



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO
OPTIMIZADOR DE FUERZA PARA EL LEVANTAMIENTO DE
CARGAS PESADAS**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTOR: Kevin Gabriel Velez Napa
Walter José Zambrano Zambrano
TUTOR: Ing. Juan Pablo Vera Figueroa MSc.

Guayaquil - Ecuador

2024

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

Yo, **Kevin Gabriel Velez Napa** con documento de identificación N° **0958098378** y **Walter José Zambrano Zambrano** con documento de identificación N° **0958928020** 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: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO OPTIMIZADOR DE FUERZA PARA EL LEVANTAMIENTO DE CARGAS PESADAS**, 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.

Guayaquil, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Kevin Gabriel Velez Napa
0958098378



Walter José Zambrano Zambrano
0958928020

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Kevin Gabriel Velez Napa** con documento de identificación N° **0958098378** y **Walter José Zambrano Zambrano** con documento de identificación N° **0958928020** 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.

Guayaquil, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Kevin Gabriel Velez Napa
0958098378



Walter José Zambrano Zambrano
0958928020

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Juan Pablo Vera Figueroa**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE EXOESQUELETO OPTIMIZADOR DE FUERZA PARA EL LEVANTAMIENTO DE CARGAS PESADAS**, realizado por **Kevin Gabriel Velez Napa** con documento de identificación N° **0958098378** y **Walter José Zambrano Zambrano** con documento de identificación N° **0958928020** obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 11 de septiembre del año 2024

Atentamente,



Ing. Juan Pablo Vera Figueroa MSc.
0910678614

DEDICATORIA

A mis padres por apoyarme en las muchas veces en las que no podía continuar con mis estudios por remuneración y siempre estuvieron ahí diciéndome que si puedo. A mi abuelita que también me apoyó económicamente en momentos difíciles y espera con ansias que obtenga mi título de ingeniero. A mis amigos con los que inicié la carrera que a pesar de diferencias de edades pudimos ser muy unidos pero por situación externas o por la situación de pandemias nos fuimos distanciando por semestres pero a pesar de eso seguíamos comunicándonos. A mis compañeros de trabajo que me explicaron muchas cosas en mi tiempo como pasante o después como trabajador que a pesar de saber y tener conocimiento aún tenía que aprender mucho más.

Kevin Gabriel Velez Napa

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mis padres y a mis seres queridos que me apoyaron durante esta larga travesía por seguir en esta carrera universitaria y pensar y soñar en las muchas cosas que podría lograr en mi futuro. Agradezco también a los profesores de la universidad por compartir sus conocimientos en su labor como tutores en sus materias, que se aplican fuera de la institución en el mundo laboral. Agradezco también a aquella persona que fue una luz de ayuda y me hizo pensar diferente y conocer un mundo diferente al que pensaba, y a los amigos que he conocido durante mi trayecto en la carrera. De antemano les digo, muchas gracias por todo.

Kevin Gabriel Velez Napa

DEDICATORIA

En primer lugar dedicarle todo esto a Dios que es quien me ha permitido día a día luchar para poder alcanzar este objetivo y que sin Él, nada de esto sería posible. Le dedico también este logro a todos y cada uno de mis familiares que me han apoyado en este largo camino. A mi amada mamá María Zambrano que es quien me dio la posibilidad de empezar la carrera, que me ha visto luchar semestre a semestre, que siempre ha estado dando ánimos para no rendirme y que es uno de los pilares fundamentales en mi vida dandome siempre el empuje que se necesita para seguir adelante. A mi tía Zully Zambrano que también me ha sabido apoyar tanto económica como moralmente, que siempre me ha aconsejado, motivado a seguir superándome y que siempre ha estado al pendiente de mi. A mi tío José Goya que de la misma manera me brindó apoyo económico y compartía conmigo sabios consejos. A mi tía Rocío Zambrano que siempre se ha preocupado por mí y con quien charlaba sobre cómo me iba en la universidad. A mi tío Bolívar quien se preocupaba por mi seguridad al salir de la universidad y a mi hermano Ismael.

Walter José Zambrano Zambrano

AGRADECIMIENTO

Le agradezco infinitamente a Dios por haberme acompañado en este largo camino hacia mi título universitario, dandome siempre la fuerza necesaria para seguir adelante. También estoy muy agradecido con cada uno de los miembros de mi magnífica familia, los cuales me han ayudado a cumplir con este objetivo y que sin ellos nada de esto fuera posible.

Walter José Zambrano Zambrano

RESUMEN

El enfoque de este proyecto es la creación de un exoesqueleto el cual brindará apoyo a los usuarios en trabajos que requieran del uso de la fuerza. Para la implementación del prototipo de exoesqueleto se empezará con la identificación del problema el cual se tratará. De igual manera se debe establecer las funciones que debe cumplir el exoesqueleto y sus especificaciones técnicas. Luego de esto, se procede a diseñar el modelo 3D haciendo uso del software Inventor. Posteriormente se hará la elección de los componentes adecuados para la construcción del prototipo. Se optó por la selección de sensores EMG, actuadores lineales eléctricos, tarjeta arduino y la estructura que será hecha de acero. En el siguiente paso se realiza el mecanizado de las platinas de acero con el fin de obtener la forma previamente diseñada. Se montan las piezas, componentes y se integran los actuadores, sensores, sistema de control. Por último, se crea la programación que será la encargada de controlar los actuadores.

Una vez se haya culminado con la implementación del exoesqueleto, se realizan las debidas pruebas y se evalua el incremento de la capacidad de levantamiento de cargas pesadas.

Palabras claves: Exoesqueleto, sensores EMG, actuadores lineales eléctricos, tarjeta arduino, programación.

ABSTRACT

The focus of this project is the creation of an exoskeleton that will provide support to users in tasks that require the use of strength. For the implementation of the exoskeleton prototype, the process begins with identifying the problem to be addressed. Similarly, the functions that the exoskeleton must perform and its technical specifications need to be established. After this, the 3D model is designed using Inventor software. Subsequently, the appropriate components for the prototype's construction are selected. The chosen components include EMG sensors, electric linear actuators, an Arduino board, and a structure made of steel. In the next step, the steel plates are machined to obtain the previously designed shape. The pieces and components are then assembled, and the actuators, sensors, and control system are integrated. Finally, the programming responsible for controlling the actuators is created.

Once the exoskeleton implementation is complete, the necessary tests are conducted to evaluate the increase in the capacity for lifting heavy loads.

Keywords: Exoskeleton, EMG sensors, linear electric actuators, Arduino board, programming.

ÍNDICE

I.	Introducción	1
II.	Problema	2
III.	Justificación	3
IV.	Objetivos	4
IV-A.	Objetivo general	4
IV-B.	Objetivos específicos	4
V.	Matriz de objetivos	5
VI.	Fundamentos Teóricos	6
VI-A.	Exoesqueleto	6
VI-A1.	Extremidades superiores	6
VI-A2.	Torso del exoesqueleto	7
VI-A3.	Biomecánica del codo	7
VI-A4.	Biomecánica del hombro	9
VI-B.	Sistema mecánico	11
VI-C.	Sistema electrónico	11
VI-D.	Sistema de control y retroalimentación	11
VI-E.	Fuente de alimentación	11
VI-F.	Actuador lineal eléctrico	12
VI-G.	Arduino	13
VI-H.	Estructura de acero	13
VI-H1.	Tipos de Acero para la Implementación de un Exoesqueleto	14
VI-H2.	Acero de transmisión	16
VI-I.	Sensores musculares	16
VI-J.	Rulimanes	17
VI-K.	Autodesk Inventor	17
VI-L.	Rótula	18
VI-L1.	Rótula de dirección	19
VI-M.	Soldadura por arco eléctrico	19
VI-N.	Electrodo 7018	20
VII.	Marco Metodológico	22
VII-A.	Introducción a la metodología	22
VII-B.	Etapa de conceptualización	22
VII-C.	Elección de materiales y componentes	22
VII-D.	Diseño y modelado	23
VII-E.	Análisis de esfuerzos	24
VII-F.	Fabricación del prototipo	28
VII-F1.	Herramientas a usar para el mecanizado	28
VII-F2.	Mecanizado de las platinas de acero	29
VII-F3.	Soldadura	29
VII-G.	Desarrollo del software de control	30
VII-H.	Diseño electrónico	31
VII-H1.	Integración de componentes	32

VIII. Resultados	33
IX. Cronograma	34
X. Presupuesto	35
XI. Conclusiones	36
XII. Recomendaciones	37
Referencias	38
Anexo A: Planos	40
Anexo B: Mecanizado y ensamblado de la estructura	48

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Ángulos articulares máximos del hombro	2
2.	Exoesqueleto de soporte	6
3.	Extremidades superiores de un exoesqueleto	7
4.	Fuente de alimentación	12
5.	Actuador lineal eléctrico	12
6.	Tarjeta Arduino	13
7.	Platinas de acero	14
8.	Sensor EMG	16
9.	Ruliman	17
10.	Análisis y simulación en Autodesk Inventor	18
11.	Rótulas de dirección	19
12.	Soldadura por arco	20
13.	Electrodo 7018	21
14.	Abrazaderas de palanca	23
15.	Vista explosionada del exoesqueleto	24
16.	Modelado 3D de partes del exoesqueleto	24
17.	Análisis de esfuerzos	25
18.	Análisis de esfuerzos	25
19.	Análisis de esfuerzos	25
20.	Análisis de esfuerzos de la estructura	25
21.	Análisis de esfuerzos	26
22.	Análisis de esfuerzos	26
23.	Análisis de esfuerzos	27
24.	Platinas post mecanizado	29
25.	Platinas post soldadura	30
26.	Código	31
27.	Código	31
28.	Lámina acotada	40
29.	Lámina acotada	41
30.	Diseño final del exoesqueleto	42
31.	Lámina de como se conforma parte de la estructura	43
32.	Lámina acotada de la estructura del pecho	44
33.	Lámina acotada	45
34.	Lámina acotada del exoesqueleto a color	46
35.	Piezas variadas a usar	47
36.	Estructura en proceso de mecanizado	48
37.	Torneado de una pieza	48
38.	Colocación de abrazadera de palanca	49
39.	Colocación de abrazadera de rulimanes	50
40.	Estructura en proceso de ensamblaje	51
41.	Estructura en proceso de ensamblaje	51
42.	Estructura mecánica ensamblada	52
43.	Estructura mecánica ensamblada	53
44.	Usuario con la estructura mecánica	54
45.	Usuario con la estructura mecánica	55

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Matriz de objetivos específicos	5
II.	Biomecánica del codo	8
III.	Biomecánica del hombro	10
IV.	Tipos de aceros inoxidables	15
V.	Herramientas para el mecanizado	28
VI.	Cronograma para la implementación del trabajo de titulación.	34
VII.	Presupuesto para la implementación del trabajo de titulación	35

I. INTRODUCCIÓN

El avance en la tecnología de los exoesqueletos ha creado nuevas oportunidades en el campo de la asistencia robótica, particularmente en sectores industriales y médicos. Un exoesqueleto optimizador de fuerza es un dispositivo mecánico diseñado para complementar la fuerza humana, ofreciendo soporte adicional en actividades que demandan un esfuerzo físico significativo. Esta tecnología tiene la capacidad de minimizar la fatiga, incrementar la capacidad de levantar cargas y reducir el riesgo de lesiones en usuarios que se dedican a levantar peso de forma repetitiva o a realizar tareas físicamente demandantes.

