial excesiva puede reducir considerablemente la vida útil del rodamiento.			
Carga dinámica equivalente del rodamiento Para obtener más información (→ página 85)	$\begin{aligned} F_a/F_r \leq e &\rightarrow P = F_r \\ F_a/F_r > e &\rightarrow P = X F_r + Y F_a \end{aligned}$		
Carga estática equivalente del rodamiento Para obtener más información (→ página 88)	$\begin{aligned} P_0 &= 0,6 F_r + 0,5 F_a \\ P_0 < F_r &\rightarrow P_0 = F_r \end{aligned}$		

Anexo VI. sección cargas para la selección de rodamientos.
(Fuente: SKF Rodamientos, 2015, p315)