



UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECATRÓNICA

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA RODILLA ENFOCADO A PERSONASDEDICADAS A LA CARGA DE PESO ENTRE 25 Y 100 KG

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero en Mecatrónica

**AUTORES: BRYAN ENRIQUE SIMBAÑA PILLAJO
SMILY MATEO CRUZ MONTENEGRO**

TUTOR: FABIO EDUARDO OBANDO HERRERA

Quito-Ecuador

2023

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, **Smily Mateo Cruz Montenegro** con documento de identificación N° 1722689237 y **Bryan Enrique Simbaña Pillajo** con documento de identificación N° 1726690801; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 22 de Septiembre del año 2023

Atentamente,



Smily Mateo Cruz Montenegro

1722689237



Bryan Enrique Simbaña Pillajo

1726690801

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, **Smily Mateo Cruz Montenegro** con documento de identificación N° 1722689237 y **Bryan Enrique Simbaña Pillajo** con documento de identificación N° 1726690801, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Dispositivo tecnológico: “Diseño y construcción de un exoesqueleto para rodilla enfocado a personas dedicadas a la carga entre 25 y 100Kg.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de Septiembre del año 2023

Atentamente,



Smily Mateo Cruz Montenegro

1722689237



Bryan Enrique Simbaña Pillajo

1726690801

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fabio Eduardo Obando Herrera MSc con documento de identificación N°1707982169 , docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXOESQUELETO PARA RODILLA ENFOCADO A PERSONAS DEDICADAS A LA CARGA DE PESO ENTRE 25 Y 100 KG**, realizado por **Smily Mateo Cruz Montenegro** con documento de identificación N° 1722689237 y **Bryan Enrique Simbaña Pillajo** con documento de identificación N° 1726690801, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Dispositivo tecnológico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 22 de Septiembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Fabio Eduardo Obando Herrera MSc.
1707982169

Agradecimiento

Agradezco a mis padres Silvia y Pedro, a mi hermano Ronald por siempre brindarme su apoyo y por haber estado conmigo durante este largo proceso apoyándome siempre, ya que es gracias a su ejemplo eh llegado hasta donde me encuentro.

Agradezco a mis abuelos Ramón y Mariana por estar pendientes de mí y saber guiarme.

Agradezco los docentes que supieron impartirme sus conocimientos de la mejor manera posible, a mis amigos por siempre estar en los momentos que más se los necesita.

Smily Mateo Cruz Montenegro

A todos a quienes me apoyaron en este camino que me condujo a conseguir el título de ingeniería. Entre estas personas tan importante están los miembros de mi familia mis padres Enrique y Bernarda quienes con su ejemplo de trabajo y perseverancia han hecho que pueda superar cada una de las dificultades que se me han presentado a lo largo de esta etapa a mi hermana mi sobrina y su esposo por su apoyo incondicional.

A mi tutor el Ing. Fabio Obando, amigos y profesores quienes siempre colaboraron en mi formación y a quienes siempre estaré muy agradecido.

Bryan Enrique Simbaña Pillajo

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis padres y hermano quienes han sido siempre un pilar fundamental en mi vida y me han guiado y brindado todo el apoyo durante este camino, este logro lo comparto con todas aquellas personas que estimo y han estado siempre conmigo.

Smily Mateo Cruz Montenegro

Este trabajo se lo dedico a mi madre Bernarda a mi padre Enrique a mi hermana Yessenia a mi sobrina Valentina y a mi cuñado Franklin y a mis abuelos Petrona y Juan.

Bryan Enrique Simbaña Pillaño

Contenido

Resumen	9
ABSTRACT	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
Problema de estudio.....	11
JUSTIFICACIÓN.....	12
GRUPO OBJETIVO.....	13
OBJETIVOS.....	13
Objetivo general	13
Objetivos específicos	13
CAPÍTULO 1	14
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	14
1.1. Cargadores	14
1.2 Exoesqueleto	14
1.3 Exoesqueleto para aumento de fuerza	15
1.4 Exoesqueleto de Rodilla.....	16
1.5 Antropometría.....	17
1.6 Medidas antropométricas relevantes de las extremidades inferiores	18
1.7 Pesos Segmentarios.....	19
1.8 Biomecánica	20
1.9 Biomecánica de la rodilla.....	21
1.10 Arduino.....	22
1.11 Actuador eléctrico lineal	22
1.12 Giroscopio.....	23
Capítulo 2	24
2.2.1 Cinta Kinesiológica.....	24
2.1.2 Rodillera	25
2.1.3 Exoesqueleto de rodilla con actuador eléctrico.....	26
2.2.1 Selección de alternativa con mejor puntaje.....	28
2.3 Análisis de alternativas de materiales.....	28
2.3.1 Aleaciones de Titanio	28
Ventajas	29
Desventajas.....	29
2.3.1 Fibra de Carbono.....	30

Ventajas	30
Desventajas.....	31
2.1.2 Aleaciones de aluminio.....	31
Desventajas.....	32
2.1.3 Acero de alta resistencia.....	32
Ventajas	33
Desventajas.....	33
3.1.3 Selección de alternativa con mejor puntaje	34
Capítulo 3: Diseño y Simulación	35
3.1.1 Eslabón Fémur	37
3.3 Material.....	42
3.3.1 Resistencia Mecánica	42
3.3.2 Buena maquinabilidad.....	42
3.3.3 Aplicaciones Típicas	42
3.4 Selección de Actuadores	43
3.4.1 Definición de los componentes.....	44
3.5 Simulación eslabones.....	45
Capítulo 4: Implementación.....	51
4.1 Manufactura y Ensamble	51
4.1.2 Proceso de construcción del exoesqueleto.....	51
4.2 Pruebas Realizadas.....	53
4.3 Análisis económico.....	64
MATERIALES COMERCIALES FERRETEROS.....	64
COSTO DE MECANIZADO Y RECUBRIMIENTO	66
OTROS COSTOS.....	66
Conclusiones y Recomendaciones	68

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Exoesqueleto	15
Figura 2 Final BLEEX design.....	16
Figura 3 Exoesqueleto de rodilla.....	17
Figura 4 Mediciones antropométricas de extremidad inferior	19
Figura 5 Pesos segmentarios	20
Figura 6 Arduino UNO.....	22
Figura 7 Actuador eléctrico lineal.....	23
Figura 8 Giroscopio	23
Figura 9 Cinta Kinesiológica	24
Figura 10 Rodillera	25
Figura 11 Referencia de Exoesqueleto con actuador eléctrico	26
Figura 12 Aleación de titanio.....	28
Figura 13 Fibra de Carbono	30
Figura 14 Aleación de aluminio.....	31
Figura 15 Acero de alta resistencia	32
Figura 16 Diagrama de cargas de eslabón correspondiente al fémur simulado con viga empotrada.....	37
Figura 17 Diagrama de fuerzas cortantes correspondientes al eslabón del fémur.....	38
Figura 18 Diagrama de momento correspondiente al eslabón del fémur	38
Figura 19 Diagrama de cuerpo libre.....	40
Figura 20 Triángulo rectángulo.....	41
Figura 21 Carga de rotura, limite elástico, alargamiento y dureza de las aleaciones de aluminio.....	43
Figura 22 Elaboración en SolidWorks Eslabón 1 Fémur.....	44
Figura 23 Diseño en SolidWorks Eslabón 2 Tibia	45
Figura 24 Simulación Desplazamiento eslabón 1 fémur	46
Figura 25 Simulación Factor de Seguridad Eslabón 1	46
Figura 26 Simulación Desplazamiento Eslabón 2 Tibia.....	47
Figura 27 Simulación Factor de Seguridad Eslabón 2 Tibia.....	47
Figura 28 Diagrama de conexión y funcionamiento del sensor	48
Figura 29 Diagrama de flujo de funcionamiento	50
Figura 30 Prueba de levantamiento sin apoyo de eslabones del exoesqueleto.....	53
Figura 31 Prueba con el montaje de los eslabones	54
Figura 32 Pruebas de movimiento y flexibilidad sin exoesqueleto.....	55

Figura 33 Prueba de movimiento y flexibilidad con exoesqueleto.....	55
Figura 34 Levantamiento totalmente horizontal del usuario sin exoesqueleto	56
Figura 35 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 113	57
Figura 36 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 111	57
Figura 37 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 54.....	58
Figura 38 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 100	58
Figura 39 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 180	59
Figura 40 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 161	59
Figura 41 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 166	60
Figura 42 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 85	60
Figura 43 Prueba de equilibrio en sentadilla al levantarse sin exoesqueleto	61
Figura 44 Prueba de equilibrio en sentadilla al levantarse con exoesqueleto	62
Figura 45 Prueba de equilibrio y estabilidad.....	62
Figura 46 Prueba de Funcionamiento del actuador	63
Figura 47 Actuador lineal ensamblado a eslabones	63

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parametros de calificación	27
Tabla 2 Calificación selección de actuador	28
Tabla 3 Selección de material	34
Tabla 4 Pesos Segmentarios.....	36
Tabla 5 Parametros de diseño	42
Tabla 6 Características técnicas selección de cables	48
Tabla 7 Sensor y Actuador por implementar	49
Tabla 8 Secuencia de construcción del exoesqueleto	51
Tabla 9 Análisis económico de materiales comerciales ferreteros.....	64
Tabla 10 Materiales Normalizados	65
Tabla 11 Materiales Sistema eléctrico.....	65
Tabla 12 Costos de mecanizado y recubrimiento de piezas.....	66
Tabla 13 Otros costes.....	66
Tabla 14 Costo total.....	67

Resumen

El presente desarrollo de un dispositivo tecnológico titulado ‘Diseño y Construcción de un exoesqueleto para rodilla enfocado a personas dedicadas a la carga de peso entre 25 y 100 KG’, está destinado al campo técnico, social y cultural. Es un sistema conformado por un exoesqueleto activo para las extremidades inferiores con dos grados de libertad. El cual ayuda al usuario a mantener la posición y tiene la capacidad de reducir el esfuerzo y la actividad muscular del usuario de las piernas al momento de realizar la sentadilla para la carga. Para el diseño del exoesqueleto se tomó en cuenta la normativa del instituto ecuatoriano de normalización NTE INEN-ISO 7250-1, como también el reglamento de seguridad y salud de los trabajadores y mejoramiento del medio ambiente de trabajo.

Palabras claves: Exoesqueleto, Actuador.

ABSTRACT

The present development of a technological device entitled 'Design and Construction of a knee exoskeleton focused on people dedicated to carrying weight between 25 and 100 KG', is intended for the technical, social and cultural field. It is a system made up of an active exoskeleton for the lower extremities with two degrees of freedom. Which helps the user maintain the position and has the ability to reduce the effort and muscle activity of the leg user when performing the squat for the load. For the design of the exoskeleton, the regulations of the Ecuadorian Institute for Standardization NTE INEN-ISO 7250-1 were taken into account, as well as the regulations on safety and health of workers and improvement of the work environment.

Keywords: Exoskeleton, Actuator.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Problema de estudio

Las personas dedicadas a la actividad de transportar peso en su espalda más coloquialmente conocidos como cargadores, con el tiempo sufren de graves enfermedades asociadas a la columna y rodillas, esto debido a los esfuerzos a los que dichas partes se ven sometidas diariamente por su actividad laboral.

El exoesqueleto que se plantea desarrollar tiene como objetivo ayudar a dichas personas, ya que mediante el diseño que se propone realizar, la estructura del exoesqueleto le permitirá ejercer menos esfuerzo de parte del usuario y de igual manera podría ayudarlo a cargar un poco más de peso, de esta manera el usuario sería capaz de evitar enfermedades relacionadas a las rodillas y la espalda que puede desarrollar por el esfuerzo que realizan estas partes del cuerpo debido al trabajo del usuario.

JUSTIFICACIÓN

Teniendo en cuenta los problemas de salud que presenta el usuario debido a la carga que ejerce sobre su cuerpo, lo que se busca es realizar un exoesqueleto, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de dichas personas sometiendo a esfuerzos el mecanismo realizado mas no la integridad de la persona que se dedica a esta actividad.

Para evitar las lesiones del usuario, se plantea desarrollar un exoesqueleto de dos grados de libertad que asistirá a la rodilla y el tobillo de la pierna derecha (o izquierda), el objetivo principal es proporcionar una amplificación de fuerza y mejora de movilidad del usuario, tal que le permita realizar algunos ejercicios como flexionar la pierna. De esta manera se reduciría el esfuerzo producido por esta parte del cuerpo.

GRUPO OBJETIVO

Las personas que se dedican a laborar en trabajos que requieren cargas de materiales pesados como la construcción, o transportar materiales pesados de un lugar a otro sin ayuda de ningún tipo de máquina.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un exoesqueleto para rodilla enfocado a personas dedicadas a la carga de peso entre 25 y 100 kg.