En este proyecto de tesis, se propone la implementación de un exoesqueleto optimizador de fuerza, centrado específicamente en mejorar la capacidad para levantar y sostener cargas. La estructura del exoesqueleto se construye utilizando platinas de acero mecanizadas, elegidas por su alta resistencia y durabilidad, lo que asegura un soporte sólido y confiable para el usuario. El diseño incluye actuadores lineales eléctricos que permiten el movimiento asistido en las articulaciones, proporcionando la fuerza requerida para llevar a cabo tareas de levantamiento y soporte. Estos actuadores son controlados por una placa Arduino UNO, que funciona como el núcleo del sistema, gestionando las señales de entrada y salida necesarias para el funcionamiento eficiente del exoesqueleto. Además, se integran sensores EMG (Electromiografía) para captar las señales musculares del usuario, lo que permite al sistema detectar la intención de movimiento y ajustar la asistencia de los actuadores en tiempo real.

En resumen, este proyecto tiene como objetivo no solo la creación de un prototipo operativo de un exoesqueleto optimizador de fuerza, sino también explorar y validar la integración eficiente de tecnologías de sensado y control, con el fin de mejorar la asistencia física en aplicaciones reales.

II. PROBLEMA

El personal de las grandes y pequeñas industrias corre el riesgo de sufrir lesiones musculares por esfuerzo debido a las exigentes demandas físicas de su trabajo. Algunas de las lesiones más comunes incluyen esguinces, distensiones y desgarros musculares [1]. Las cargas físicas excesivas pueden generar tensión muscular y aumentar el riesgo de lesiones musculares.

Frecuentemente, unas de las lesiones que se presentan a menudo en el entorno laboral son las lesiones por levantamiento de objetos pesados. Este tipo de accidente ocurre cuando los trabajadores levantan, transportan o manipulan objetos pesados sin utilizar técnicas adecuadas de levantamiento o sin equipo de asistencia [2].

Asimismo, se encuentran las lesiones por esfuerzo físico prolongado las cuales se provocan por el uso excesivo de fuerza durante períodos prolongados. Esto puede provocar fatiga muscular y agotamiento, lo que aumenta el riesgo de accidentes laborales. Los trabajadores pueden sufrir lesiones musculares, calambres, desgarros o caídas debido a la falta de control y coordinación [3].

Por último, tenemos los atrapamientos y aplastamientos, esto se da si los trabajadores aplican fuerza inadecuada al operar maquinaria o equipos. Estos accidentes pueden resultar en lesiones graves, amputaciones o incluso la pérdida de vidas. También pueden sufrir lesiones de la médula espinal o lesiones cerebrales traumáticas.

Existen herramientas que resultan incómodas llevar por el peso y conlleva algún tipo de fatiga muscular, en ciertos casos, llegando a convertirse en alguna fuerza mal usada, esto puede hacer que el tejido muscular puede llegar a desgarrarse y provocar dolor [4]

La repetición constante de movimientos puede contribuir al síndrome del esfuerzo repetitivo, resultando en daños musculares crónicos. Asimismo, la falta de pausas adecuadas para la recuperación puede aumentar la fatiga muscular y el riesgo de lesiones.

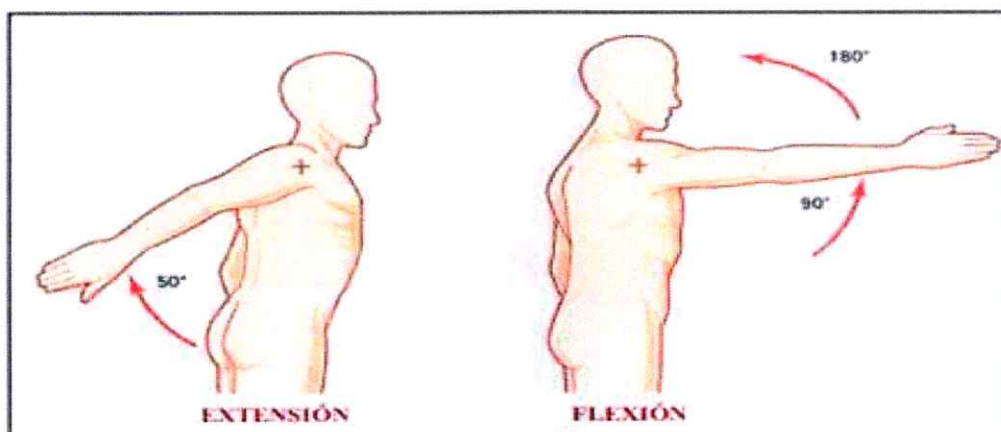


Figura 1: Ángulos articulares máximos del hombro
Fuente: [5]

III. JUSTIFICACIÓN

El uso de tecnología avanzada en el ámbito de la seguridad industrial se ha vuelto cada vez más crucial. Un exoesqueleto es un dispositivo tecnológico diseñado para ayudar a los usuarios a realizar tareas difíciles y que requieran un gran esfuerzo de manera más segura y eficiente [2]. En esta justificación, se mantendrán los argumentos clave para respaldar la implementación de un exoesqueleto en las operaciones industriales que lo requieran [6].

La automatización de los procesos industriales ha experimentado un crecimiento significativo en las últimas décadas, ya que ofrecen ventajas en términos de eficiencia, precisión y seguridad. En este contexto, los exoesqueletos juegan un papel fundamental como herramientas versátiles capaces de realizar una amplia gama de tareas en entornos industriales. Esta tesis se centra en el diseño y control de un exoesqueleto para aplicaciones industriales con el objetivo de abordar los desafíos actuales y contribuir al avance de esta tecnología [7].

La justificación para llevar a cabo esta investigación se basa en ciertos puntos como lo son la seguridad y reducción de riesgos. Esto porque al automatizar tareas que implican condiciones peligrosas o entornos hostiles, se puede reducir los riesgos asociados a la seguridad de los trabajadores.

También tomamos en cuenta la optimización de la precisión y calidad ya que los exoesqueletos son capaces de realizar movimientos precisos y repetibles, lo que resulta fundamental en aplicaciones que requieren altos niveles de precisión y calidad. Al diseñar un exoesqueleto con capacidades de control avanzadas, se busca optimizar la precisión y reducir los errores humanos asociados a tareas delicadas.

IV. OBJETIVOS

IV-A. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de exoesqueleto equipado para la asistencia del personal de trabajo en labores de esfuerzo con afinidades de soporte y transporte.

IV-B. Objetivos específicos

- Desarrollar un exoesqueleto ergonómico que permita la reducción de tiempos en actividades y aumente la capacidad de levantamiento de peso.
- Implementar el sistema de control de los actuadores lineales eléctricos haciendo uso de un sistema embebido.
- Verificar cuanta es la capacidad de levantamiento de cargas con y sin el exoesqueleto.

V. MATRIZ DE OBJETIVOS

Tabla I: Matriz de objetivos específicos

Fuente: Autores

Objetivo	Planteamiento	Meta	Indicador
OE. 1	Verificar cuanto es la capacidad de levantamiento de cargas con y sin el exoesqueleto.	Aumentar la capacidad promedio de levantamiento de cargade 15Kg a 40Kg.	Se puede evaluar mediante el levantamiento de pesas. El usuario levanta el peso propuesto usando un exoesqueleto mientras que sin usarlo,no podrá alcanzar la meta propuesta.
OE. 2	Desarrollar un exoesqueleto ergonómico que permita la reducción de tiempos en actividades y aumente la capacidad de levantamiento de peso.	Disminuir los tiempos que se requieren para realizar actividades en las que se tiene que alzar objetos pesados en un 10 %.	El usuario realiza el levantamiento en un tiempo menor al que le tomaba sin el exoesqueleto.
OE. 3	Implementar el sistema de control de los actuadores lineales eléctricos mediante el uso de un sistema embebido.	Lograr una mejora de 15 % en la eficiencia de manipulación de objetos y en la precisión.	Aumento en la precisión y manipulación de objetos pesados.

VI. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

VI-A. Exoesqueleto

El exoesqueleto es una prótesis externa que se coloca sobre el cuerpo del usuario y lo ayuda a realizar diferentes actividades. Los exoesqueletos se clasifican en diversas categorías, según su aplicación y objetivo específico. Algunos exoesqueletos son diseñados para la rehabilitación de miembros superiores o inferiores, mientras que otros son utilizados en entornos industriales para reducir la fatiga y las lesiones de los trabajadores expuestos a movimiento repetitivo y carga excesiva. Los exoesqueletos se los considera dispositivos que son utilizados para aumentar la fuerza, la resistencia del usuario, y mejorar su capacidad de movimiento. Estos sistemas están concebidos para ser utilizados en el cuerpo humano y, por lo general, consisten en componentes mecánicos, actuadores, sensores y dispositivos de control. [8].



Figura 2: Exoesqueleto de soporte

Fuente: [9]

Los exoesqueletos industriales están diseñados para proporcionar soporte lumbar, asistencia en la elevación y otras funciones que mejoran la ergonomía y la seguridad en el lugar de trabajo. El desarrollo de exoesqueletos involucra múltiples disciplinas, incluyendo la ingeniería mecánica, la ingeniería electrónica, la ciencia de materiales y la informática.

VI-A1. Extremidades superiores: Las extremidades superiores de un exoesqueleto juegan un papel crucial en tareas que implican el uso de la fuerza, como levantar, sostener y manipular objetos pesados. Estas guardan una similitud a la apariencia y funcionalidad del brazo de una persona. Estas se diseñan para imitar y potenciar las funciones naturales de los brazos humanos. Las estructuras generalmente incluyen múltiples grados de libertad para permitir movimientos complejos y naturales, semejantes a los del cuerpo humano.

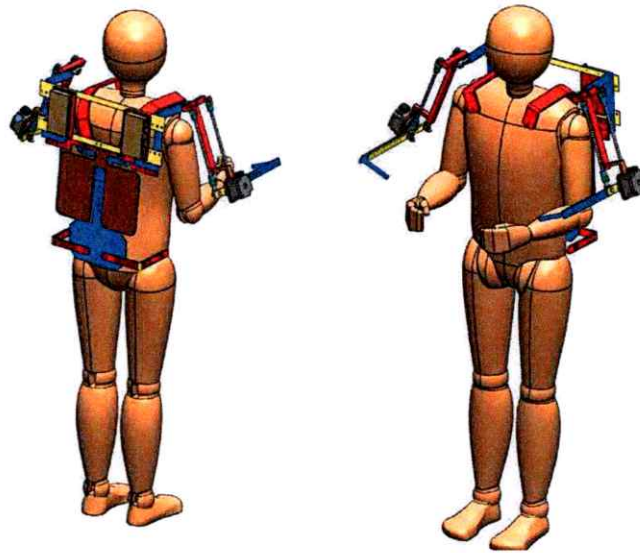


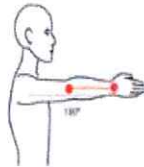



Figura 3: Extremidades superiores de un exoesqueleto
Fuente: [10]

VI-A2. Torso del exoesqueleto: El torso de un exoesqueleto actúa como la estructura central que soporta y conecta las extremidades superiores. También alberga los componentes esenciales para la operación del exoesqueleto, incluyendo sistemas de control, fuente de alimentación y sensores. El torso de un exoesqueleto se diseña para replicar y fortalecer las funciones naturales del tronco humano, ofreciendo soporte estructural y mejorando la estabilidad del usuario. Debe ser capaz de soportar cargas considerables, al mismo tiempo que permite una variedad de movimientos, incluyendo extensión, flexión y rotación.

VI-A3. Biomecánica del codo: Esta analiza la función, estructura y movimiento de esta articulación clave que une el brazo con el antebrazo, facilitando una amplia variedad de actividades humanas. La comprensión de la biomecánica del codo es esencial para crear dispositivos que puedan asistir o replicar los movimientos naturales del codo sin comprometer su funcionalidad o causar daño [11].