Objetivos específicos

- Analizar la anatomía de la pierna mediante un estudio biomecánico para el desarrollo funcional del exoesqueleto.
- Diseñar los elementos mecatrónicos que se emplearán en la construcción del exoesqueleto mediante la ayuda de un software CAD.
- Realizar las pruebas de funcionamiento para determinar su eficacia en la mejora de la movilidad de la rodilla.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

En este capítulo se realizará un estudio en cuanto a las normativas y desarrollo de exoesqueletos enfocados en la rodilla, así como también se estudiará a breves rasgos la anatomía y biomecánica de la rodilla igualmente, las dimensiones corporales para la elaboración y edificación del exoesqueleto de rodilla.

En el ámbito de la ingeniería biomecánica, los dispositivos exoesqueleto han adquirido considerable importancia gracias a su capacidad para elevar la calidad de vida de los individuos.

1.1. Cargadores

Existen muchas personas conocidas coloquialmente como cargadores que se dedican a cargar grandes cantidades de peso y trasladarlas hacia otro lugar siendo esta la manera en que se ganan la vida.

Con el pasar del tiempo la gran mayoría de estas personas llegan a sufrir lesiones y su salud se ve afectada debido a la actividad que realizan, llegando a tener daños graves a nivel tanto de la columna como la rodilla que por lo general son daños irreversibles.

1.2 Exoesqueleto

El exoesqueleto es un dispositivo mecánico externo diseñado para proporcionar soporte, fuerza, estabilidad, para mejorar la capacidad funcional de la parte del cuerpo al que está diseñado el exoesqueleto o para ampliar las capacidades humanas en diferentes tareas físicas realizadas.

Este tipo de dispositivos están inspirados en la estructura y funcionamiento de un esqueleto humano, donde para su diseño se aplican principios biomecánicos para aumentar la fuerza, mejorar la movilidad o generalmente donde más se usa este dispositivo es para rehabilitación. (1)

En términos generales, la mayoría de exoesqueletos se crean para las extremidades inferiores, ya que estas son considerable más propensas a padecer daños y es en ese lugar donde se enfoca la mayor proporción de la carga del cuerpo humano. (6)



Figura 1 Exoesqueleto

Fuente: <https://quo.eldiario.es/tecnologia/g43742/exoesqueleto-hal/>

1.3 Exoesqueleto para aumento de fuerza

Un exoesqueleto enfocado en el aumento de fuerza es un dispositivo electromecánico que se utiliza para mejorar la fuerza y resistencia física de un usuario. Está diseñado para usarse externamente al cuerpo y da soporte y asistencia a los movimientos del usuario, potenciando su capacidad de carga y resistencia.

Está compuesto por una estructura mecánica resistente pero ligera, que se ajusta alrededor del cuerpo del usuario.

La principal función del exoesqueleto es proporcionar una mayor fuerza y resistencia al usuario. Cuando el usuario realiza un movimiento, como levantar un objeto pesado, los sensores detectan este movimiento y envían la señal al sistema de control. El sistema de control procesa la información y activa los actuadores y motores correspondientes para asistir al usuario en su movimiento, reduciendo la carga física y aumentando la fuerza aplicada. [7]

Los exoesqueletos enfocados en el aumento de fuerza tienen aplicaciones en diversos campos, como la industria, la medicina y el ámbito militar.

Los dispositivos externos creados con fines militares han brindado información de gran valor sobre el equipamiento y fabricación de estos. Dado que estas estructuras buscan aumentar las capacidades y habilidades del cuerpo humano, su diseño y construcción tiene muchas veces un alto grado de complejidad, por lo cual aportan un valioso conocimiento en el área; dicho conocimiento se puede usar, también, en estructuras con propósitos médicos [6]. Actualmente, uno de los avances mas significativos es el presentado por el ingeniero de maquinaria Homayoon Kazerooni, perteniente a la Universidad de California: el “Berkeley lower Extremity Exoskeleton (BLEEX)”. [7]



Figura 2 Final BLEEX design

Fuente: <https://bleex.me.berkeley.edu/wp-content/uploads/hel-media/Publication/On%20the%20Mechanical%20Design%20of%20the%20Berkeley%20Lower%20Extr emity%20Exoskeleton%20-%20IROS05.pdf>

1.4 Exoesqueleto de Rodilla

Un exoesqueleto de rodilla es un dispositivo mecánico diseñado para proporcionar soporte, asistencia y mejora de la movilidad a la articulación de la rodilla.

Consta de una estructura mecánica externa que rodea la rodilla y se conecta a las piernas del usuario. Esta estructura puede estar hecha de materiales livianos y resistentes, como aluminio, fibra de carbono o polímeros reforzados. [5]

El exoesqueleto de rodilla incluye actuadores que pueden ser hidráulicos, neumáticos o eléctricos. Estos actuadores generan fuerzas y movimientos controlados para proporcionar asistencia en la flexión y extensión de la rodilla. [5]

Los exoesqueletos de rodilla pueden tener aplicaciones en rehabilitación neuromuscular, en personas con lesiones de rodilla, enfermedades neuromusculares o como apoyo para actividades físicas que requieren un mayor esfuerzo en la articulación de la rodilla. [5]



Figura 3 Exoesqueleto de rodilla

Fuente: <https://www.pinterest.com/erosgenuino1974/exoesqueletos/>

1.5 Antropometría

Según las necesidades ergonómicas del diseño del es fundamental tener medidas antropométricas de las extremidades inferiores del usuario.

La antropometría constituye una ciencia que se centra en la investigación de las proporciones y magnitudes del organismo humano. Se utiliza para obtener datos precisos y sistemáticos sobre las características físicas y dimensiones del cuerpo, como la altura, el peso, la circunferencia de diferentes segmentos corporales, la longitud de los miembros y otras medidas antropométricas relevantes. [8]

La antropometría se emplea en diferentes áreas, como la ergonomía, el diseño industrial, la arquitectura, la antropología y la biomecánica. Los datos antropométricos se obtienen a través de técnicas de medición precisa, como la utilización de cintas métricas, calibradores y escáneres tridimensionales, y se analizan estadísticamente para obtener promedios, desviaciones estándar y percentiles que representen las características de una población determinada. [8]

El estudio antropométrico es fundamental para garantizar la seguridad, la comodidad y la eficiencia en el diseño de productos y entornos. En el diseño de asientos de automóviles, muebles, equipos de protección personal, interfaces de usuario y herramientas, hay que considerar las variaciones en las dimensiones corporales para adaptarlos a muchos usuarios y minimizar el riesgo de lesiones, incomodidad o fatiga. [8]

1.6 Medidas antropométricas relevantes de las extremidades inferiores

a) Circunferencia de la Rodilla

La circunferencia de la rodilla es importante para determinar el tamaño y la forma de la estructura del exoesqueleto alrededor de la articulación de la rodilla.

b) Longitud del muslo y pierna

Estas medidas son cruciales para determinar la longitud y el alcance del exoesqueleto en relación con la anatomía de la pierna del usuario.

c) Anchura de la rodilla

La anchura de la rodilla es esencial para diseñar la estructura del exoesqueleto de manera que proporcione un ajuste seguro y cómodo alrededor de la articulación de la rodilla.

d) Altura de la rodilla

Esta medida es importante para determinar la longitud y la ubicación adecuadas de los componentes del exoesqueleto en relación con la altura de la rodilla del usuario.

e) Ángulos de flexión

Los ángulos de flexión de la rodilla durante diferentes movimientos son relevantes para garantizar la libertad de movimiento adecuada del exoesqueleto y su capacidad para proporcionar asistencia cuando sea necesario.

f) Peso corporal y carga de trabajo esperada

Conocer el peso corporal del usuario y la carga de trabajo esperada es fundamental para diseñar un exoesqueleto de aumento de fuerza adecuado. Esto permitirá determinar la cantidad de fuerza adicional requerida y cómo se distribuirá a través del exoesqueleto.

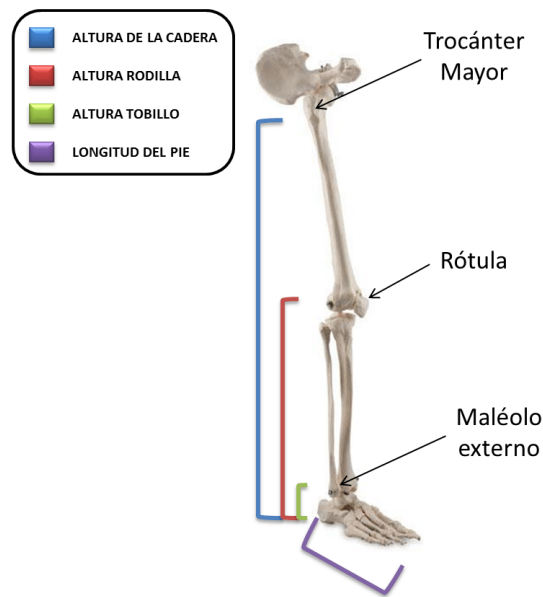


Figura 4 Mediciones antropométricas de extremidad inferior

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-24-Mediciones-antropometricas-de-una-extremidad-inferior_fig6_329389892

1.7 Pesos Segmentarios

Los pesos segmentarios son los valores de peso asignados a diferentes segmentos del cuerpo humano, como la cabeza, el tronco, los brazos y las piernas. Estos valores representan la proporción del peso corporal total que se atribuye a cada segmento. [9]

Los pesos segmentarios son utilizados en diversos campos, como la biomecánica, la ergonomía y el diseño de equipos y productos. Estos valores son importantes para comprender la distribución del peso y las cargas

que actúan sobre diferentes partes del cuerpo durante actividades específicas, lo que puede influir en la ergonomía, la postura, el equilibrio y la prevención de lesiones. [9]

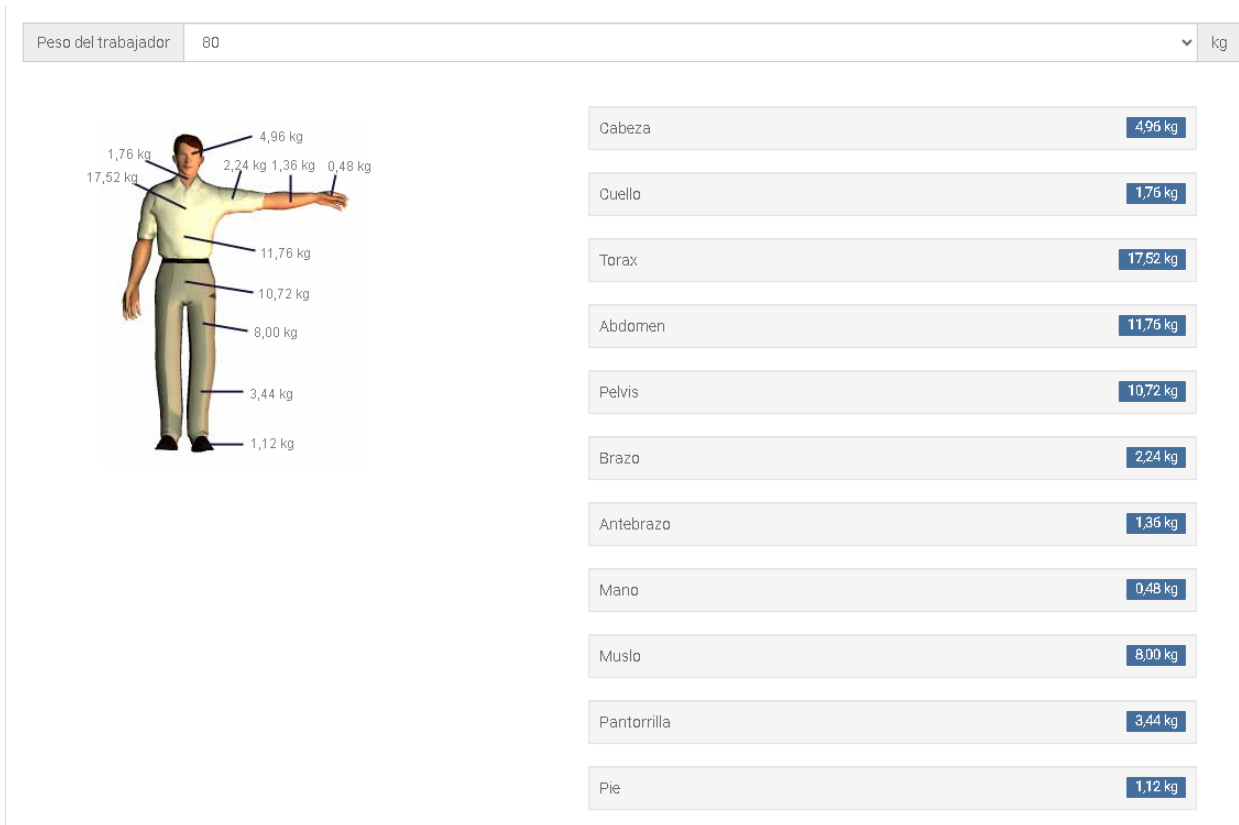


Figura 5 Pesos segmentarios

Fuente: <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/psc/psc.php>

1.8 Biomecánica

La biomecánica es una disciplina que combina los principios de la biología y la mecánica para estudiar el movimiento humano y las fuerzas que actúan sobre el cuerpo. Se centra en el análisis de cómo los sistemas biológicos, como los músculos, los huesos, las articulaciones y los tejidos blandos, interactúan entre sí y con su entorno durante el movimiento. [10]

La biomecánica se utiliza en diversas áreas, como la medicina deportiva, la fisioterapia, la ergonomía y el diseño de dispositivos y prótesis médicas. A través de la biomecánica, es posible comprender mejor los

mecanismos del movimiento humano, evaluar el rendimiento físico, prevenir lesiones y mejorar el diseño de productos y técnicas relacionados con la salud y el rendimiento deportivo. [10]

La biomecánica se apoya en una amplia variedad de herramientas y técnicas, como análisis de la cinemática y cinética del movimiento, análisis de fuerzas y momentos, electromiografía (EMG), modelos computacionales y simulaciones. Estas herramientas permiten medir y analizar el movimiento humano en diferentes contextos, desde actividades cotidianas hasta actividades deportivas de alto rendimiento. [10]

1.9 Biomecánica de la rodilla

- Cinemática de la rodilla: Se refiere al estudio del movimiento de la articulación de la rodilla en términos de desplazamiento, velocidad y aceleración. Esto implica analizar los diferentes planos de movimiento, como la flexión y extensión, la rotación y el desplazamiento lateral. [12]
- Cinética de la rodilla: Se refiere al estudio de las fuerzas y momentos que actúan sobre la articulación de la rodilla durante el movimiento y la carga. Esto implica analizar las fuerzas de compresión, las fuerzas de cizallamiento y los momentos de flexión y extensión que se generan en la rodilla. [12]
- Distribución de fuerzas articulares: Se refiere al estudio de cómo se distribuyen las fuerzas a través de las superficies articulares de la rodilla. Esto tiene implicaciones en la carga y el desgaste de los tejidos articulares, y puede ayudar a comprender el desarrollo de lesiones o enfermedades articulares. [12]
- Estabilidad de la rodilla: Se refiere al estudio de los mecanismos de estabilización de la articulación de la rodilla, incluyendo los ligamentos, los músculos y otros tejidos blandos. Esto implica comprender cómo estos componentes contribuyen a mantener la estabilidad y prevenir lesiones en la rodilla. [11]

1.10 Arduino

Arduino es una plataforma de hardware de código abierto diseñada para facilitar la creación de prototipos y proyectos electrónicos interactivos. Consiste en una placa de desarrollo que incluye un microcontrolador programable y una serie de pines de entrada/salida que permiten la conexión de sensores, actuadores y otros componentes electrónicos. [14]

La versatilidad de Arduino ha permitido su aplicación en una amplia gama de proyectos, como sistemas de automatización del hogar, robótica, monitoreo ambiental, control de dispositivos, arte interactivo y muchos otros campos creativos y tecnológicos. [14]



Figura 6 Arduino UNO

Fuente: <https://www.infootec.net/arduino/>

1.11 Actuador eléctrico lineal

Un actuador eléctrico lineal es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en movimiento lineal. [15]

Se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la industria automatizada hasta la robótica, la maquinaria y los sistemas de control. [16]

Los actuadores eléctricos lineales pueden ser accionados por diferentes tipos de motores, como motores de corriente continua (DC), motores paso a paso o motores brushless. Cada tipo de motor tiene sus propias

características de rendimiento, velocidad y control, lo que los hace adecuados para diferentes aplicaciones.

[17]



Figura 7 Actuador eléctrico lineal

Fuente: <https://roboticsec.com/producto/actuador-lineal-electrico-12vdc-carrera-500mm-carga-6000n/>

1.12 Giroscopio

Un giroscopio electrónico, también conocido como giroscopio MEMS (Microelectromechanical System), es un dispositivo sensor utilizado para medir la orientación y el movimiento angular en sistemas electrónicos. A diferencia de los giroscopios mecánicos tradicionales, que se basan en principios físicos como la conservación del momento angular, los giroscopios electrónicos utilizan tecnología microelectrónica para lograr la detección y la medición. [18]

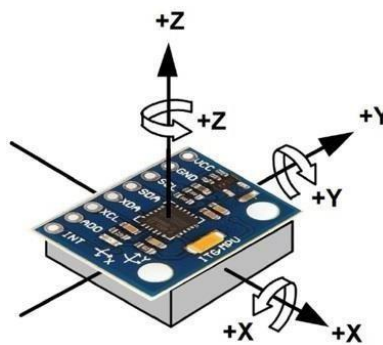


Figura 8 Giroscopio

CAPÍTULO 2

2.1 Análisis de alternativas

En esta sección se lleva a cabo de la exploración de las opciones y los distintos módulos de diseño, se detallan los elementos a incorporar en el sistema de control eléctrico.

2.1.1 Cinta Kinesiológica

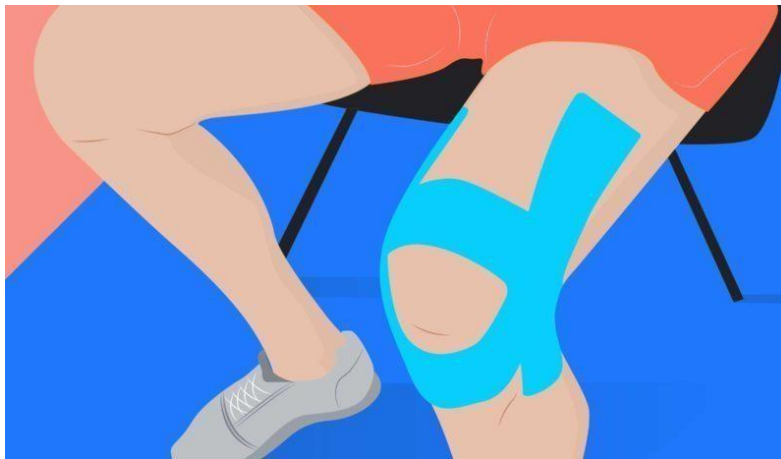


Figura 9 Cinta Kinesiológica

Fuente: <https://creakyjoints.org.es/viviendo-con-artritis/cinta-de-kinesiologia/>

Ventajas: Como ventaja principal de la cinta kinesiológica está su coste relativamente bajo en comparación a las demás alternativas revisadas, además de que este proporciona un buen soporte y estabilidad a las articulaciones y músculos sin restringir demasiado el movimiento, ayuda con la estimulación sensorial ya que esta ejerce una ligera presión sobre la piel lo que ayuda a mejora la conciencia sensorial y propiocepción (capacidad del cuerpo de percibir su percepción en el espacio), lo que ayuda a corregir patrones de movimiento deficientes y ayuda a mejorar la coordinación.

Desventajas: Como desventajas se puede decir que es la falta de evidencia científica sólida ya que en si hay investigaciones que respalda su uso en ciertas condiciones, se necesita más investigación para poder corroborar su efectividad, ya que de igual manera esta cinta necesita un usos adecuado para así poder llegar

a sus máximos beneficios con esto se quiere decir que se necesita una persona experta en el tema para su aplicación, además que su uso es limitado y se debe reemplazar cada cierto tiempo determinado.

2.1.2 Rodillera



Figura 10 Rodillera

Fuente: <https://megastore.com.ec/shop/estabilizador-lateral-de-rodilla-deportiva-varitek/>

Ventajas: Este complemento permite tener mayor estabilidad y soporte ya que gracias a sus barras laterales que imitan la rodilla este da un mayor grado de ayuda a la rodilla ya que ayudan a limitar el movimiento de lateral y rotacional excesivo de la rodilla, de igual manera permiten ayuda a la compresión y calentamiento ya que esto ayuda a la reducción de la hinchazón, mejorar la circulación sanguínea y mantener una adecuada temperatura que esto ayuda a la recuperación y alivio del dolor.

Desventajas: De igual manera las desventajas que presenta este tipo de complementos es una dependencia y severa debilidad muscular ya que un uso prolongado llevara a una dependencia excesiva de los músculos de este tipo de ortesis, este limita en el movimiento ya que las barras laterales pueden en muchos caso llegar a limitar el rango de movimiento natural de la rodilla, y esto es una problemática muy grande ya que limita muchísimo al momento de realizar actividades, ya que nos restringe la libertad de movimiento o los grados de libertad.

2.1.3 Exoesqueleto de rodilla con actuador eléctrico

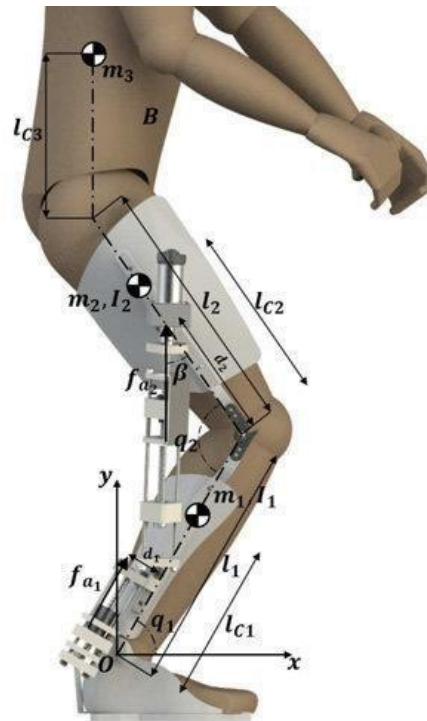


Figura 11 Referencia de Exoesqueleto con actuador eléctrico

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Representacion-del-plano-sagital-del-exoesqueleto-de-dos-grados-de-libertad_fig2_263545602

Ventajas: Su configuración es sencilla en contrastación con los actuadores hidráulicos y neumáticos, debido a que únicamente requiere energía eléctrica para operar. Utiliza cables para transmitir la señal de control y electricidad. Además, son altamente versátiles y eliminan las restricciones espaciales entre la pérdida de energía y el actuador. También destacan por una señal de transmisión más rápida y un mayor nivel de precisión en el control, entre otras numerosas ventajas.

Desventajas: Entre sus desventajas podemos encontrar una posibilidad de sobrecalentamiento del motor o desgaste del engranaje de reducción.

2.2 Análisis Cuantitativo Alternativa 1

Criterios de evaluación para el análisis:

1. Precio
2. Funcionalidad
3. Disponibilidad de los materiales en el mercado
4. Sencillez de instalación
5. Protección
6. Comodidad
7. Energía empleada

Metodología de calificación

Evaluación básica, 0 a 10 puntos, se elegirá la opción con la puntuación más alta.

Cada criterio de evaluación tiene su peso, que se sumara al final para lograr el 100% de la calificación.

Indicaciones sobre las categorías de puntuación:

Tabla 1 Parametros de calificación

Parámetros:	0 a 3	4 a 7	8 a 10
Precio	Alto	Medio	Bajo
Funcionalidad	Difícil	Media	Fácil
Disponibilidad	Raro	Común	Variedad
Sencillez de instalación	Complicado	Medio	Sencillo
Protección	Baja	Media	Alta
Comodidad	Baja	Media	Alta
Energía empleada	>1.5 kV	>1.5kV y < 1.5 KV	>0.75kV y < 1KV

Evaluación de opciones

Tabla 2 Calificación selección de actuador

Peso:	0.2	0.1	0.2	0.1	0.15	0.15	0.1	1
Calificación:	Precio	Funcionalidad	Disponibilidad	Sencillez	Protección	Comodidad	Energía	Total
Alternativa1	6	8	6	5	6	4	8	6
Alternativa2	3	8	6	5	6	4	8	5.4
Alternativa3	8	8	8	9	8	7	5	7.65

2.2.1 Selección de alternativa con mejor puntaje

La ALTERNATIVA 3 se destaca como la mejor opción según los parámetros establecidos, obteniendo una calificación de 7.65. Esta alternativa demuestra un nivel de seguridad similar o incluso superior a las demás, además de tener en cuenta un factor fundamental como el costo y recibir una calificación aceptable en el montaje.