Tabla II: Biomecánica del codo



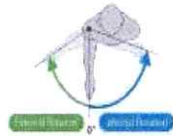
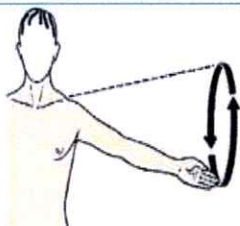
Fuente: Autores

MOVIMIENTO	CONCEPTO	EJEMPLOS
Extensión	Aumenta el ángulo entre el brazo y el antebrazo, alejando la mano del hombro.	
Flexión	Disminuye el ángulo entre el brazo y el antebrazo, acercando la mano al hombro.	
Pronación	Gira el antebrazo de manera que la palma de la mano quede hacia abajo.	
Supinación	Gira el antebrazo para que la palma de la mano quede hacia arriba.	

VI-A4. Biomecánica del hombro: La biomecánica del hombro es una parte fundamental en el estudio del movimiento humano, ya que esta articulación facilita una gran variedad de movimientos en múltiples direcciones, siendo crucial para numerosas actividades cotidianas. El hombro permite una gran amplitud de movimientos, como la flexión y extensión (movimiento hacia adelante y hacia atrás del brazo), la abducción y aducción (movimiento lateral del brazo hacia afuera y hacia adentro del cuerpo), la rotación interna y externa (movimiento de rotación del brazo hacia adentro y hacia afuera) y la circunducción (movimiento circular del brazo que combina flexión, extensión, abducción y aducción) [11].

Tabla III: Biomecánica del hombro

Fuente: Autores

MOVIMIENTO	CONCEPTO	EJEMPLOS
Abducción	Describe el movimiento de una extremidad o estructura hacia fuera, alejándose del plano medio del cuerpo.	
Aducción	Movimiento anatómico que acerca una extremidad o estructura hacia el plano medio del cuerpo, es decir, hacia la línea central del organismo.	
Rotación	Movimiento en el cual una estructura, como un hueso o una extremidad, gira alrededor de un eje central.	
Circunducción	Movimiento en el cual una extremidad o parte del cuerpo realiza un recorrido en forma de círculo, combinando los movimientos de flexión, extensión, abducción y aducción.	

VI-B. Sistema mecánico

El sistema mecánico incluye una base o estructura que ofrece soporte y estabilidad a todos los componentes del conjunto. Estos diseños de estructura tienen la finalidad de que en cierta forma rodee el brazo para que pueda brindar asistencia al mismo. Comúnmente se usan materiales livianos pero resistentes para que, de esta forma, el exoesqueleto no añada una carga elevada al usuario. Es por eso que están diseñados para ser cómodos y ergonómicos, minimizando el estrés físico y proporcionando un ajuste adecuado para el usuario. Esto incluye acolchado, correas ajustables y otras características para reducir la fatiga y el malestar durante el uso prolongado. Las articulaciones que son los puntos de unión entre los diferentes eslabones del exoesqueleto. Estas articulaciones facilitan el movimiento del brazo en múltiples direcciones y a lo largo de diferentes ejes. Los actuadores, que son los motores encargados de accionar las articulaciones, permiten el desplazamiento de los eslabones. Estos pueden ser eléctricos, hidráulicos o neumáticos, dependiendo del tipo de exoesqueleto y sus requerimientos de potencia y precisión [12]. Los eslabones son los segmentos que forman parte del exoesqueleto y están unidos por articulaciones. Pueden tener diferentes longitudes y formas, lo cual determina el alcance y la capacidad de movimiento del brazo. Los mecanismos de limitación de movimiento son dispositivos diseñados para restringir el rango de desplazamiento en direcciones específicas.

VI-C. Sistema electrónico

El sistema electrónico consta de un controlador el cual es el cerebro del exoesqueleto y puede consistir en un microcontrolador o un sistema embebido. El controlador ejecuta el software encargado de coordinar las acciones del exoesqueleto y de procesar los datos provenientes de los sensores. Puede incluir algoritmos de control, lógica de programación, comunicación con otros dispositivos y sistemas [13]. En este proyecto se utilizarán actuadores lineales eléctricos. Este actuador utiliza un motor eléctrico para convertir la energía eléctrica en movimiento lineal. Puede tener diversas configuraciones, como motor de corriente continua (DC) o motor paso a paso. Los actuadores lineales eléctricos son adecuados para aplicaciones que requieren precisión y control fino del movimiento. Las tarjetas y placas de circuito son componentes que contienen los circuitos electrónicos y las conexiones esenciales para facilitar la transmisión de información y señales entre los diferentes elementos del sistema electrónico. La unidad de potencia que es aquella que proporciona la energía necesaria para alimentar los motores del exoesqueleto se logra mediante algoritmos y software específicos. Estos algoritmos permiten coordinar y sincronizar los movimientos de las articulaciones y los actuadores del exoesqueleto, siguiendo comandos proporcionados por el usuario o mediante un control automático. La programación del exoesqueleto se basa en modelos biomecánicos y algoritmos de control, que optimizan el rendimiento y la seguridad del dispositivo y otros componentes electrónicos.

VI-D. Sistema de control y retroalimentación

Los actuadores lineales eléctricos generalmente están equipados con sistemas de control y retroalimentación que permiten regular con precisión su movimiento y posición. Estos sistemas pueden incorporar sensores de posición, codificadores o potenciómetros que suministran información sobre la ubicación actual del actuador. Con esta retroalimentación, es posible ajustar y controlar el movimiento del actuador según sea necesario [14]. La programación del exoesqueleto se basa en modelos biomecánicos y algoritmos de control, que optimizan el rendimiento y la seguridad del dispositivo, adaptando el dispositivo a las necesidades cambiantes del usuario.

VI-E. Fuente de alimentación

A este exoesqueleto se le suministra energía eléctrica mediante una fuente de alimentación basada en el modelo de un motor de imanes permanentes. Estos son una clase de motores eléctricos que utilizan imanes permanentes para generar el campo magnético necesario para su funcionamiento. Estos motores son conocidos por su alta eficiencia, densidad de potencia y control preciso, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un rendimiento óptimo en términos de tamaño y peso, como los exoesqueletos. El principio de operación de un motor de imanes permanentes se basa en la interacción entre el campo magnético creado por los imanes y el campo magnético generado por la corriente eléctrica en los devanados del estator [15].

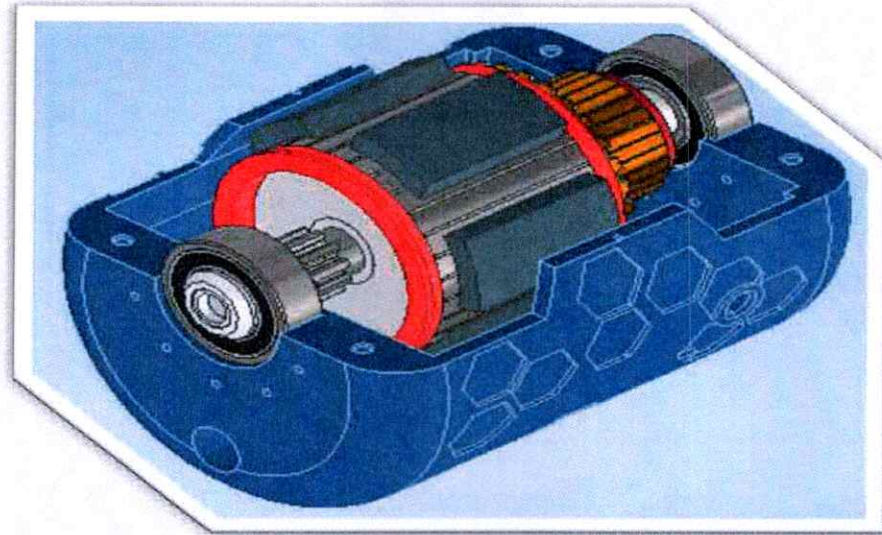


Figura 4: Fuente de alimentación
Fuente: Autores

VI-F. Actuador lineal eléctrico

Un actuador lineal eléctrico es un dispositivo que convierte energía eléctrica en movimiento lineal. Este tipo de actuador utiliza un motor eléctrico para generar movimiento a lo largo de una línea recta, a diferencia de los motores rotativos que generan movimiento circular. Los actuadores lineales eléctricos son utilizados en una variedad de aplicaciones, incluyendo automatización industrial, equipos médicos, sistemas de transporte y en la robótica, debido a su precisión y control en el posicionamiento. Su funcionamiento se basa en la conversión de la rotación del motor en un movimiento lineal, generalmente mediante el uso de tornillos, engranajes o correas [16].

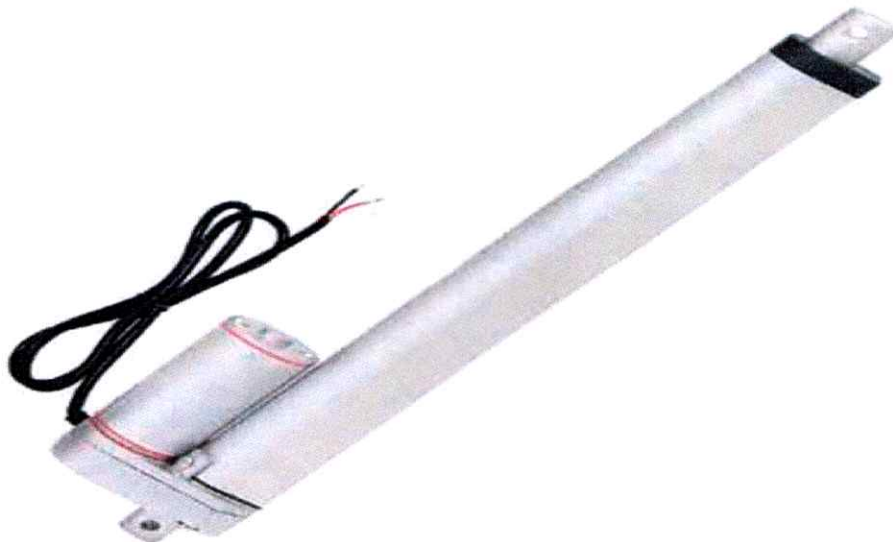


Figura 5: Actuador lineal eléctrico
Fuente: [17]

Además, los actuadores lineales eléctricos son preferidos en muchas aplicaciones debido a su eficiencia energética y su capacidad para operar en entornos limpios y secos, sin la necesidad de fluidos como el aceite hidráulico o el aire comprimido.

VI-G. Arduino

Arduino es una plataforma de prototipado electrónico de código abierto que se basa en hardware y software de fácil uso. Consiste en una placa de desarrollo equipada con un microcontrolador y un entorno de desarrollo integrado (IDE) que permite la programación a través de un lenguaje derivado de C++. Arduino se utiliza ampliamente en proyectos de electrónica y robótica debido a su accesibilidad y flexibilidad, permitiendo a los usuarios crear sistemas interactivos que pueden recibir entradas de una variedad de sensores y controlar una diversidad de actuadores y dispositivos [18].