2.3 Análisis de alternativas de materiales

En este apartado se llevará a cabo el análisis y selección del material para la construcción del exoesqueleto, empleando tanto parámetros cuantitativos como cualitativos previamente establecidos.

2.3.1 Aleaciones de Titanio



Figura 12 Aleación de titanio

Fuente: <https://acnis-titanium.com/es/produit/ti-3al-8v-6cr-4zr-4mo-grade19-ti-beta-c/>

Ventajas:

- Gran resistencia y escasa masa: El titanio exhibe una de las relaciones más elevadas entre resistencia y peso dentro de los metales, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren resistencia estructural y bajo peso. Se utiliza en varias industrias como la aeroespacial, automotriz y deportiva debido a esta propiedad. [19]
- Alta resistencia a la corrosión: El titanio forma una capa protectora de óxido en su superficie, lo que le da una excelente resistencia a la corrosión en unos entornos, incluyendo ambientes ácidos y salinos. Esto hace que sea útil en aplicaciones marinas y químicas. [20]
- Compatibilidad biológica: El titanio es biocompatible y no tóxico, lo que lo convierte en un material ideal para implantes médicos y odontológicos. La aleación de titanio se usa en prótesis de cadera, placas óseas y dispositivos dentales por su capacidad de integración con los tejidos biológicos. [21]

Desventajas:

- Costo muy elevado: La producción de aleaciones de titanio es un proceso complejo que requiere altas temperaturas y técnicas especializadas, lo que hace que el costo de fabricación sea elevado en comparación con otros metales. Esto limita su uso en algunas aplicaciones donde el factor económico es importante. [22]
- Difícil de trabajar: El titanio es un metal muy duro y tiene una baja conductividad térmica, lo que hace que sea difícil de mecanizar. Requiere de herramientas y técnicas de mecanizado especializadas, lo que puede aumentar los costos de producción y el tiempo requerido para fabricar componentes. [23]
- Fragilidad a altas temperaturas: A temperaturas superiores a los 400 grados Celsius, algunas aleaciones de titanio pueden volverse frágiles y experimentar una disminución en su resistencia. Esto limita su uso en aplicaciones donde se requiere resistencia a altas temperaturas, como en motores de aviones. [24]

2.3.2 Fibra de Carbono



Figura 13 Fibra de Carbono

Fuente: <https://www.brujulabike.com/fibra-de-carbono/>

Ventajas:

- **Alta resistencia y rigidez:** La fibra de carbono es conocida por su excepcional resistencia y rigidez. Tiene una resistencia específica mayor que la del acero y una rigidez específica mayor que la del aluminio. Esto la hace ideal para aplicaciones donde se requiere una alta relación de resistencia-peso. [25]
- **Baja densidad:** La fibra de carbono tiene una densidad muy baja en comparación con otros materiales estructurales, lo que la convierte en una opción atractiva para reducir el peso de componente y estructuras. Esta propiedad es especialmente beneficiosa en la industria aeroespacial y automotriz, ya que puede contribuir a una mayor eficiencia energética y un mejor rendimiento. [26]
- **Resistencia a la corrosión:** A diferencia de los metales, la fibra de carbono no se oxida ni se corroe. Esto la hace adecuada para entornos agresivos donde otros materiales podrían deteriorarse con el tiempo. [27]

Desventajas:

- **Alto costo:** La producción de la fibra de carbono implica un proceso complejo que requiere altas temperaturas y materiales especializados. Como resultado, los costos de fabricación son significativamente más altos en comparación a otros materiales. Esto ha limitado su adopción en aplicaciones de uso general y lo ha relegado principalmente a sectores de alta gama. [28]
- **Frágil ante impactos:** A pesar de su alta resistencia, la fibra de carbono puede ser sensible a impactos fuertes o golpes bruscos. A diferencia de los metales, que pueden deformarse plásticamente bajo cargas de impactos, la fibra de carbono tiende a romperse o astillarse cuando se somete a fuerzas súbitas. Esto puede afectar su durabilidad en ciertas aplicaciones. [29]

2.3.3 Aleaciones de aluminio



Figura 14 Aleación de aluminio

Ventajas:

- **Ligereza:** El aluminio es un metal ligero, lo que hace que las aleaciones de aluminio sean más livianas en comparación con otros metales [30]. Esto nos ayuda a que esta aleación sea ideal para aplicaciones donde el peso es un factor importante. [31]
- **Resistente a la corrosión:** El aluminio tiene una alta resistencia a la corrosión debido a la formación de una capa delgada y protectora de óxido en la superficie [32]. Esta capa proporciona una

protección contra la corrosión en una amplia variedad de entornos, lo que hace que las aleaciones de aluminio sean duraderas y adecuadas para aplicaciones en exteriores. [33]

- Buena conductividad térmica y eléctrica: El aluminio tiene una excelente conductividad térmica y eléctrica. Las aleaciones de aluminio se utilizan en aplicaciones que requieren una transferencia eficiente de calor o electricidad, como en radiadores, cables eléctricos y componentes electrónicos. [34]

Desventajas:

- Baja resistencia a la fatiga: Aunque las aleaciones de aluminio son relativamente fuertes, su resistencia es menor en comparación a otros metales, como el acero. Esto puede limitar en gran medida su uso en aplicaciones que requieren una alta resistencia mecánica. [35]
- Costo: El Aluminio es más costoso de producir en comparación a otros metales, las aleaciones de aluminio pueden tener un costo inicial más alto, lo que puede influir en su viabilidad económica en ciertos proyectos. [36]
- Dificultad para soldar: Las aleaciones de aluminio pueden ser más difíciles de soldar en comparación con otros metales debido a su alta conductividad térmica y a la formación de óxido en la superficie, se requiere experiencia y una variante bastante amplia de técnicas especiales para obtener uniones de soldadura de buena calidad. [37]

2.3.4 Acero de alta resistencia



Figura 15 Acero de alta resistencia

Fuente: <https://www.worldenergytrade.com/metales/aluminio/aleaciones-aluminio-alto-rendimiento>

Ventajas:

- **Gran Resistencia:** El acero de gran fortaleza posee una resistencia superior a la fuerza de tracción en contraste con el acero tradicional, lo que permite la construcción de estructuras más livianas y delgadas con la misma capacidad de carga. Esto puede llevar a una reducción en el uso de materiales y en los costos de construcción. [38]
- **Mayor resistencia:** Debido a su mayor resistencia, el acero de alta resistencia permite la fabricación de componentes más delgados y livianos, manteniendo la misma capacidad de carga que los componentes más pesados de acero convencional. Esto puede resultar en estructuras más eficientes desde el punto de vista estructural. [39]
- **Menor costo de mantenimiento:** Debido a su mayor resistencia, las estructuras de acero de alta resistencia pueden requerir menos mantenimiento a lo largo de su vida útil, ya que son menos propensas a deformarse o fallar bajo cargas aplicadas. Esto da menores costos de mantenimiento a largo plazo. [40]

Desventajas

- **Mayor costo:** El acero de alta resistencia tiende a tener un costo inicial elevado en comparación con el acero convencional. Esto se debe a los procesos de fabricación más complejos y a los materiales de mayor calidad utilizados en su producción. [41]
- **Mayor dificultad de fabricación:** La mayor resistencia del acero de alta resistencia puede dificultar su conformado y soldadura en comparación con el acero convencional. Esto puede complejidad de los procesos de construcción. [42]
- **Menor ductilidad:** El acero de alta resistencia puede tener una ductilidad reducida en comparación con los aceros convencionales. La ductilidad es la capacidad de un material para deformarse antes de la fractura y puede ser importante en situaciones de carga extrema o durante eventos sísmicos. [43]

-

Tabla 3 Selección de material

Peso:	0.3	0.2	0.15	0.15	0.2	1
Calificación:	Costo	Operatividad	Existencia	Montaje	Seguridad	Total
Titanio	3	3	5	4	9	4.65
Fibra de Carbono	3	3	5	4	9	4.65
Aluminio	8	9	10	8	8	8.5
Acero	8	9	8	8	8	8.2

2.1.3 Selección de alternativa con mejor puntaje

La opción que obtuvo una ponderación más alta según los criterios establecidos previamente es el aluminio, obteniendo una calificación de 8.5, donde muestra en cuanto a costo es mucho más factible usar este material y en cuanto a seguridad son similares entre todas opciones.

CAPÍTULO 3: DISEÑO Y SIMULACIÓN

3.1 Análisis de cargas

Se llevó a cabo una evaluación de la carga en el exoesqueleto, centrándose en los componentes principales que deberán soportar todo el peso. Se consideraron tanto el peso corporal del individuo como la carga que debe ser elevada.

La fuerza ejercida sobre el cuerpo humano, especialmente sobre el muslo, está relacionada con los principios de la mecánica y la anatomía humana.

Cuando una persona realiza una acción, como levantar pesas, las fuerzas se distribuyen a las diferentes partes del cuerpo involucradas en el movimiento. En este caso, el muslo es una de las partes del cuerpo que ejerce gran parte de la fuerza requerida para levantar el peso.

La relación que existe entre la fuerza corporal total y la fuerza que se ejerce sobre los muslos depende de varios factores, como la postura, la técnica, la fuerza muscular y la coordinación de una persona. En general, el muslo es una de las principales áreas del cuerpo involucradas en la generación de energía, como levantar objetos pesados o realizar actividades que requieren fuerza con las piernas.

Para determinar la fuerza que realiza el muslo de una persona que pesa 80kg para levantar una carga de 20 a 100 kg, se debe considerar algunos aspectos biomecánicos.

En este caso, el levantamiento de una carga requerirá la activación de varios músculos de la pierna, incluido el cuádriceps femoral, que es uno de los principales músculos del muslo.

Se utiliza el peso segmentario de una persona de 80kg de estatura promedio para poder descomponer el peso total del cuerpo en cada una de sus partes. (figura 5)

De la misma manera pasa con el músculo de la pantorrilla el cual es uno de los músculos clave involucrados en el levantamiento de peso es el músculo gastrocnemio. Al igual que con el cuádriceps femoral, la fuerza del músculo gastrocnemio se puede estimar en función de una proporción del peso corporal.

Las partes del cuerpo como la cabeza, cuello, tórax, abdomen y pelvis se tomó la mitad del peso, ya que irían distribuidas en cada pierna igual que el peso a cargar, quedándonos la tabla de la siguiente manera.

Tabla 4 Pesos Segmentarios

Parte del Cuerpo	Peso en kg
Cabeza	2.48
Cuello	0.88
Tórax	8.76
Abdomen	5.88
Pelvis	5.36
Brazo	2.24
Antebrazo	1.35
Mano	0.48

Fuente: Elaboración propia

Sumando todos estos valores, podemos llegar a decir que el peso del tronco (P_{tronco}) sería igual a 27,43 kg lo que da igual a una fuerza de: 268,814N

El peso segmentario del muslo (P_{muslo}) es igual a 8kg (figura 4), lo que me da una fuerza de 78,4N

Ayudándonos de estos datos se realizó una simulación para obtener los esfuerzos que se provocan

Datos:

$P_{\text{tronco}} = 268,8 \text{ N}$

$P_{\text{muslo}} = 78,4 \text{ N}$

Peso a cargar = 980N

Lo dividimos entre dos lo que nos daría igual a

Peso a cargar= 490N

3.1.1 Eslabón Fémur

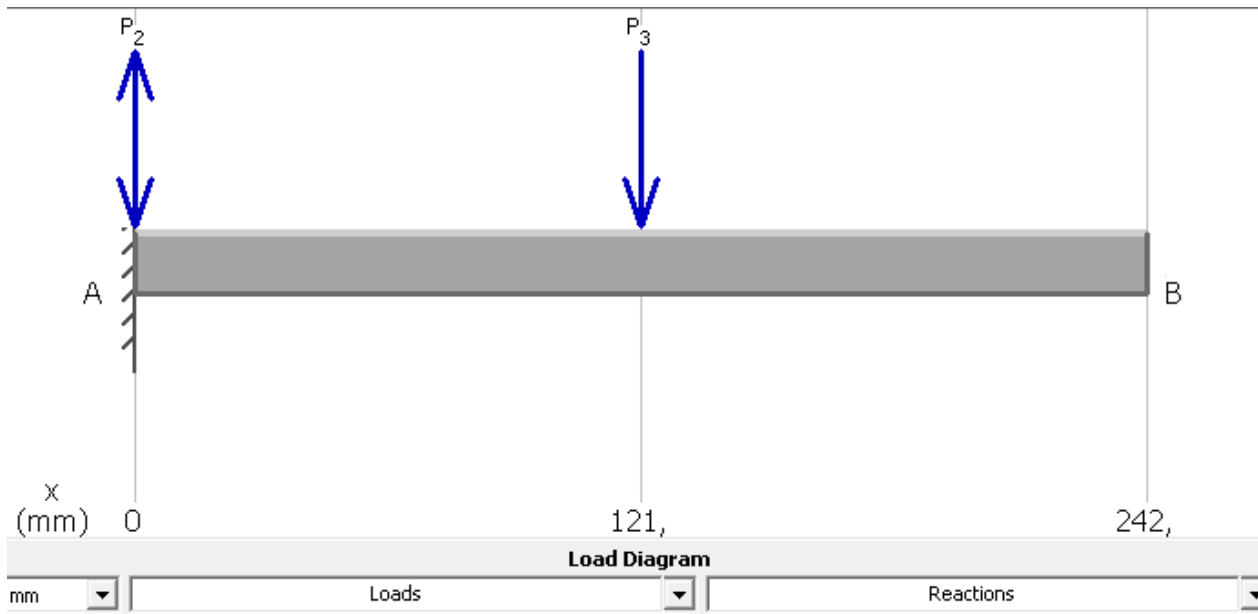


Figura 16 Diagrama de cargas de eslabón correspondiente al fémur simulado con viga empotrada

P1 Corresponde a la fuerza que será ejercida por el actuador que es de 700 N

P2 corresponde a la suma de $P_{tronco} + P_{cargar} = 758.8N$

P3 Corresponde al peso del muslo

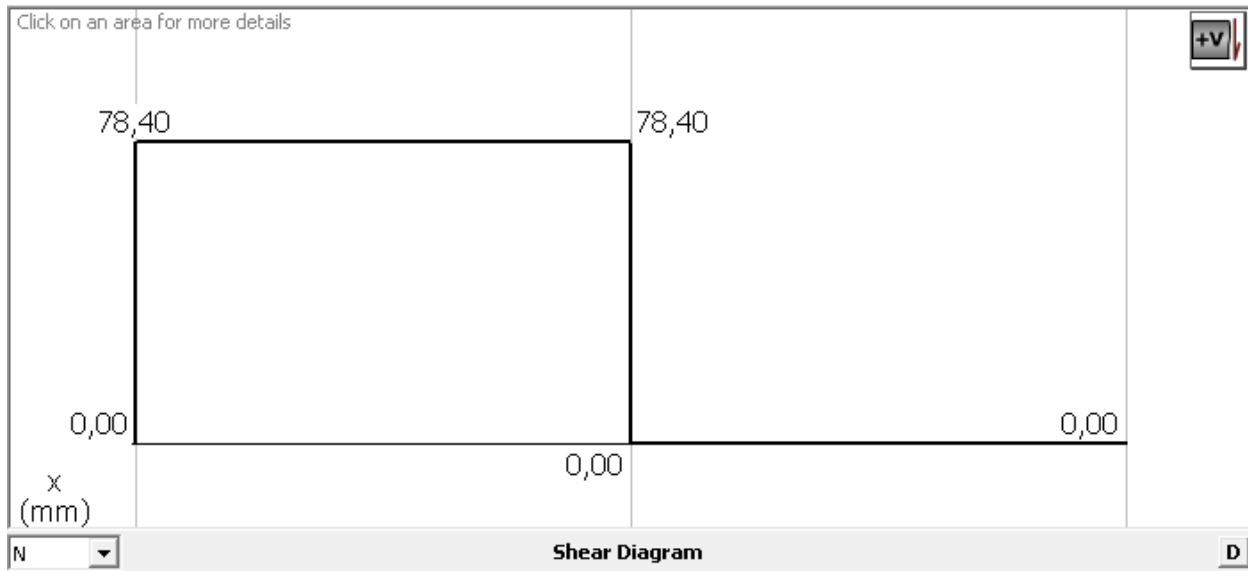


Figura 17 Diagrama de fuerzas cortantes correspondientes al eslabón del fémur

Fuerza cortante máxima 78.4 N

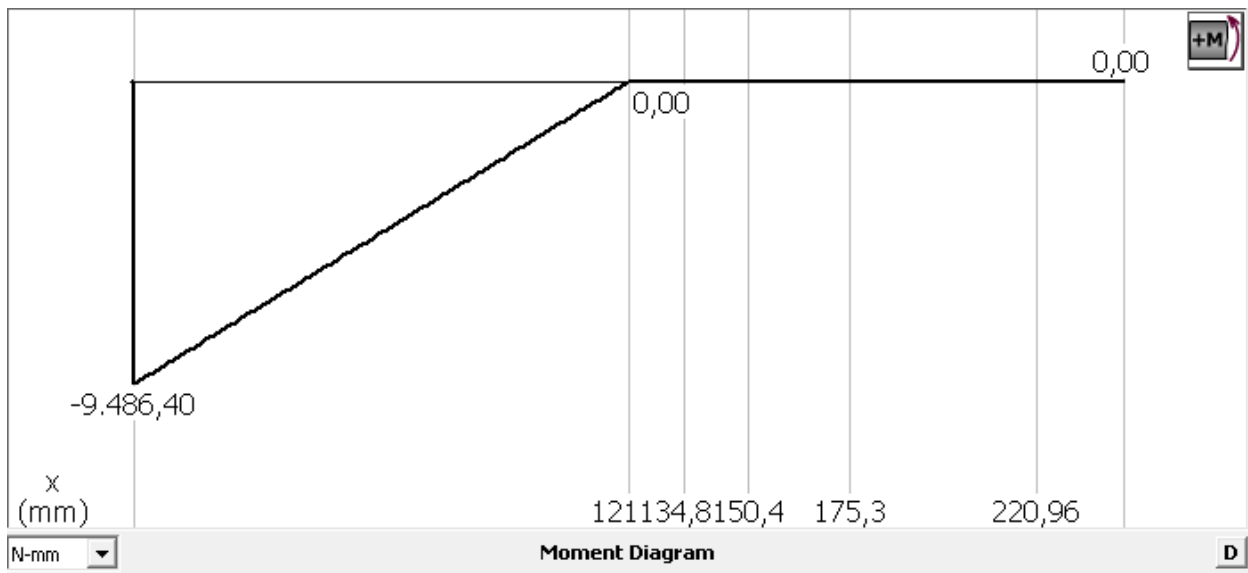


Figura 18 Diagrama de momento correspondiente al eslabón del fémur

Momento torsor máximo = -9486.4 N-mm

En general, podemos hacer una estimación aproximada considerando que el cuádriceps femoral puede generar una fuerza de alrededor del 50% al 70% del peso corporal

Considerando el peso corporal de 80 kg, y asumiendo una estimación del 50% del peso corporal para la fuerza generada por el cuádriceps femoral, la fuerza que podría realizar el muslo en este caso sería aproximadamente:

$$\text{Fuerza del muslo} = 0.5 * \text{Peso corporal}$$

$$\text{Fuerza del muslo} = 0.5 * 80 \text{ kg}$$

$$\text{Fuerza del muslo} = 40 \text{ kg} \approx 392 \text{ Newtons}$$

De igual manera el músculo gastrocnemio puede generar aproximadamente entre el 20% y el 30% del peso corporal en fuerza. Por lo tanto, para una persona de 80 kg, la fuerza que puede generar la pantorrilla en esta situación sería:

$$\text{Fuerza de la pantorrilla} \approx 0.2 * \text{Peso corporal}$$

$$\text{Fuerza de la pantorrilla} \approx 0.2 * 80 \text{ kg}$$

$$\text{Fuerza de la pantorrilla} \approx 16 \text{ kg} \approx 157 \text{ Newtons}$$

Esta es una estimación general y la fuerza real que puede generar la pantorrilla y el muslo de una persona para levantar una carga de 100 kg puede variar según la técnica, la fuerza muscular individual y otros factores.

La suma de estas dos fuerzas son las cuales nos enfocamos en reemplazar con el actuador representado por F para que la persona realice un esfuerzo mínimo requerido para levantar la carga.

Teniendo en cuenta que la posición en la que se genera más esfuerzo el usuario al levantar una carga forma un ángulo de entre 50 y 110 grados entre el fémur y la pantorrilla se puede evidenciar en la figura 35 y 36, asumiremos un ángulo de 90 grados el cual se encuentra dentro del rango.

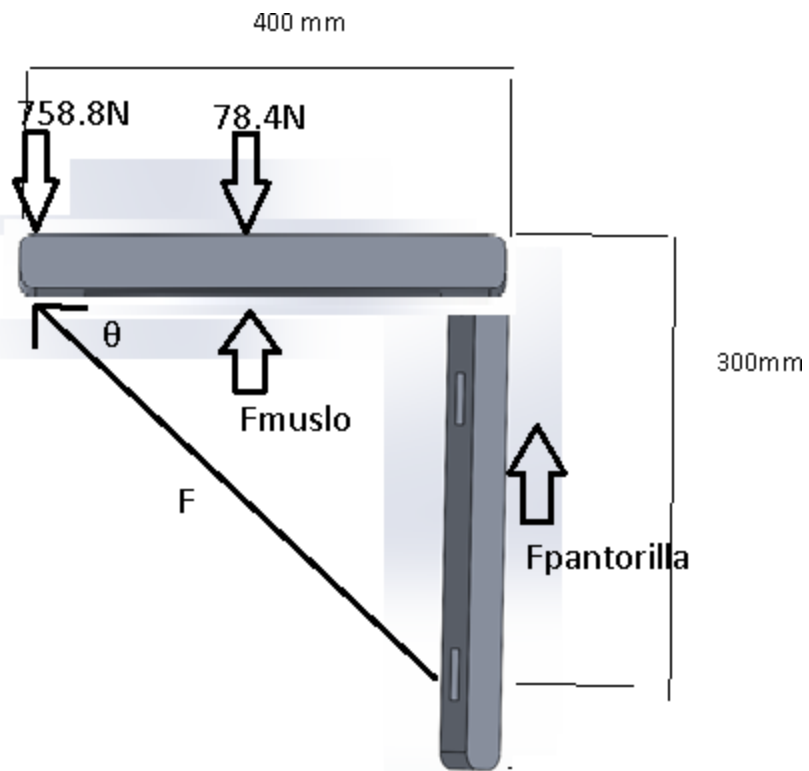


Figura 19 Diagrama de cuerpo libre

Datos:

$$P1 = P_{\text{carga}} + P_{\text{tronco}} = 758.8$$

$$P2 = P_{\text{muslo}} = 78.4\text{N}$$

$$F_{\text{muslo necesaria}} = 392\text{N}$$

$$F_{\text{pantorrilla}} = 157\text{N}$$

Encontramos el ángulo θ con ayuda de trigonometría

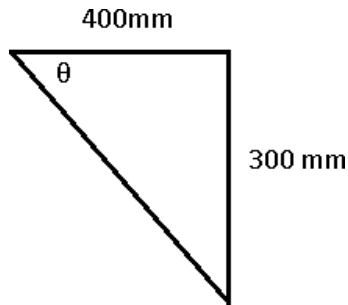


Figura 20 Triángulo rectángulo

$$tg\theta = \frac{300}{400}$$

$$\theta = 40.96$$

Una vez obtenido el ángulo se realiza sumatoria de fuerzas en Y para obtener la fuerza F necesaria

$$\Sigma Fy = 0$$

$$-758.8N - 78.4N + F_{muslo} + Fy + F_{pantorrilla} = 0$$

$$-758.8 - 78.4 + 392 + 157 + Fy = 0$$

$$-Fy = -288.2$$

$$Fy = F \text{sen}\theta$$

$$F \text{sen}\theta = 288.2N$$

$$F = 479.99 N$$

3.2 Parametros de diseño

Los parámetros de diseño se obtuvieron de las mediciones del cuerpo humano y análisis de la fuerza que el diseño debe soportar. Estos parámetros se obtuvieron para satisfacer y que logre soportar un peso de 100kg sin incluir el peso del usuario.

En la tabla 5 se muestra los valores mínimos y máximos que el diseño debe soportar.

Tabla 5 Parametros de diseño

Parametros	Peso
Mínimo	25 kg
Máximo	100kg

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Material

Se eligió el aluminio 2014 por las propiedades y características que ofrecía, lo cual se adaptaba perfectamente a los requerimientos establecidos.

3.3.1 Resistencia Mecánica

El aluminio 2014 tiene una buena resistencia mecánica, especialmente cuando se trata de aplicaciones de alta temperatura. Esta aleación es conocida por su alta resistencia en comparación con otros tipos de aluminio.

3.3.2 Buena maquinabilidad

El aluminio 2014 tiene una excelente maquinabilidad, es decir, se puede trabajar fácilmente con procesos de mecanizado como el torneado, fresado, taladrado, etc. Esto lo convierte en una opción popular en aplicaciones con un mecanizado muy preciso como requerimiento principal.