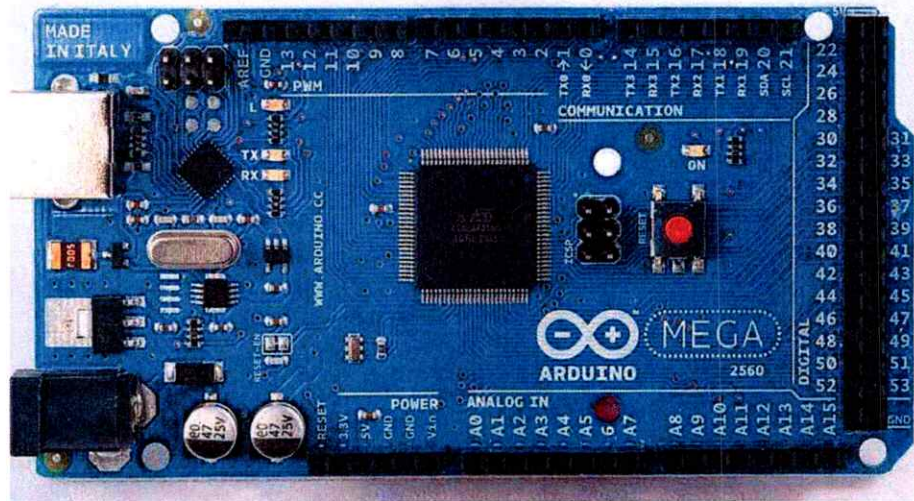


Figura 6: Tarjeta Arduino
Fuente: [19]

Su diseño modular y su amplia comunidad de usuarios facilitan el aprendizaje y la implementación rápida de prototipos, siendo una herramienta fundamental en la educación, investigación y desarrollo de tecnología.

VI-H. Estructura de acero

Las platinas de acero son elementos estructurales planos y rectangulares, hechos de acero, que se utilizan en la construcción y fabricación de diversas estructuras debido a su resistencia y durabilidad. En el contexto de la estructura de un exoesqueleto, las platinas de acero juegan un papel crucial al proporcionar soporte y rigidez al dispositivo. Estas platinas son seleccionadas por su capacidad para soportar cargas y distribuir tensiones de manera uniforme, lo cual es esencial para garantizar la seguridad y eficacia del exoesqueleto. Además, el acero utilizado en estas platinas puede ser tratado para mejorar sus propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, asegurando un rendimiento óptimo en diversas condiciones operativas [20].



Figura 7: Platinas de acero
Fuente: [21]

VI-HI. Tipos de Acero para la Implementación de un Exoesqueleto:

■ Acero Inoxidable

La Serie 300 es el tipo más común de acero inoxidable, conocido por su alta resistencia a la corrosión, buena tenacidad y facilidad para ser trabajado en frío, con ejemplos como el acero inoxidable 304 y 316. Por otro lado, la Serie 400 ofrece mayor dureza y resistencia al desgaste en comparación con los austeníticos, aunque con menor resistencia a la corrosión, como es el caso del acero inoxidable 410.

Tabla IV: Tipos de aceros inoxidable

Fuente: [22]

AISI Número	C	Mn Max	P Max	Cr	Ni	Otros
Aceros Austeníticos						
201	0.15 max.	5.5/7.5	0.060	16.00/18.00	3.50/5.50	N 0.25 max.
202	0.15 max.	7.5/10.0	0.060	17.00/19.00	4.00/6.00	N 0.25 max.
301	0.15 max.	2.00	0.045	16.00/18.00	6.00/8.00	.....
302	0.15 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	8.00/10.00	.....
302 B	0.15 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	8.00/10.00	Si 2.00-3.00
303	0.15 max.	2.00	0.200	17.00/19.00	8.00/10.00	Mo, Zr 0.60 max.
303 Se	0.15 max.	2.00	0.200	17.00/19.00	8.00/10.00	Se 0.15 min.
304	0.08 max.	2.00	0.045	18.00/20.00	8.00/12.00	.....
304 L	0.03 max.	2.00	0.045	38.00/20.00	8.00/12.00	.....
305	0.12 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	10.00/13.00	.....
308	0.08 max.	2.00	0.045	19.00/21.00	10.00/12.00	.....
309	0.20 max.	2.00	0.045	22.00/24.00	12.00/15.00	.....
309 S	0.08 max.	2.00	0.045	22.00/24.00	12.00/15.00	Si 1.50 max.
310	0.25 max.	2.00	0.045	24.00/26.00	19.00/22.00	Si 1.50 max.
310 S	0.08 max.	2.00	0.045	24.00/26.00	19.00/22.00	Si 1.50-3.00
314	0.25 max.	2.00	0.045	23.00/26.00	19.00/22.00	Mo 2.00-3.00
316	0.08 max.	2.00	0.045	16.00/18.00	10.00/14.00	Mo 2.00-3.00
316 L	0.03 max.	2.00	0.045	16.00/18.00	10.00/14.00	Mo 3.00-4.00
317	0.08 max.	2.00	0.045	18.00/20.00	11.00/15.00	Ti 5 x C min.
321	0.08 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	9.00/12.00	Cb-Ta 10 x C min.
347	0.08 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	9.00/13.00	Ta 0.10 max.
348	0.08 max.	2.00	0.045	17.00/19.00	9.00/13.00	Cb-Ta 10 x C min.
Aceros Martensíticos						
403	0.15 max.	1.00	0.040	11.50/13.00	.....	Si 0.50 max.
410	0.15 max.	1.00	0.040	11.50/13.50	.....	.....
414	0.15 max.	1.00	0.040	11.50/13.50	1.25/2.50	.....
416	0.15 max.	1.25	0.060	12.00/14.00	.....	Mo, Zr 0.60 max.
416 Se	0.15 max.	1.25	0.060	12.00/14.00	.....	Se 0.15 min.
420	0.15 min.	1.00	0.040	12.00/14.00	.....	.....
431	0.20 max.	1.00	0.040	15.00/17.00	1.25/2.50	.....
440 A	0.60/0.75	1.00	0.040	16.00/18.00	.....	Mo 0.75 max.
Aceros Ferríticos						
405	0.08 max.	1.00	0.040	11.50/14.50	.....	Al 0.10-0.30
430	0.12 max.	1.00	0.040	14.00/18.00	.....	.....
430 F	0.12 max.	1.25	0.060	14.00/18.00	.....	Mo, Zr 0.60 max.
430 Fse	0.12 max.	1.25	0.060	14.00/18.00	.....	Se 0.15 min.
446	0.20 max.	1.50	0.040	23.00/27.00	.....	N 0.25 max.

■ Acero al Carbono

El Acero de baja aleación de alta resistencia proporciona una excelente relación resistencia-peso, lo que resulta beneficioso para reducir el peso total del exoesqueleto sin sacrificar la durabilidad. En contraste, el acero al carbono medio, que contiene entre 0.3 % y 0.6 % de carbono, ofrece un buen equilibrio entre dureza y ductilidad, siendo adecuado para componentes que requieren resistencia mecánica sin volverse demasiado frágiles.

■ Acero Herramienta

El Acero D2 es reconocido por su alta resistencia al desgaste, lo que lo hace ideal para componentes que deben soportar cargas elevadas y movimientos repetitivos. Por otro lado, el acero O1 es un acero para herramientas que destaca por su buena tenacidad, siendo utilizado en aplicaciones que requieren tanto precisión como durabilidad.

- Acero de Aleación

El Acero 4140, que contiene cromo y molibdeno, ofrece alta resistencia, dureza y buena tenacidad, siendo ideal para componentes sometidos a grandes cargas y esfuerzos. Mientras tanto, el acero 4340, una aleación de níquel-cromo-molibdeno, destaca por su alta resistencia a la tracción y excelente tenacidad, lo que lo hace adecuado para piezas críticas de un exoesqueleto.

VI-H2. Acero de transmisión: El acero de transmisión es un acero formulado para aplicaciones que demandan gran resistencia y durabilidad, siendo ideal para componentes que enfrentan cargas altas y desgaste continuo, como ejes, engranajes y otros elementos de transmisión. Este tipo de acero suele estar aleado con elementos como cromo, molibdeno y níquel para optimizar sus características mecánicas.

El acero de transmisión se distingue por su elevada resistencia a la tracción, dureza y capacidad para resistir el desgaste. Estas propiedades son cruciales para componentes que enfrentan condiciones de funcionamiento rigurosas y repetitivas [23].

VI-I. Sensores musculares

Los sensores de electromiografía son ejemplos de dispositivos que pueden medir la actividad eléctrica generada por los músculos durante las contracciones utilizando sensores musculares. Los sensores son cruciales en diversas áreas, como la en la biomédicina, en la rehabilitación, en las interfaces hombre-máquina y en el desarrollo de exoesqueletos. La electromiografía es un método que mide los potenciales eléctricos generados por las células musculares cuando se activan eléctricamente. Los datos obtenidos a través de sensores EMG pueden proporcionar información sobre la fuerza muscular, el estado de fatiga y el control neuromuscular.



Figura 8: Sensor EMG
Fuente: [24]

Los sensores musculares, especialmente los sensores emg, son esenciales para el diseño y manipulación de exoesqueletos. Su capacidad para detectar y medir la actividad muscular permite el desarrollo de sistemas de asistencia que se adaptan intuitivamente a las necesidades del usuario, lo que resulta en una mejora de la movilidad y la calidad de vida.

VI-J. Rulimanes

Los rulimanes, también conocidos como rodamientos, son componentes mecánicos esenciales en numerosas aplicaciones, incluidos los exoesqueletos. Está diseñado para no tener fricción y soportar cargas radiales y axiales. En la creación del exoesqueleto, los rulimanes juegan un papel muy importante ya que facilitan el movimiento de las articulaciones y otros componentes móviles, contribuyendo a la precisión y eficiencia del dispositivo. Se usan los rulimanes de bolas que son los más comunes y se utilizan tanto para cargas axiales como radiales moderadas.



Figura 9: Ruliman
Fuente: [25]

Los rulimanes son esenciales porque permiten que las articulaciones y otros componentes se desplacen de una manera suave, haciendo así que se reduzca el esfuerzo requerido para mover el exoesqueleto,

VI-K. Autodesk Inventor

Autodesk Inventor es un software de diseño asistido por computadora (CAD) en 3D que se utiliza para crear prototipos digitales de productos. Desarrollado por Autodesk, Inc., Inventor proporciona un conjunto completo de herramientas para el diseño mecánico, la documentación y la simulación de productos, siendo fundamental en la ingeniería mecánica y el desarrollo de productos complejos como exoesqueletos. Su entorno de diseño paramétrico permite a los ingenieros y diseñadores crear modelos precisos y eficientes, facilitando el análisis y la optimización de cada componente y ensamblaje. El modelado paramétrico en Autodesk Inventor permite a los usuarios definir y modificar las dimensiones y características de un diseño de manera dinámica. Inventor incluye herramientas avanzadas de simulación que permiten realizar análisis de esfuerzos, movimientos y cargas térmicas.

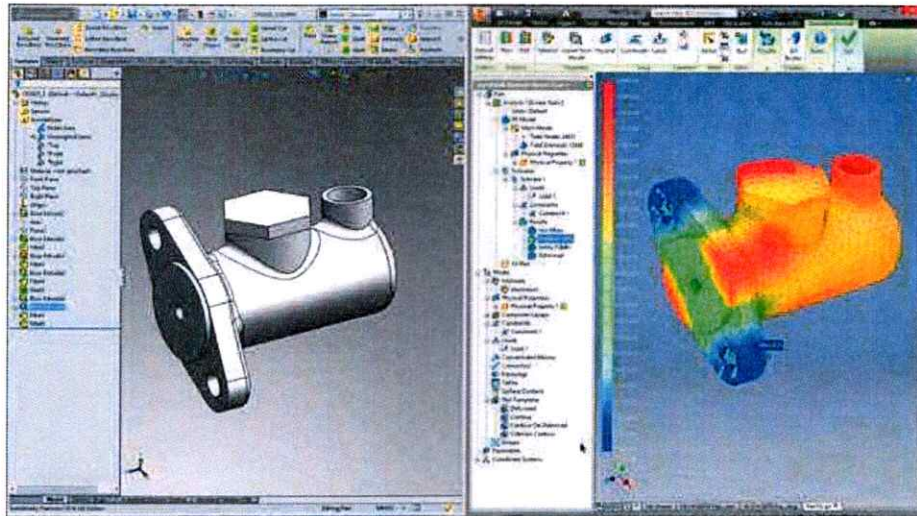


Figura 10: Análisis y simulación en Autodesk Inventor
Fuente: [26]

El uso de Autodesk Inventor en el diseño de exoesqueletos ofrece varias ventajas como lo es la creación rápida de prototipos digitales, la optimización del diseño para minimizar el peso y maximizar la resistencia mediante el uso de las herramientas de análisis y simulación, la generación de planos técnicos detallados que aseguran que cada componente del exoesqueleto sea fabricado con precisión, entre otras [27].

En conclusión, Autodesk Inventor es una herramienta indispensable en el desarrollo de exoesqueletos. Su capacidad para modelar, simular y documentar diseños en 3D permite a los ingenieros y diseñadores crear prototipos precisos y optimizados.

VI-L. Rótula

Las rótulas son articulaciones esféricas las cuales permiten movimientos multidireccionales y son fundamentales para la flexibilidad y la estabilidad de las estructuras en las que se integran. Tienen varias funciones claves principalmente asociadas con la articulación y el movimiento. Primero, facilita la movilidad y la flexibilidad, funcionando como una articulación que posibilita movimientos de rotación y flexión, emulando el funcionamiento de las articulaciones humanas. Esto es crucial para que el usuario pueda realizar movimientos naturales y complejos, como lo es el levantamiento de objetos.

De igual manera, contribuye a la distribución de las cargas y fuerzas de manera uniforme a lo largo del exoesqueleto, disminuyendo la tensión en áreas específicas y aumentando la durabilidad del dispositivo.



Figura 11: Rótulas de dirección
Fuente: [28]

Las rótulas nos aseguran que los movimientos sean precisos y coordinados, lo que es esencial para evitar lesiones y mejorar la eficacia del exoesqueleto.

VI-L1. Rótula de dirección: La rótula de dirección desempeña un papel similar al que tiene en la suspensión y dirección de un vehículo, pero adaptado a la biomecánica del cuerpo humano. Estas rótulas permiten que las articulaciones del exoesqueleto se muevan con la misma flexibilidad que las articulaciones humanas. Esto es crucial para replicar el rango de movimiento natural y garantizar que el usuario pueda realizar movimientos complejos de manera fluida y sin restricciones. Un fallo de la misma daría como resultado el mal funcionamiento del exoesqueleto, comprometiendo la seguridad del usuario. Por ello, las rótulas de dirección están diseñadas para resistir el desgaste y la fatiga [29].

VI-M. Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco eléctrico es un método de unión de metales que emplea una fuente de energía eléctrica para generar un arco entre un electrodo y la pieza a trabajar, fundiendo ambos materiales para crear una unión firme.

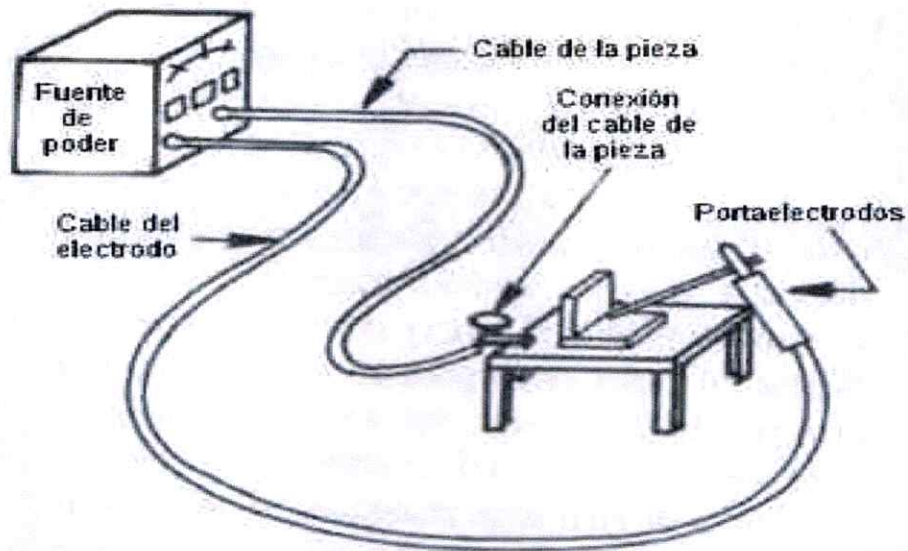


Figura 12: Soldadura por arco
Fuente: [30]

Este proceso se basa en la producción de calor intenso generado por el arco eléctrico, que alcanza temperaturas lo suficientemente altas como para fundir tanto el metal base como el metal de aporte. La soldadura por arco eléctrico es muy utilizada en la industria debido a su versatilidad, eficiencia y capacidad para crear soldaduras robustas y duraderas.

VI-N. Electrodo 7018

El electrodo 7018 es ampliamente utilizado en la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido. Se distingue por su revestimiento de bajo hidrógeno, lo que disminuye el riesgo de formación de grietas por hidrógeno en las soldaduras, haciéndolo especialmente adecuado para soldar aceros de baja aleación y alta resistencia. El 7018 es reconocido por generar un cordón de soldadura suave y limpio, con muy pocas salpicaduras, además de proporcionar una excelente ductilidad y alta resistencia a la tracción.



Figura 13: Electrodo 7018

Fuente: [31]

Este electrodo es clasificado bajo la norma AWS (American Welding Society) como E7018, donde “E” indica que es un electrodo para soldadura, “70” representa la resistencia a la tracción del depósito de soldadura en ksi (70.000 psi), “1” indica que puede ser usado en todas las posiciones, y “8” hace referencia a las características del revestimiento y al tipo de corriente que puede ser utilizada, en este caso corriente alterna (AC) o corriente continua (DC) [32].

VII. MARCO METODOLÓGICO

VII-A. *Introducción a la metodología*

La metodología para este proyecto es un proceso integral y multidisciplinario en el cual se realiza desde una investigación de las necesidades por las cual se realiza la implementación del exoesqueleto hasta la evaluación de los resultados obtenidos del producto final. Primeramente, se realiza una investigación para conocer sobre el problema que se aspira a resolver. Se identificó que el problema es el riesgo de lesiones al que está expuesto el personal encargado de trabajos de fuerza en las empresas.

Seguidamente se realiza una revisión al mercado para así conocer sobre la actualidad de la tecnología que podemos usar para la implementación. Asimismo se revisa literatura sobre exoesqueletos ya existentes para poder realizar un análisis. Se identifican las limitaciones y desafíos técnicos que se presentarán al momento de la implementación. También se identifican posibles problemas que tengan que ver con la comodidad y ajuste del exoesqueleto al cuerpo del usuario, al igual que los obstáculos económicos que podrían presentarse durante la implementación.

Se llegó a la conclusión de que en esta fase del desarrollo del exoesqueleto se establece una base firme para lo que será el desarrollo de este trabajo de titulación.

VII-B. *Etapa de conceptualización*

En esta fase se procederá a definir las especificaciones que tendrá el prototipo, la tecnología a usar y sus limitaciones. Seguidamente se inicia con una conceptualización y una lluvia de ideas sobre el concepto inicial del exoesqueleto. Posteriormente ya teniendo establecido los conceptos iniciales, es crucial definir los requisitos técnicos del exoesqueleto. Esto implica especificar los materiales adecuados que garantizarán durabilidad y ligereza, seleccionar sistemas de control que permitirán la operación precisa y segura del dispositivo, y elegir los actuadores que proporcionarán el movimiento y la fuerza necesarios. Además, se deben considerar aspectos ergonómicos para asegurar que el exoesqueleto sea cómodo y adaptable al cuerpo humano; se establecen los requisitos técnicos, los aspectos ergonómicos y de seguridad.

Se decide que se usará el software de modelado 3D Autodesk Inventor en el proceso de diseñar el exoesqueleto en un entorno virtual, facilitándonos la visualización detallada y la modificación del diseño antes de proceder a la fabricación del prototipo físico.

En esta etapa se comenzó con el desarrollo de ideas y la generación de modelos preliminares, seguido de la definición de requisitos técnicos y el uso de herramientas de modelado y simulación para desarrollar un diseño funcional y seguro.

VII-C. *Elección de materiales y componentes*

Aquí se seleccionaron los materiales y componentes que se consideraron como los adecuados para la construcción del exoesqueleto. Se seleccionan materiales que no solo sean duraderos y ligeros, sino que también ofrezcan la resistencia necesaria para soportar el uso continuo. De igual manera, se seleccionan componentes electrónicos y mecánicos que cumplan con los requisitos técnicos definidos previamente. Estos materiales y componentes deben ser seleccionados no solo por su desempeño, sino también por su disponibilidad. Esto ayuda a minimizar costos y tiempo de producción.

Para la implementación del prototipo se eligen los siguientes materiales y componentes:

- Platinas de acero
- Actuador lineal eléctrico

- Rulimanes
- Arduino
- Sensor EMG
- Abrazaderas de palanca
- Rótulas
- Driver
- Protoboard



Figura 14: Abrazaderas de palanca
Fuente: Autores

VII-D. *Diseño y modelado*

Se opta por la elección del software Autodesk Inventor. Este software de modelado es fundamental para el diseño del exoesqueleto, ya que permite la creación del modelo detallado en un entorno virtual.

Se empezó diseñando la sección de la estructura de los brazos. Esta parte de la estructura cuenta con perforaciones en forma de triángulo como se observa en [29]. Esto es con la finalidad de reducir la cantidad de material a ser usado, por lo tanto, hay reducción en el peso total de la estructura sin comprometer la resistencia.

Se procedió a diseñar la parte de la estructura que va situada en el torso. Esta estructura [33] cuenta con medidas que han sido adaptadas a las dimensiones del usuario. Se realizó un análisis de las necesidades ergonómicas y funcionales, y se tomaron medidas precisas para asegurar que la estructura se ajuste perfectamente.