3.3.3 Aplicaciones Típicas

Debido a su alta resistencia y buena maquinabilidad, el aluminio 2014 se utiliza en varias aplicaciones, como en componentes estructurales.

ALEACION	CARGA ROTURA	LIMITE ELÁSTICO	ALARGAMIENTO	DUREZA BRINELL
NORMAS A.A.	Rm - N / mm ²	Rp 0,2 - N / mm ²	A 5,65 %	HB
7075- T7351	440	360	6	140
7075- T6 / T651	470	400	5	130
2024- T6	425	315	5	125
7020- T6 / T651	350	290	10	120
2024- T3	400	270	8	120
2007- T3	340	220	6	115
2014- T4	430	275	18	110
2007- T4	330	210	7	110
2017- T4	380	260	12	105
2011- T3	380	295	15	100
6061- T6 / T651	190	110	16	95
6062- T6 / T651	295	250	8	95
2030- T4	330	210	7	95
6060- T6	190	150	8	85
5052- H34	195	90	30	70
5083- 0 / H111	270	110	16	70
5086- 0 / H111	240	95	16	65
6063- T5	175	130	6	60
5154- 0 / H111	215	85	16	55
5754- 0 / H111	190	80	16	55
5251- 0 / H111	160	60	16	45
1200- H18	125	150	15	45
3003- H14	130	110	6	45
5005- H24	145	110	6	45
1050- H18	165	150	15	43
1200- H14	125	115	20	37
1050- H14	125	115	20	35
1200- 0	90	34	40	23
1050- 0	90	34	40	21

Figura 21 Carga de rotura, limite elástico, alargamiento y dureza de las aleaciones de aluminio.

Fuente: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn110.html>

Entonces mediante estos parámetros se simula los eslabones del exoesqueleto con los parámetros antes seleccionados.

3.4 Selección de Actuadores

La elección de mecanismos de movimiento fue llevada a cabo teniendo en cuenta los parámetros de diseño y las alternativas disponibles en el mercado. Optamos por emplear mecanismos lineales eléctricos, los cuales incorporan un mecanismo de reducción mediante un tornillo sin fin. Esto nos brinda la ventaja de obtener altas fuerzas, aunque a expensas de sacrificar la velocidad, ya que se traducirá en menor rapidez. Estos mecanismos lineales son capaces de generar una fuerza de 700N a 12V.

Se selecciono un actuador, para el movimiento del eslabón del fémur.

3.4.1 Definición de los componentes

3.4.1 Eslabón Fémur

El primer eslabón se relaciona con el fémur del exoesqueleto, Posee una medida de 242 mm, un ancho de 30mm y un espesor de 20mm. El eslabón contiene una canaleta de 200 mm que corresponden a un mecanismo de desplazamiento para el actuador, dos canales en los costados de 6mm de ancho y 30mm de longitud que corresponde al mecanismo de sujeción. El material seleccionado fue Aluminio 2014 por las propiedades mecánicas que nos presenta, disponibilidad en el mercado y la facilidad con la que nos permite manufacturar. En la Figura 22 se puede apreciar el modelo diseñado en CAD del eslabón correspondiente al fémur.

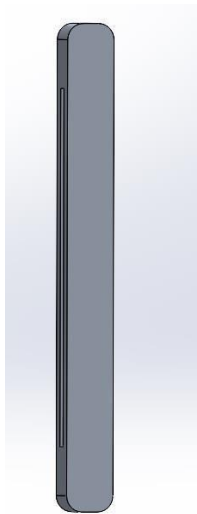


Figura 22 Elaboración en SolidWorks Eslabón 1 Fémur

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Eslabón Tibia

El segundo eslabón corresponde a la tibia del exoesqueleto, el cual tiene una longitud completa de 234mm, un ancho de 30 mm y un grosor de 20 mm. Esta pieza incluye un agujero de 6 mm de diámetro ubicado a 30 mm hacia abajo del borde del eslabón que concuerda por donde será sujetado el eslabón, dos canales el primero ubicado a 60mm del borde superior y el otro canal ubicado a 30 mm del borde inferior que servirán para el mecanismo de sujeción.

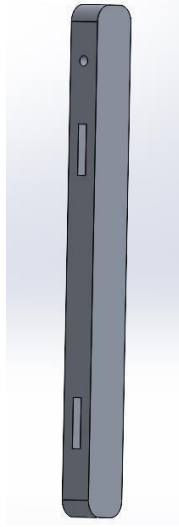


Figura 23 Diseño en SolidWorks Eslabón 2 Tibia

Fuente: Elaboración Propia

3.5 Simulación eslabones

3.5..1 Eslabón 1 Fémur

Para la simulación y por la figura que tiene el eslabón diseñado y por cuestión de comodidad y acoplamiento se usó el software SolidWorks, donde se aplican cargas reales, y con una validez de este método se puede determinar el comportamiento de la estructura en función a los esfuerzos que se generan en los puntos determinados y con esto se puede determinar el mayor esfuerzo y el factor de seguridad.

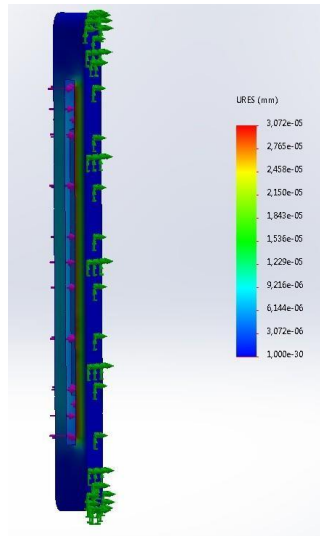


Figura 24 Simulación Desplazamiento eslabón 1 fémur

En la Figura (24) el desplazamiento del eslabón 1 fémur es de $1.000e^{-30}$ mm según los resultados obtenidos mediante una simulación el eslabón se encuentra dentro del esfuerzo mínimo, por consiguiente, resulta indetectable e infalible.

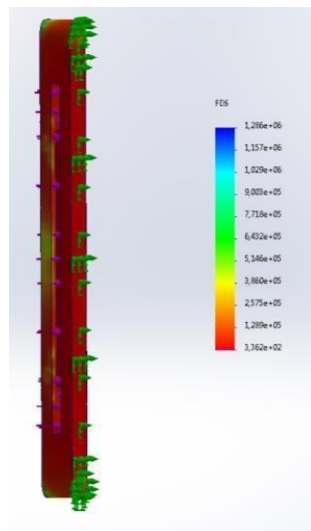


Figura 25 Simulación Factor de Seguridad Eslabón 1

En la Figura (25) el factor de seguridad del primer eslabón fémur es de $3.4e^{02}$, el factor de seguridad mínimo es de 2.01, por lo tanto, se concluye que cumple con los parámetros de diseño.

3.5..2 Eslabón 2 Tibia

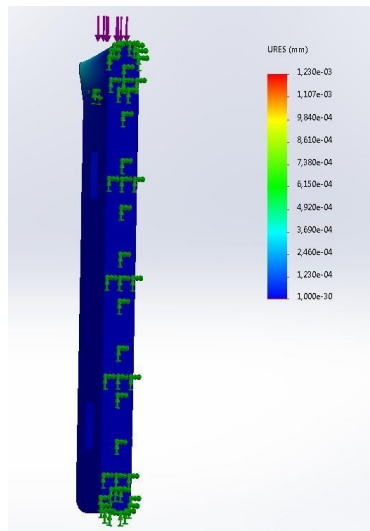


Figura 26 Simulación Desplazamiento Eslabón 2 Tibia

En la figura (26) el desplazamiento del eslabón 2 Tibia es de $1.230e^{-03}$ mm, por medio de la simulación se concluye que el eslabón no falla.

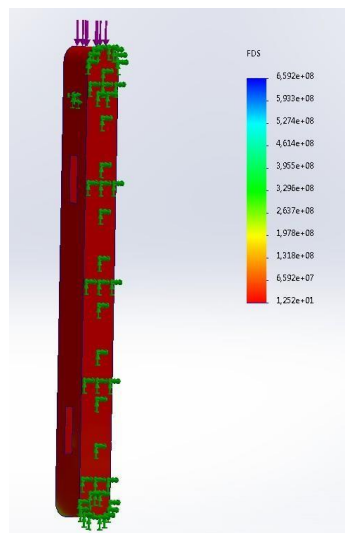


Figura 27 Simulación Factor de Seguridad Eslabón 2 Tibia

En la figura (27) se observa que el Factor de Seguridad del segundo eslabón tibia es de $6.592e^{07}$ el factor de seguridad mínimo es de 2.01, por lo tanto, se concluye que cumple con los parámetros de diseño.

3.5.3 Sistema electrónico

Para el sistema electrónico se utiliza el software web tinkercad ya que nos permitía visualizar en tiempo real el código y funcionamiento, este software fue el elegido para la simulación del circuito electrónico ya que es altamente interactivo.

Tabla 6 Características técnicas selección de cables

Tipo de cable	Voltaje	Corriente
Cables de conexión Arduino	5V	5A

Para alimentar tanto el Arduino como el actuador, se requiere una fuente externa que proporcione el voltaje y amperaje adecuados para un funcionamiento óptimo. Para este fin, se implementará una fuente de corriente continua (DC) que permita regular el voltaje y amperaje necesarios para el sistema electrónico y eléctrico mencionado en la siguiente sección

3.5.4 Circuito de medición

El siguiente circuito exhibe el sensor Giroscopio, el cual mide la orientación y el momento angular de un objeto. Esto permite detectar cambios en la dirección y activar el actuador correspondiente.

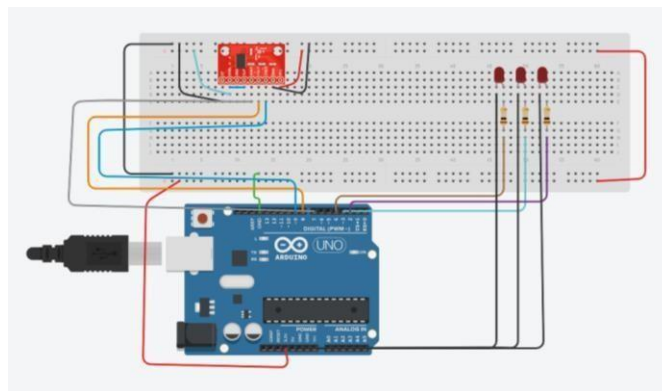


Figura 28 Diagrama de conexión y funcionamiento del sensor

Tabla 7 Sensor y Actuator por implementar

Sensores y actuadores			
Nombre	Clase de señal	Conexión en Arduino	Señal a identificar
Giroscopio	Digital	7,8,9	angular
Actuador eléctrico lineal	Salida PWM y digital	2	desplazamiento

Estos sensores y actuadores son controlados por un microcontrolador ubicado en la placa diseñada. La placa incorpora un microcontrolador para el control de los sensores y actuadores.

Los diagramas definen cada etapa del movimiento del exoesqueleto y proporcionan los elementos necesarios para su implementación. Se diseña un sistema idéntico para la rodilla de cada pierna, como se muestra en la sección anterior. Las conexiones son fáciles de montar e implementar.