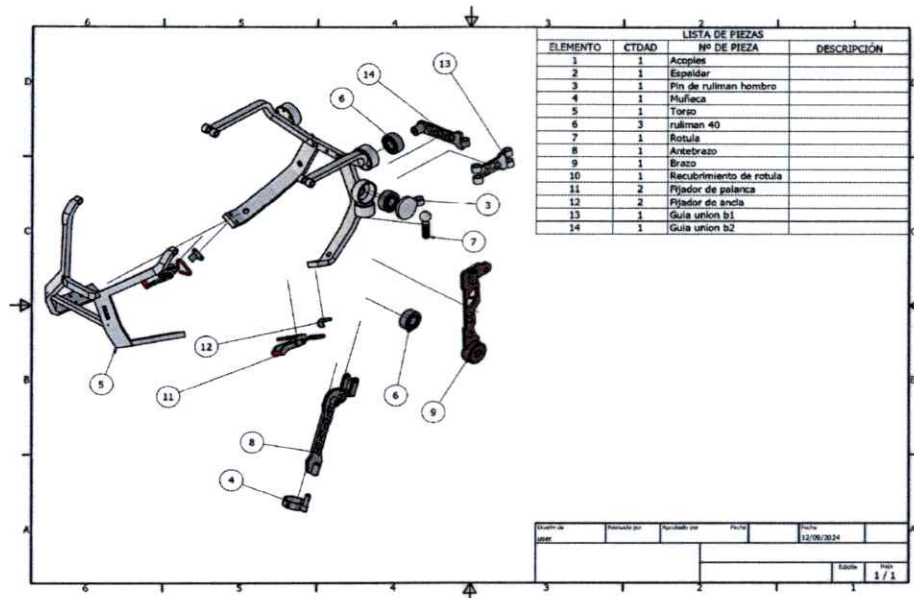


Figura 15: Vista explosionada del exoesqueleto
Fuente: Autores

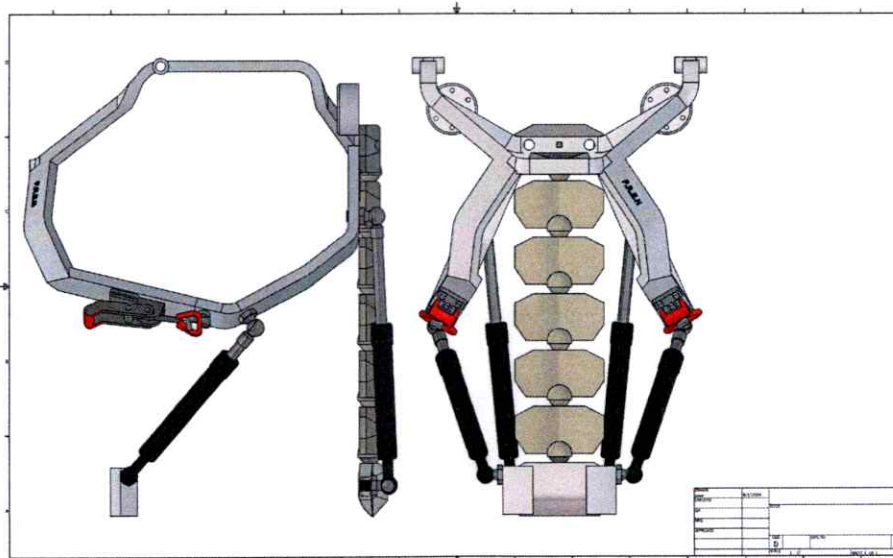


Figura 16: Modelado 3D de partes del exoesqueleto
Fuente: Autores

Resumiendo, al hacer uso del software de modelado Inventor pudimos crear el modelo tridimensional preciso, realizar ajustes rápidos y evaluar la viabilidad del diseño en un entorno virtual, asegurando que el exoesqueleto final sea funcional, seguro y eficiente antes de avanzar a la fase de prototipado y producción.

VII-E. Análisis de esfuerzos

Mediante el software Inventor se realizó el análisis de esfuerzos en los diferentes elementos que conforman el exoesqueleto. Se priorizó la simulación de esfuerzos en aquellas secciones que a juicio del diseñador, son las que

se verían expuestas a los mayores esfuerzos durante el uso del dispositivo. El análisis de esfuerzos es vital para garantizar que la estructura del exoesqueleto soporte las cargas que se le apliquen durante su uso, tales como el peso del usuario, las fuerzas de movimiento y cualquier carga adicional que deba levantar.

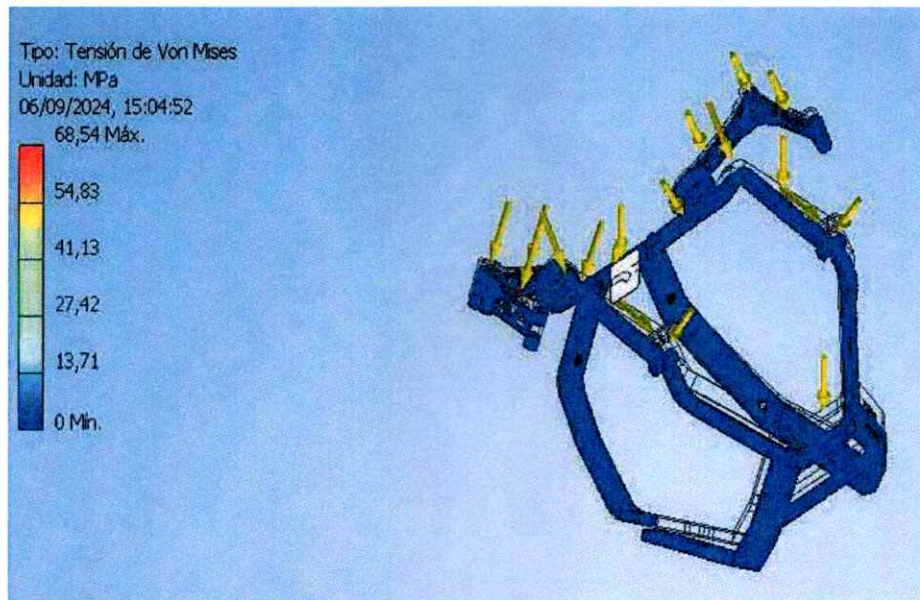


Figura 17: Análisis de esfuerzos
Fuente: Autores

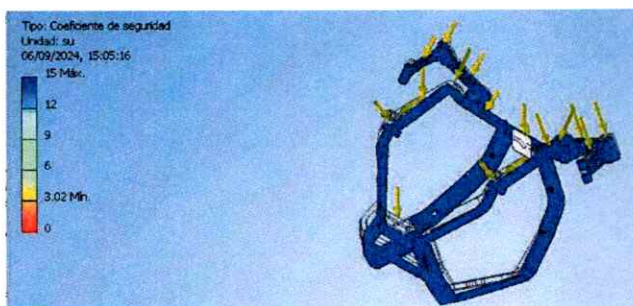


Figura 18: Análisis de esfuerzos

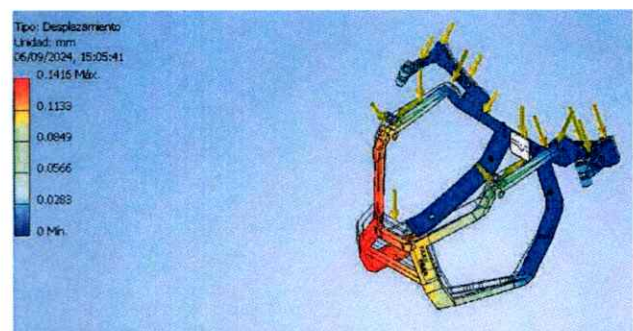


Figura 19: Análisis de esfuerzos

Figura 20: Análisis de esfuerzos de la estructura

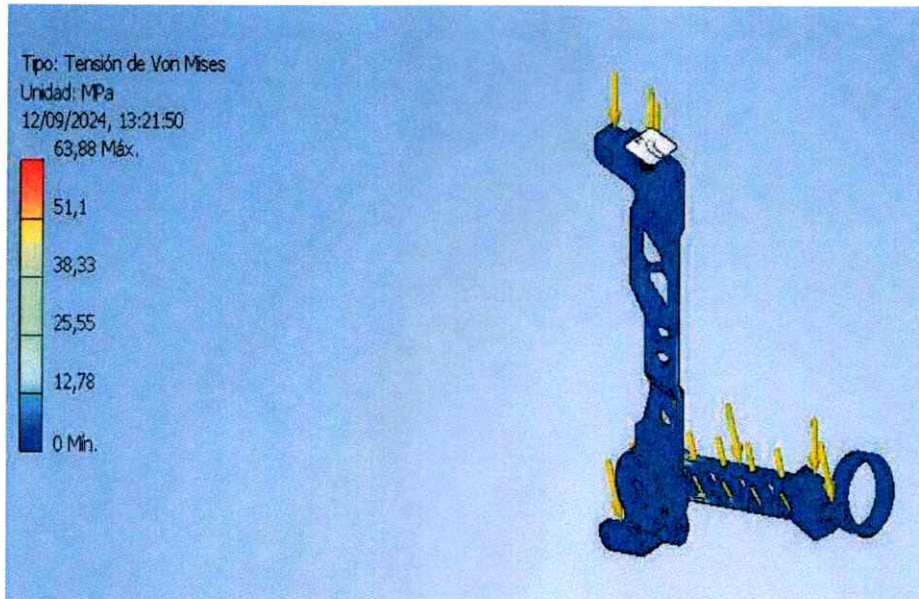


Figura 21: Analisis de esfuerzos
 Fuente: Autores

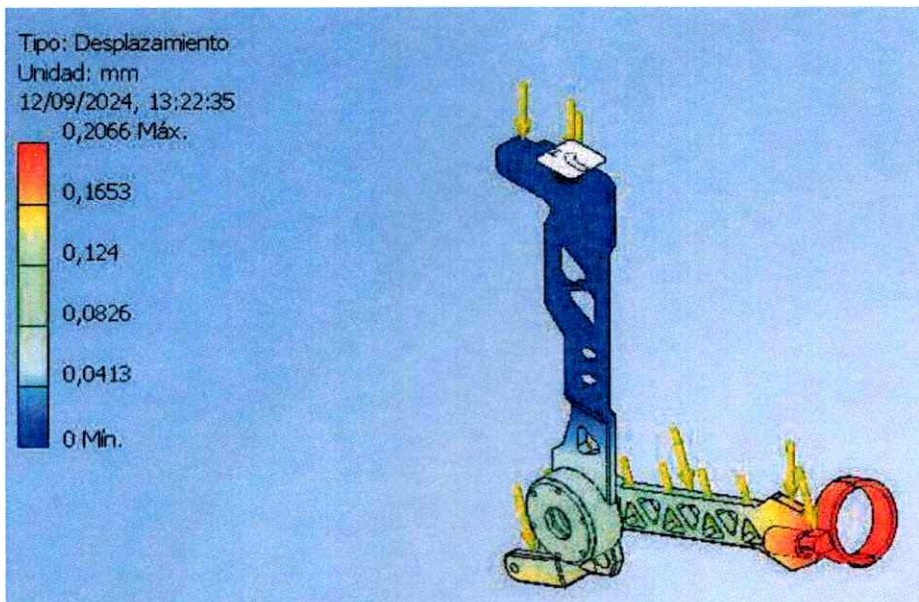


Figura 22: Analisis de esfuerzos
 Fuente: Autores

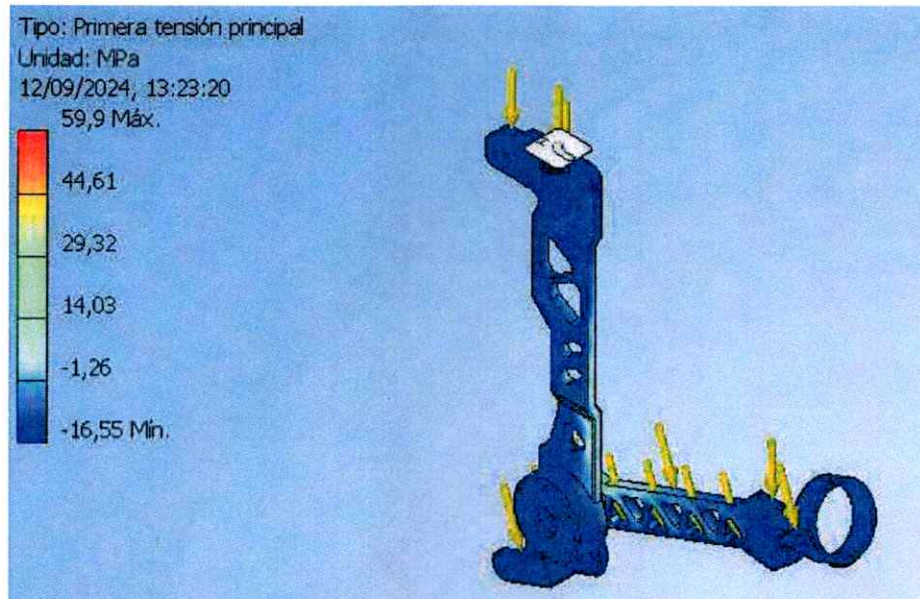


Figura 23: Análisis de esfuerzos
Fuente: Autores

La estructura del exoesqueleto se ha diseñado cuidadosamente utilizando platinas de acero de 6 mm de espesor y 1 pulgada de ancho para asegurar que no se excedan los límites del material. Este espesor y ancho proporcionan una alta resistencia mecánica, garantizando que la estructura pueda soportar las cargas y esfuerzos previstos sin deformaciones permanentes ni fallo estructural. El acero seleccionado ha sido evaluado para asegurar que sus propiedades mecánicas, como su límite elástico y resistencia a la tracción, sean adecuadas para las fuerzas a las que estará sometido el exoesqueleto durante su operación, manteniendo siempre un margen de seguridad adecuado.

VII-F. *Fabricación del prototipo*

VII-F1. *Herramientas a usar para el mecanizado:* Para proceder a realizar el mecanizado se hace la selección de herramientas que nos ayudarán para realizar dicho proceso, las cuales son las siguientes:

Tabla V: Herramientas para el mecanizado

Fuente: Autores

Ítem	Artículo
1	Amoladora
2	Disco abrasivo
3	Disco de corte
4	Disco de zirconio
5	Maquina de soldadura
6	Taladro de pedestal
7	Taladro de mano
8	Brocas
9	Electrodos 7018

VII-F2. Mecanizado de las platinas de acero: Con los materiales seleccionados y el diseño 3D del exoesqueleto completado, se procede a la fase de mecanizado de las platinas de acero. En esta fase se definen las dimensiones exactas de las mismas según el diseño previamente realizado. Se seleccionan las máquinas de corte, fresado y taladrado adecuadas, así como las herramientas específicas, como fresas, brocas y discos de corte.

Luego, se procede a limpiar y preparar las platinas, asegurando que estén libres de óxido, suciedad y otros contaminantes. Se marcan las platinas de acuerdo con el diseño, indicando las áreas que serán cortadas, fresadas o taladradas. Durante el mecanizado de las platinas, se utilizan máquinas de corte, como la cortadora láser, para cortar las platinas a las dimensiones aproximadas requeridas, seguido de un control de calidad para verificar que las piezas cortadas cumplan con las especificaciones dimensionales. Las dimensiones y la precisión del trabajo se controlan utilizando instrumentos de medición como calibradores y micrómetros.

En el tratamiento posterior al mecanizado, se retiran las rebabas y otros residuos para garantizar bordes suaves, limpios, seguros, y se aplican acabados superficiales según sea necesario, como pulido. Por último, se realizan inspecciones detalladas para asegurar que todas las platinas mecanizadas cumplen con las especificaciones dimensionales.

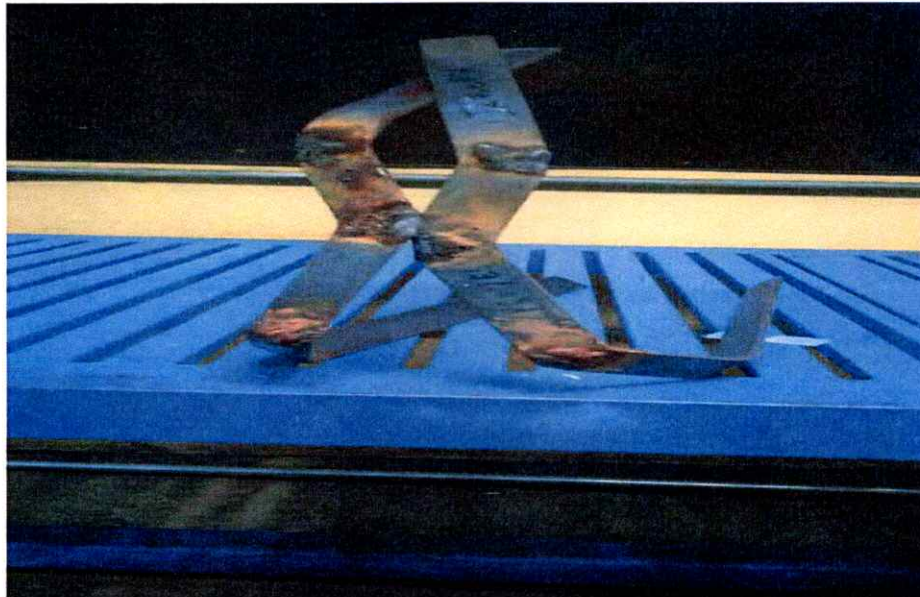


Figura 24: Platinas post mecanizado
Fuente: Autores

VII-F3. Soldadura: Con las platinas de acero mecanizadas y listas para ensamblar, se procede a la fase de soldadura, que es crucial para construir una estructura robusta y funcional del exoesqueleto. Se definen las juntas de soldadura necesarias, especificando los tipos de soldadura a utilizar (como MIG, TIG, o soldadura por arco) y las posiciones de las soldaduras. Se seleccionan los equipos y materiales de soldadura adecuados asegurando que sean compatibles con el tipo de acero.

En la preparación de las platinas para la soldadura se elimina cualquier contaminante de la superficie que pueda afectar la calidad de la soldadura. Se alinean y fijan las platinas en las posiciones correctas utilizando dispositivos de sujeción para asegurar que las piezas permanezcan en su lugar durante el proceso de soldadura.

En el tratamiento posterior a la soldadura, se realizan inspecciones visuales para verificar la integridad y calidad de las soldaduras. Se retiran las escorias y se realiza un desbastado y pulido de las uniones soldadas para asegurar un acabado limpio y estético.



Figura 25: Platinas post soldadura
Fuente: Autores

VII-G. *Desarrollo del software de control*

Se procede a crear el software requerido para controlar los actuadores en función de las señales captadas por los sensores EMG. Este software se codifica en la plataforma Arduino UNO, realizando ajustes en los parámetros de control según sea necesario para maximizar el rendimiento.

```

1  const int sensorPin = A0; // Pin analógico conectado al sensor EMG
2  const int driverPin = 2; // Pin digital conectado al driver
3  const int threshold = 500; // Umbral para detectar la señal EMG (ajustar según necesidad)
4
5  void setup() {
6      pinMode(driverPin, OUTPUT); // Configurar el pin del driver como salida
7      Serial.begin(9600); // Iniciar comunicación serial para monitoreo
8  }
9
10 void loop() {
11     int sensorValue = analogRead(sensorPin); // Leer valor del sensor EMG
12
13     Serial.println(sensorValue); // Imprimir valor del sensor para monitoreo
14
15     // Comparar el valor del sensor con el umbral
16     if (sensorValue > threshold) {
17         digitalWrite(driverPin, HIGH); // Activar el actuador
18     } else {
19         digitalWrite(driverPin, LOW); // Desactivar el actuador
20     }
21
22     delay(100); // Esperar un corto periodo antes de la siguiente lectura
23 }
24

```

Figura 26: Código
Fuente: Autores

VII-H. Diseño electrónico

Se realiza el diseño de las conexiones del sistema electrónico del exoesqueleto haciendo uso del software Tinkercad. El arduino será el encargado de controlar el sistema del exoesqueleto. Para simular el sensor EMG se usó un potenciómetro el cual nos da la capacidad de emular las variaciones en la señal. Todo esto alimentado por una fuente de 9V.

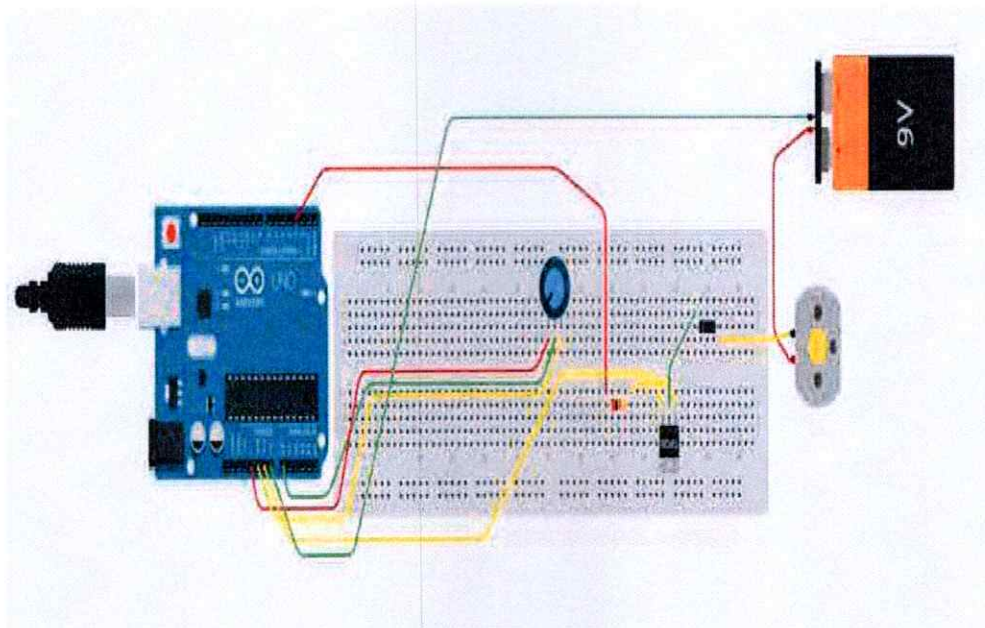


Figura 27: Código
Fuente: Autores

VII-HI. Integración de componentes: Una vez ya esté finalizada la estructura del exoesqueleto se procede la integración de los actuadores lineales. Estos se los instaló en la zona de los brazos de manera que puedan proporcionar la fuerza necesaria en las partes móviles del exoesqueleto. La estructura ha sido diseñada y mecanizada para que los actuadores sean instalados de manera fácil y no presenten ninguna novedad. En un compartimiento en la parte frontal del exoesqueleto se ubicó un protoboard, en el cual se encuentran conectados el Arduino, el driver, y el sensor EMG. Esto no estará a la vista por fines de estética.

VIII. RESULTADOS

Se obtuvo como resultado que la estructura de acero soportó cargas de hasta sin deformaciones ni fallos estructurales. Asimismo, podemos decir que el diseño de la estructura proporcionó un ajuste cómodo para el usuario, con un mínimo de puntos de presión y una buena distribución del peso.

De igual manera, se evidenció que la comunicación entre el Arduino y el driver de los actuadores fue estable y libre de errores al igual que el driver proporcionó un control adecuado sobre los actuadores, sin sobrecalentamiento ni fallos con eficiencia.