3.5.5 Diagrama de flujo del procedimiento operativo.

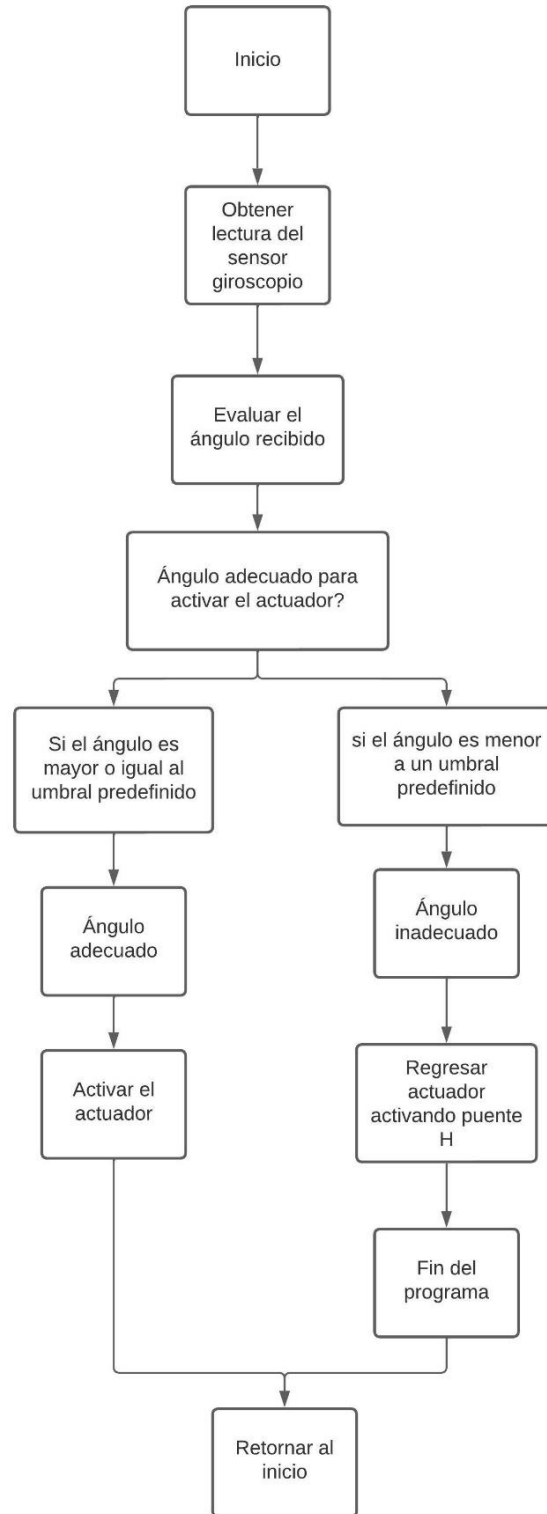


Figura 29 Diagrama de flujo de funcionamiento

CAPÍTULO 4: IMPLEMENTACIÓN

El propósito de esta sección es lograr la construcción tangible del exoesqueleto, asegurándose de que satisfaga las demandas funcionales de la biomecánica, las dimensiones distintas y cumpla con las principales funciones previamente expuestas en los capítulos anteriores.

4.1 Manufactura y Ensamble

4.1.1 Proceso de construcción del exoesqueleto.

Tabla 8 Secuencia de construcción del exoesqueleto

ORDEN DE EDIFICACIÓN	
Proceso	Tareas
Obtener la materia prima	Lamina de aluminio 2014
Maquinado de piezas	Fresado y torneado del eslabón 1
	Fresado y torneado del eslabón 2
Recubrimiento	Lijado y pintado de eslabones eliminando imperfecciones que puedan causar daños al usuario
Ensamble mecánico	Eslabón 1
	Eslabón 2
	Bujes
	Bandas sujetadoras
Ensamble eléctrico	Actuador eléctrico lineal
	Sensor de presión/fuerza
	Fuente

4.1.1.1 Proceso de Obtención de materia prima

Los componentes empleados en el armazón del exoesqueleto son perfiles estandarizados, su tamaño fue calculando a partir de un estudio de tensiones para establecer su grosor y

longitud. Se emplean perfiles de una aleación de aluminio 2014 de forma cuadrada y circular para la fabricación.

4.1.1.2 Proceso de Maquinado

Se realizó el maquinado de las piezas en un fresador con la herramienta de desbaste para dejarla del espesor necesario, este tipo de maquinado está diseñado para un tipo de trabajo industrial ya que se necesita que sea resistente, por el diseño de las piezas a mecanizar se obtuvo por este proceso. Para esto se necesita seguir una serie de pasos para tener un acabado de calidad.

- Primero se debe diseñar el eslabón, este eslabón debe tener un diseño detallado, esto quiere decir que se debe determinar las dimensiones, la forma y las características necesarias para cumplir con los requisitos del exoesqueleto para rodilla.
- Segundo se debe realizar la selección del material adecuado para el eslabón, pueden usarse distintos tipos de metales, ya sea como el aluminio, acero inoxidable o incluso el titanio, esto dependerá en gran parte de las necesidades de diseño esto quiere decir que dependerá enteramente de la resistencia y peso del diseño.
- Antes de iniciar el proceso de maquinado se debe realizar una preparación previa del material, esto puede ser cortar o serrar el material en una pieza de tamaño que nos sea conveniente según el diseño del eslabón.
- Esto depende de cada diseño, para el diseño de nuestros eslabones utilizamos la técnica de taladrado y roscado para dar forma a los lugares donde se embonará y se atornillará cada elemento del exoesqueleto, para esto se puede utilizar una broca o una machuela en la fresadora o el torno.
- Una vez terminado el acabado del maquinado principal, muchas veces es necesario un acabado y un pulido adicional para suavizar las superficies y eliminar

las rebabas. Esto lo realizamos mediante una lija de grano grueso para la eliminación de las rebabas gruesas (40-80), para la eliminación de rebabas finas se usa una lija de grano fino (100-200) esto para suavizarla superficie y eliminar las rebabas más pequeñas.

- Y como último paso se procedió a realizar una inspección de calidad esto es importante para de esta manera asegurarnos de que el eslabón cumpla con las superficies requeridas, esto quiere decir que hay que comprobar las dimensiones, la precisión y la calidad de las superficies mecanizadas.

4.2 Pruebas Realizadas

Las pruebas realizadas en el exoesqueleto para rodilla tienen como objetivo evaluar su rendimiento y efectividad en el aumento de la fuerza y la capacidad de movimiento de la articulación de la rodilla. En las pruebas se realizó los siguientes puntos:

- Pruebas de rendimiento de la fuerza: Se realizó medición de fuerza generada por el exoesqueleto y se comparó con los valores referenciales. Esto hicimos con pruebas de carga, el usuario levanto un objeto pesado de aproximadamente 70kg.



Figura 30 Prueba de levantamiento sin apoyo de eslabones del exoesqueleto

En la imagen se puede observar que al usuario le costó levantar el cilindro ya que un cilindro en promedio pesa alrededor de 40 kg, lo cual ya es un peso considerable.

A continuación, se le procedió a colocar el exoesqueleto, con la velocidad y los sensores ya seteados para el correcto funcionamiento, siempre cuidando la integridad del usuario y su comodidad.



Figura 31 Prueba con el montaje de los eslabones

Durante esta prueba, se pudo notar que el usuario mostró una mayor relajación y utilizó menos fuerza. Además, mediante esta prueba pudimos determinar la resistencia de los eslabones.

- Pruebas de movimiento y flexibilidad: Se evalúa el rango de movimiento de la articulación de la rodilla con el exoesqueleto siempre percatándonos de las sensaciones que tenga el usuario, este análisis de movimiento se lo compara con el rango de movimiento natural. En este análisis se hizo pruebas como el caminar, el correr, subir escaleras o realizar una serie de movimientos específicos para simular actividades diarias de igual manera se realizan pruebas en condiciones no normales o un tanto exageradas para determinar la resistencia. Estas pruebas determinan si el exoesqueleto permite una movilidad adecuada y cómoda para el usuario, sin restricciones significativas o que

perjudique el trabajo y la vida diaria del usuario.



Figura 32 Pruebas de movimiento y flexibilidad sin exoesqueleto



Figura 33 Prueba de movimiento y flexibilidad con exoesqueleto

En las imágenes se puede observar que al hacer un ejercicio de sentadilla el limitante que nos da el exoesqueleto en comparación al movimiento natural es casi imperceptible, en condiciones en las que la sentadilla necesite ser más baja que suele ser en casos muy puntuales el diseño realizado no presentara problemas.



Figura 34 Levantamiento totalmente horizontal del usuario sin exoesqueleto

En el caso de este análisis de movimiento en el cual el usuario se encuentra totalmente levantando con el ángulo de su pierna en un aproximado de 178 grados no se observa limitante en el movimiento.

Para un mejor análisis, tomamos de referencia varios ángulos para tener un mejor entendimiento del funcionamiento del exoesqueleto en cuando al criterio de flexibilidad y movimiento con el exoesqueleto montado y sin el exoesqueleto.

- Con exoesqueleto



Figura 35 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 113



Figura 36 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 111



Figura 37 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 54



Figura 38 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 100



Figura 39 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 180

- Sin exoesqueleto



Figura 40 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 161



Figura 41 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 166



Figura 42 Prueba de movimiento y flexibilidad con un ángulo de 85

- Pruebas de estabilidad y de equilibrio: Se ha analizado la capacidad del exoesqueleto para proporcionar estabilidad y equilibrio durante el movimiento. Este análisis ha incluido pruebas rigurosas, como caminar en superficies inclinadas y planas, así como pruebas en superficies de formas irregulares, como cambios rápidos de dirección o pruebas de equilibrio en una sola pierna. Estas pruebas permiten evaluar la capacidad del exoesqueleto para ofrecer un soporte y control adecuados, con el objetivo de reducir el riesgo de caídas y posibles lesiones para el usuario.



Figura 43 Prueba de equilibrio en sentadilla al levantarse sin exoesqueleto

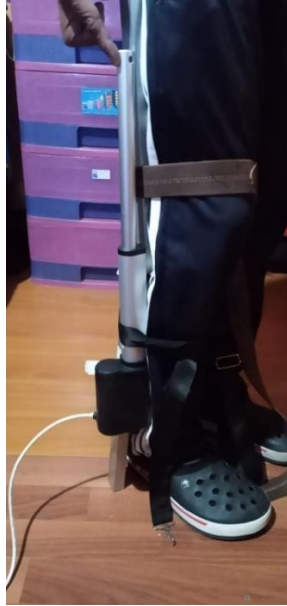


Figura 44 Prueba de equilibrio en sentadilla al levantarse con exoesqueleto

En la prueba detallada anteriormente, se puede observar que el equilibrio es un tema resuelto. En ambas imágenes se muestra un equilibrio normal, gracias a las correcciones realizadas mediante el sistema de control para solucionar las posibles fallas ocasionadas por el sistema de empuje.



Figura 45 Prueba de equilibrio y estabilidad



*Figura 46 Prueba de
Funcionamiento del actuador*



Figura 47 Actuador lineal ensamblado a eslabones

- Evaluación de la comodidad y la ergonomía: Se analizó la información recopilada sobre la comodidad del usuario y como estuvo sus sensaciones y adaptabilidad del sistema. Esto se realizó

mediante una encuesta y entrevista al usuario para de esta manera poder evaluar la comodidad al momento de su montaje y posterior funcionamiento, de igual manera su facilidad de montaje y desmontaje del exoesqueleto, si le causa alguna, molestia o fatiga en un uso prolongado. (Anexos)

- **Análisis biomecánico:** Para esta prueba se realizan mediciones y un análisis detallado de los movimientos, las fuerzas que se aplican y la distribución de las cargas en la articulación de la rodilla con el exoesqueleto.

Estas pruebas se realizaron tanto en entorno controlados, como en entornos reales, donde los usuarios pueden llevar a cabo actividades cotidianas. La recopilación de datos y la retroalimentación del usuario son de alta importancia para valorar y mejora continuamente el diseño y el rendimiento del exoesqueleto para rodilla.

4.3 Análisis Económico

Con el propósito de llevar a cabo un estudio económico del proyecto, se llevó a cabo la evaluación y cálculo del gasto, tanto de los materiales empleados como de la fabricación de las piezas y la mano de obra necesaria. Estos datos se presentan detalladamente en la tabla número 9.

Tabla 9 Análisis económico de materiales comerciales ferreteros

MATERIALES COMERCIALES FERRETEROS

DESIGNACIÓN	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
PLANCHA ESTRUCTURAL ALUMINIO 2014 (1220X2440MM) 20MM	2	27\$	54\$
TOTAL			54\$

Tabla 10 Materiales Normalizados

MATERIALES NORMALIZADOS

DESIGNACIÓN	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
RODAMIENTO HCH 609 09X27X7	2	1.12\$	2.24\$
PERNO, TUERCA Y RODELA M4X20MM	12	0.5\$	6\$
TOTAL			6.24\$

Tabla 11 Materiales Sistema eléctrico

MATERIALES SISTEMA ELECTRICO

DESIGNACIÓN	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
ACTUADOR ELÉCTRICO LINEAL 12VDC, CARRERA 200MM, CARGA 1500N	1	120.00\$	120.00\$
ARDUINO UNO CON CABLE	1	14.00\$	14.00\$
CABLES AWG22-20, UTP	10	0.5\$	5.00\$
SENSOR GIROSCOPIO	1	8.00\$	8.00\$

PLACA DE PRUEBA	1	14.00\$	14.00\$
1000PUNTOS			
TOTAL			161.00\$

Tabla 12 Costos de mecanizado y recubrimiento de piezas

COSTO DE MECANIZADO Y RECUBRIMIENTO

DESIGNACIÓN	Cantidad	Precio Unitario	Precio total
MECANIZADO POR	1	30\$	30\$
FRESADORA			
TOTAL			30\$

Tabla 13 Otros costes

OTROS COSTOS

OTROS	Precio total
SERVICIO DE MONTAJE	45.00\$
SERVICIO DE TORNO	20.00\$
SERVICIO DE INGENIERÍA	400.00\$
TOTAL	465\$

Tabla 14 Costo total

COSTO TOTAL

NOMBRAMIENTO	Precio total
PRODUCTOS FERRETEROS DE VENTA	54.00\$
MATERIALES ESTANDARIZADOS	6.24\$
COSTOS DE MECANIZADO	30.00\$
COMPONENTES DEL SISTEMA ELÈCTRICO	161.00\$
OTROS	465.00\$
TOTAL	716.24\$

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Después de examinar la literatura, se adquirieron los atributos técnicos indispensables para la concepción del modelo en este proyecto de titulación. Con el objetivo de edificar la estructura del exoesqueleto, se empleó la aleación de aluminio 2014 y la manufactura por arranque de viruta en la fabricación de los eslabones. Al finalizar la fabricación, el peso del exoesqueleto cumple con el rango establecido por la Organización Internacional del Trabajo, alcanzando el 80% de la carga máxima permitida de 100 kg. Esto lo convierte en un exoesqueleto ergonómico en el cual cada eslabón simula el movimiento de un músculo de la pierna, aliviando la carga muscular generada por el trabajo y mejorando la postura.

La aleación seleccionada para los eslabones del exoesqueleto es el aluminio 2014, que ofrece una combinación adecuada de resistencia, peso ligero y la fuerza necesaria. Estas características resultan esenciales para garantizar la durabilidad y funcionalidad del exoesqueleto en su aplicación específica.

Fue desarrollado un exoesqueleto para la rodilla que puede soportar una carga de hasta 500N debido a que el peso total que soporta es 1000N, pero se dividen en las dos extremidades inferiores, aplicando una fuerza normal en entornos laborales específicos para los que ha sido diseñado. La estructura del exoesqueleto se creó considerando las dimensiones corporales típicas de la población latinoamericana y su biomecánica, con el objetivo de satisfacer los requisitos del usuario y lograr un diseño ergonómico y confortable que aumente la capacidad del usuario.

Se seleccionó un actuador eléctrico lineal de 12VDC con una carrera de 200mm y una capacidad de 1000N. Este actuador ofrece una fuerza adecuada para aplicar el aumento de fuerza necesario en la articulación de la rodilla. Además, su naturaleza eléctrica permite un control preciso y ajustable de la fuerza aplicada, lo que resulta de gran ayuda para adaptarse a las necesidades y requisitos del usuario.

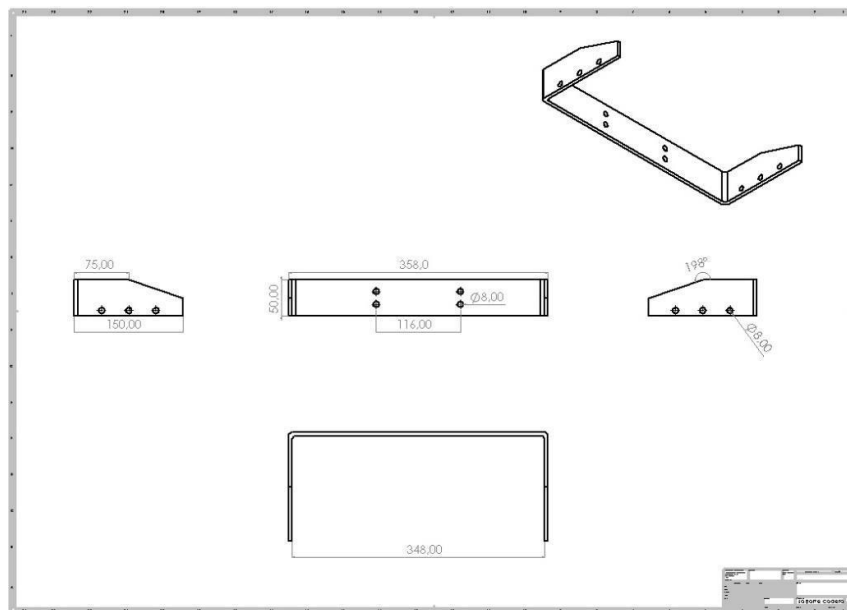
Un análisis económico es muy necesario para saber la viabilidad del proyecto y determinar su sostenibilidad, para este análisis se debe considerar los costos de adquisición de los componentes, la fabricación, el ensamblaje y los diferentes gastos asociados. De esta manera se puede determinar la rentabilidad de la fabricación del exoesqueleto para rodilla.

Recomendaciones

El diseño cumple con el objetivo sin embargo para una mayor eficiencia se recomienda usar una base para la cadera junto con otro actuador eléctrico lineal que sea el que ayude al levantamiento de la misma, de esta manera se reduce el esfuerzo que debe realizar el usuario, en este caso se recomienda la implementación de un sistema fuzzy ya que estaríamos hablando de un sistema un sistema SIMO y el control fuzzy podría funcionar de una mejor manera.

Se recomienda también si se puede solventar de manera económica, el uso de servomotores, y de un sensor muscular, de esta manera el exoesqueleto es más ergonómico y en cuanto a la movilidad y es más cómodo para el usuario.

Adjuntamos el diseño de un posible soporte para cadera que puede ser usado.



REFERENCIAS

- [1] Galloway, K. C., & Birkmire-Peters, D. P. (2017). Exoskeletons for rehabilitation and augmenting human performance. *Journal of biomedical engineering*, 1(1), 1-9. doi: 10.11648/j.jbme.20170101.11
- [2] G. A. R. Arcos, E. F. V. Ocampo, C. I. M. Añazco, and E. E. V. Ocampo, "Control of a Lower Limb Exoskeleton for Gait Assistance Based on Adaptive Oscillators," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 10, pp. 1-11, 2016. doi: 10.1177/1687814016665913
- [3] C. P. R. Christensen, L. C. M. Gómez, and J. C. G. Moctezuma, "Design and Control of a Lower Limb Exoskeleton for Gait Rehabilitation," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1-12, 2017. doi: 10.1177/1729881417708334
- [4] Y. Lu, Z. Q. Luo, and J. F. Ding, "Design and control of a novel exoskeleton for upper limb rehabilitation
- [5] Wagner, D., Gorgey, A., & Harkema, S. (2018). Outcomes and physical performance measures of individuals with incomplete spinal cord injury before and after an exoskeleton for walking training program. *Journal of Spinal Cord Medicine*, 41(6), 633-641. doi: 10.1080/10790268.2017.1368591
- [6] EXOESQUELETOS PARA POTENCIAR LAS CAPACIDADES HUMANAS Y APOYAR ... - SciELO. (n.d.). Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-97622010000100008
- [7] Chávez, M. A; Rodriguez, F.S; López, A.B; (2010) *Revista Ingeniería Biomédica* ISSN 1909-9762, volumen 4, número 7, enero-junio 2010, págs. 63-73
- [8] Pheasant, S., & Haslegrave, C. M. (2016). *Bodyspace: Anthropometry, ergonomics, and the design of work*. CRC press.
- [9] Zhang, J., Fiers, P., Witte, K., Jackson, J., & Poggensee, K. (2018). Lower limb exoskeletons: Research trends and regulatory guidelines in medical and non-medical applications. *Applied Ergonomics*, 70, 252-262. doi: 10.1016/j.apergo.2018.04.003
- [10] Winter, D. A. (2009). *Biomechanics and motor control of human movement* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- [11] Nigg, B. M., & Herzog, W. (2007). *Biomechanics of the musculoskeletal system*. John Wiley & Sons.
- [12] Mow, V. C., & Huiskes, R. (2005). *Basic orthopaedic biomechanics & mechano-biology*. Lippincott Williams & Wilkins.
- [13] Escamilla, R. F. (2010). Knee biomechanics of the dynamic squat exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 42(6), 1101-1107. doi: 10.1249/MSS.0b013e3181c2d64d
- [14] Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd ed.). Instrument Society of America.

- [15] Actuador Lineal Eléctrico 12v Ip66 - Transductor.net. (n.d.). Retrieved from <https://transductor.net/actuador-lineal-electrico-12v-ip66/>
- [16] Banzi, M. (2011). *Getting Started with Arduino*. O'Reilly Media
- [17] Ouyang, P., & Mei, H. (2017). Design of a high-precision linear actuator for the rehabilitation robot. *IEEE Access*, 5, 21726-21735. doi: 10.1109/ACCESS.2017.2765832
- [18] 5Hertz-Electrónica (2023). Introducción al giroscopio. Recuperado de: https://www.5hertz.com/index.php?route=tutoriales/tutorial&tutorial_i13
- [19] Houssem, B., Taous-Meriem, L., & Mohamed-Foued, S. (2019). Performance of a linear actuator based on BLDC motor for machine tool application. *International Journal of Engineering Research and Technology*, 12(9), 1294-1302.
- [20] J. A. Ghoreshy, "Titanium Alloys: An Atlas of Structures and Fracture Features," Butterworth-Heinemann, 1998.
- [21] L. Lütjering, J. C. Williams, "Titanium," Springer, 2007.
- [22] A. Rack, J. D. Q. Bostrom, "The Materials Science of Titanium, 12th Edition," Springer, 2013.
- [23] M. Ashraf Imam, "Engineering Materials: Research, Applications and Advances," CRC Press, 2014.
- [24] J. Paulo Davim, "Machining of Titanium Alloys
- [25] Gupta, M. (2011). *Aluminum Alloys: Structure and Properties*. CRC Press.
- [26] Yang, B., & Zhao, S. (2020). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites for Infrastructure Applications. En *Materials for Infrastructure Sustainability* (pp. 1-24). Springer.
- [27] Baikerikar, K. (2016). Review on Carbon Fiber and Its Application. En *Advanced Engineering Materials* (pp. 1-5). Springer.
- [28] Hu, H., Zhang, D., & Yan, C. (2016). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composites for Automotive Applications. En *Automotive Carbon Fiber Composites* (pp. 33-55). Springer.
- [29] Nasrullah, M., Supriyo, B., & Jamaluddin, N. (2018). Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Composite: A Review on Manufacturing and the Potential for Automotive Body Panels. En *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 12(3), 3842-3860.
- [30] Aluminio troquelado: características y usos. (n.d.). Retrieved from <https://perfilesaluminio.net/aluminio-troquelado-caracteristicas-y-usos/>
- [31] costo unitario Contrazócalo de perfil de aluminio. (n.d.). Retrieved from <https://construyemejor.com/costo-unitario-contrazocalo-de-perfil-de-aluminio/>
- [32] Yang, H., & Liu, S. (2015). High-Velocity Impact Behaviors of Carbon Fiber Composite Laminates. En *High-Velocity Impact Phenomena* (pp. 179-212). Springer.

- [33] Ghali, E. (2012). Corrosion resistance of aluminum and magnesium alloys: Understanding, performance, and testing. John Wiley & Sons.
- [34] Polmear, I. J., StJohn, D. H., & Nie, J. F. (2017). Light Alloys: From Traditional Alloys to Nanocrystals. Elsevier.
- [35] Davis, J. R. (2003). Aluminum and aluminum alloys. ASM International.
- [36] Roberge, P. R. (2008). Handbook of corrosion engineering. McGraw-Hill Professional.
- [37] Herring, D. H. (2003). Aluminum recycling and processing for energy conservation and sustainability. ASM International.
- [38] Liu, L., & Kou, S. (2014). Welding metallurgy. John Wiley & Sons.
- [39] Hassan, M.M., et al. (2019). High-Strength Steel in Buildings and Civil Engineering Structures: A Review of Advantages and Challenges. Journal of Constructional Steel Research, 159, 261-277
- [40] Wei, Z., et al. (2017). Advanced High Strength Steel in Auto Industry: An Overview on Cold Forming Technology. Procedia Engineering, 207, 1863-1868.
- [41] Kaveh, A., et al. (2020). Cost-Effective Design of High-Strength Steel Frames Using Metaheuristic Algorithms. Structures, 25, 29-39.
- [42] Moura, M.F.S.F., et al. (2018). Economic Analysis of Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete (SFRHSC) Pavements. Construction and Building Materials, 168, 331-340
- [43] Sakai, T., et al. (2016). Fatigue Performance of High-Strength Steel Tubular Joints. Journal of Constructional Steel Research, 121, 1-10
- [44] Li, Y., Ye, Q., Lu, L., & Yu, T. (2019). Lightweight steel-concrete composite structures: Design, performance, and analysis. CRC Press.
- [45] <https://www.ergonautas.upv.es/herramientas/ruler/ruler.php>
- [46] Robert L. Mott, Resistencia de Materiales, Quinta., vol. 1. Ciudad de Mexico: Pearson Educación, 2009