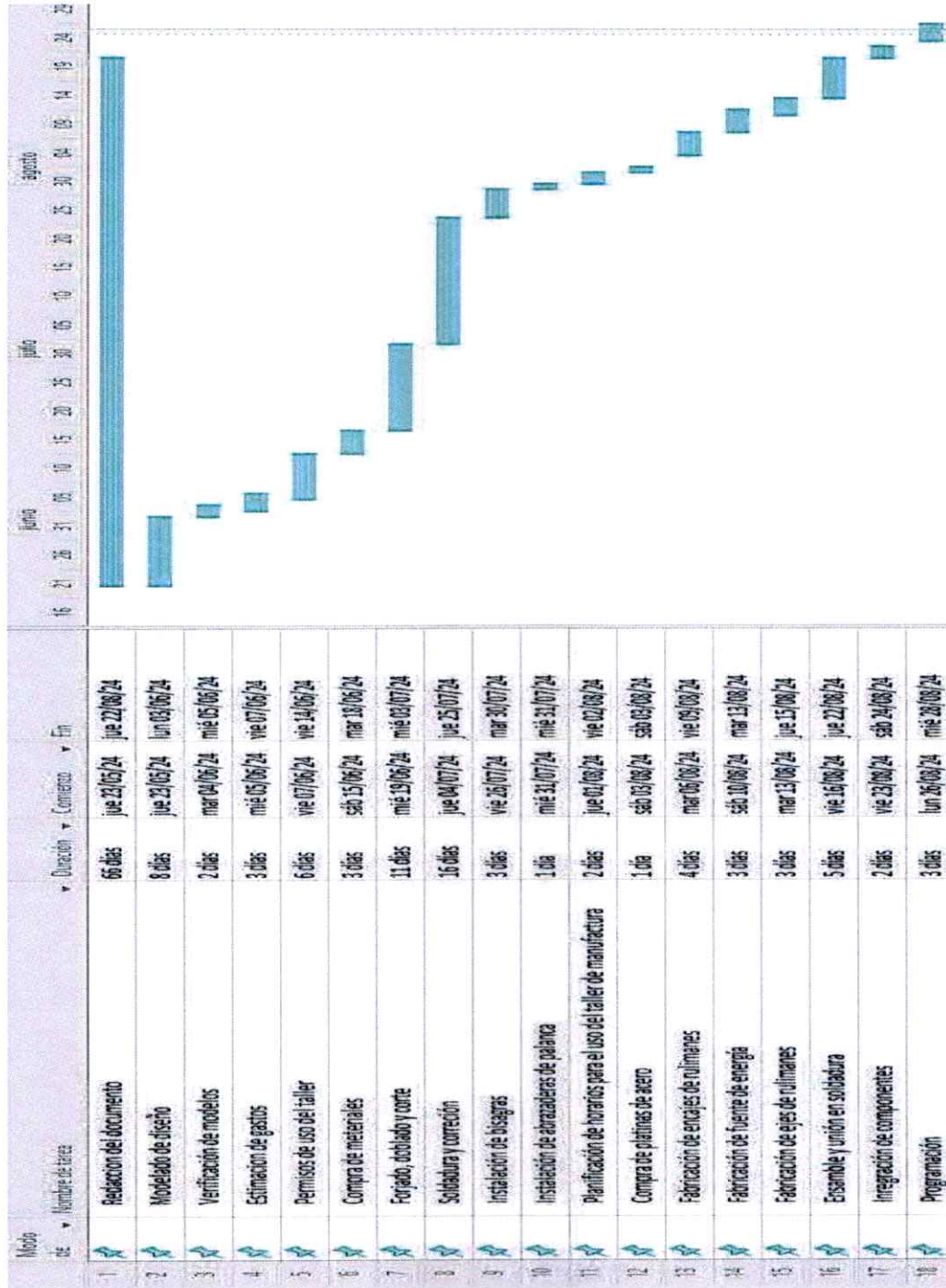
Los resultados obtenidos indican que los componentes electrónicos del exoesqueleto optimizador de fuerza funcionan de manera efectiva y cumplen con las especificaciones del diseño. Los actuadores lineales, el Arduino, el driver y la fuente de energía se integran adecuadamente para proporcionar un rendimiento fiable.

IX. CRONOGRAMA

Haciendo uso de el cronograma nos aseguramos que el proyecto se desarrolle de manera organizada y eficiente. Este cronograma detalla las principales etapas y actividades que se realizarán a lo largo de este trabajo de titulación, estableciendo plazos y responsabilidades claras a cumplir.

Tabla VI: Cronograma para la implementación del trabajo de titulación.

Fuente: Autores



X. PRESUPUESTO

Se realizó una tabla con los precios que se consultaron en diferentes puntos de ventas, creando así un presupuesto estimado de cuanto se gastará en la implementación de este trabajo de titulación.

Tabla VII: Presupuesto para la implementación del trabajo de titulación

Fuente: Autores

Ítem	Artículo	P. Unitario USD	Cantidad	P. Total USD
1	Platina de acero	\$17.00	1	\$17.00
2	Actuador lineal eléctrico	\$100.00	1	\$100.00
3	Rulíman	\$3.25	4	\$26.00
4	Arduino	\$15.00	1	\$15.00
5	Rótulas	\$15.00	4	\$60.00
6	Driver L298N	\$6.50	1	\$6.50
7	Abrazadera de palanca	\$6.00	2	\$12.00
TOTAL				\$236.50

XI. CONCLUSIONES

Se llegó a la conclusión de que el exoesqueleto posee un gran potencial para diversas aplicaciones en distintas áreas tales como la industrial, al igual que en el área de la rehabilitación. Esta tecnología puede ser adaptada para una amplia diversidad de necesidades en las cuales encontramos el soporte en actividades repetitivas y pesadas. Asimismo, podemos mencionar la mejora de calidad de vida para personas con debilidad muscular.

XII. RECOMENDACIONES

Se recomienda la optimización de los materiales utilizados en la estructura del exoesqueleto. Aunque las platinas de acero proporcionan robustez y durabilidad, es una buena opción la exploración de materiales más ligeros, como aleaciones de aluminio o compuestos, podría reducir el peso total del dispositivo, mejorando la comodidad del usuario y permitiendo movimientos más ágiles sin comprometer la resistencia.

Asimismo, es recomendable aprovechar lo máximo posible el tiempo que se tiene para la implementación y así evitar retrasos y asegurar que el proyecto se complete a tiempo.

También se recomendaría la exploración de microcontroladores más avanzados o sistemas embebidos con capacidades superiores, lo que permitiría una programación más eficiente y una mayor capacidad de procesamiento.

REFERENCIAS

- [1] O. I. del Trabajo, *Investigación de accidentes del trabajo y enfermedades profesionales*. OIT Ginebra, 2015.
- [2] S. Arce-García, *La Prevención de Riesgos Laborales y la accidentalidad laboral en la prensa española: representación y cobertura a partir de la Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales (1994-2014)*. 2017.
- [3] R Gómez-Campos, M. Cossio-Bolaños, M. B. Minaya y R. Hochmuller-Fogaca, «Mecanismos implicados en la fatiga aguda,» *Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y del Deporte/International Journal of Medicine and Science of Physical Activity and Sport*, vol. 10, n.º 40, págs. 537-555, 2010.
- [4] J. E. M. Quinchanequa, «La fatiga, tipos causas y efectos,» *Revista Digital: Actividad Física y Deporte*, vol. 3, n.º 2, 2017.
- [5] V. Fit. «Anatomía de los Músculos que Llevan a Cabo un Press de Banca.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://vida-fit.com/anatomia-de-los-musculos-que-llevan-a-cabo-un-press-de-banca/>.
- [6] J.-H. Park y S. Jung, «Form-Finding to Fabrication: A Parametric Shell Structure Fabricated Using an Industrial Robotic Arm with a Hot-Wire End-Effector,» *Nexus Network Journal*, vol. 25, n.º 4, págs. 829-848, 2023.
- [7] B. Kayani, S. Konan, J. Tahmassebi, S. Oussedik, P. D. Moriarty y F. S. Haddad, «A prospective double-blinded randomised control trial comparing robotic arm-assisted functionally aligned total knee arthroplasty versus robotic arm-assisted mechanically aligned total knee arthroplasty,» *Trials*, vol. 21, págs. 1-10, 2020.
- [8] L. Dunai, I. Lengua, G. Peris Fajarnes y B. Defez Garcia, «Diseño de un exoesqueleto de extremidades inferiores,» *DYNA: Ingeniería e Industria*, vol. 94, n.º 3, págs. 297-303, 2019.
- [9] T. Fabricator. «Los Exoesqueletos.» Accedido: 2024-08-12. (2019), dirección: <https://www.thefabricator.com/thefabricatorespanol/article/safety/los-exoesqueletos>.
- [10] CINVESTAV. «Diseñan Exoesqueleto para Codo que Aumenta la Fuerza y Capacidad de Carga del Usuario.» Accedido: 2024-08-12. (2021), dirección: <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/dise241an-exoesquelto-para-codo-que-aumenta-la-fuerza-y-capacidad-de-carga-del-usuario>.
- [11] M Nordin, «Basic biomechanics of the musculoskeletal system,» *Lippincott Williams & Wilkins google schola*, vol. 2, págs. 267-275, 2001.
- [12] O. A. Gaheen, E. Benini, M. A. Khalifa y M. A. Aziz, «Pneumatic cylinder speed and force control using controlled pulsating flow,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 35, pág. 101 213, 2022.
- [13] L. J. V. Luna, «Sistemas Embebidos en el IoT,» *Especialidad en Sistemas Embebidos, Trabajo de obtención de grado, ITESO, Tlaquepaque, Jalisco*, 2021.
- [14] J. M. Castellano Sánchez, «Diseño mecánico estructural de un exoesqueleto pasivo para extremidades inferiores,» 2021.
- [15] J. F. Gieras, *Permanent magnet motor technology: design and applications*. CRC press, 2009.
- [16] A. Barrientos et al., «Fundamentos de robótica,» 2007.
- [17] RoboticsEC. «Actuador Lineal Eléctrico 12VDC, Carrera 500mm, Velocidad 7mm/s, Carga 1000N.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://roboticsec.com/producto/actuador-lineal-electrico-12vdc-carrera-500mm-velocidad-7mm-s-carga-1000n/>.
- [18] M. Banzi y M. Shiloh, *Getting started with Arduino*. Maker Media, Inc., 2022.
- [19] Xataka. «Qué es Arduino, cómo funciona y qué puedes hacer con uno.» Accedido: 2024-08-12. (2022), dirección: <https://www.xataka.com/basics/que-arduino-como-funciona-que-puedes-hacer-uno>.
- [20] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, *Fundamentals of materials science and engineering*. Wiley London, 2000, vol. 471660817.
- [21] Inomet. «Platinas de Acero Inoxidable.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://www.inomet.com.pe/productos/platinas-de-acero-inoxidable/>.
- [22] Centriacero. «Aceros Inoxidables.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://www.centriacero.com.ar/aceros-inoxidables--news--14-1023>.

- [23] M. F. Ashby y D. R. Jones, *Engineering materials 1: an introduction to properties, applications and design*. Elsevier, 2012, vol. 1.
- [24] TME. «Pololu Muscle Sensor v3.» Accessed: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://www.tme.eu/es/details/pololu-2726/otros-sensores/pololu/muscle-sensor-v3/>.
- [25] D. de Rulimanes. «RULIMANES NSK01.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://distribuidoraderulimanes.com/portfolio/nsk01/>.
- [26] D. Nayak. «Autodesk Inventor: Empowering Engineering Students to Innovate.» Accedido: 2024-08-12. (2023), dirección: <https://www.linkedin.com/pulse/autodesk-inventor-empowering-engineering-students-innovate-nayak>.
- [27] A. Inc., *Autodesk Inventor 2021: User's Guide*. Autodesk, 2020.
- [28] B. M. MAPFRE. «Rótula Axial de Dirección: Funciones y Averías.» Accedido: 2024-08-12. (2023), dirección: <https://www.motor.mapfre.es/consejos-practicos/consejos-de-mantenimiento/rotula-axial-de-direccion-funciones-y-averias/>.
- [29] H. Heisler, *Advanced vehicle technology*. Elsevier, 2002.
- [30] D. M. y Herramientas. «Soldadura por Arco.» Accedido: 2024-08-12. (2011), dirección: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-por-arco>.
- [31] Disensa. «Soldadura Indura E-7018 AR 1/8 - Electrodos Indura.» Accedido: 2024-08-12. (2024), dirección: <https://disensa.com.ec/producto/soldadura-indura-e-7018-ar-1-8-electrodos-indura/>.
- [32] L. F. Jeffus, H. V. Johnson y A. Lesnewich, *Welding: principles and applications*. Delmar Publishers New York, 1999.

ANEXO A
PLANOS

Planos de las piezas acotadas en inventor:

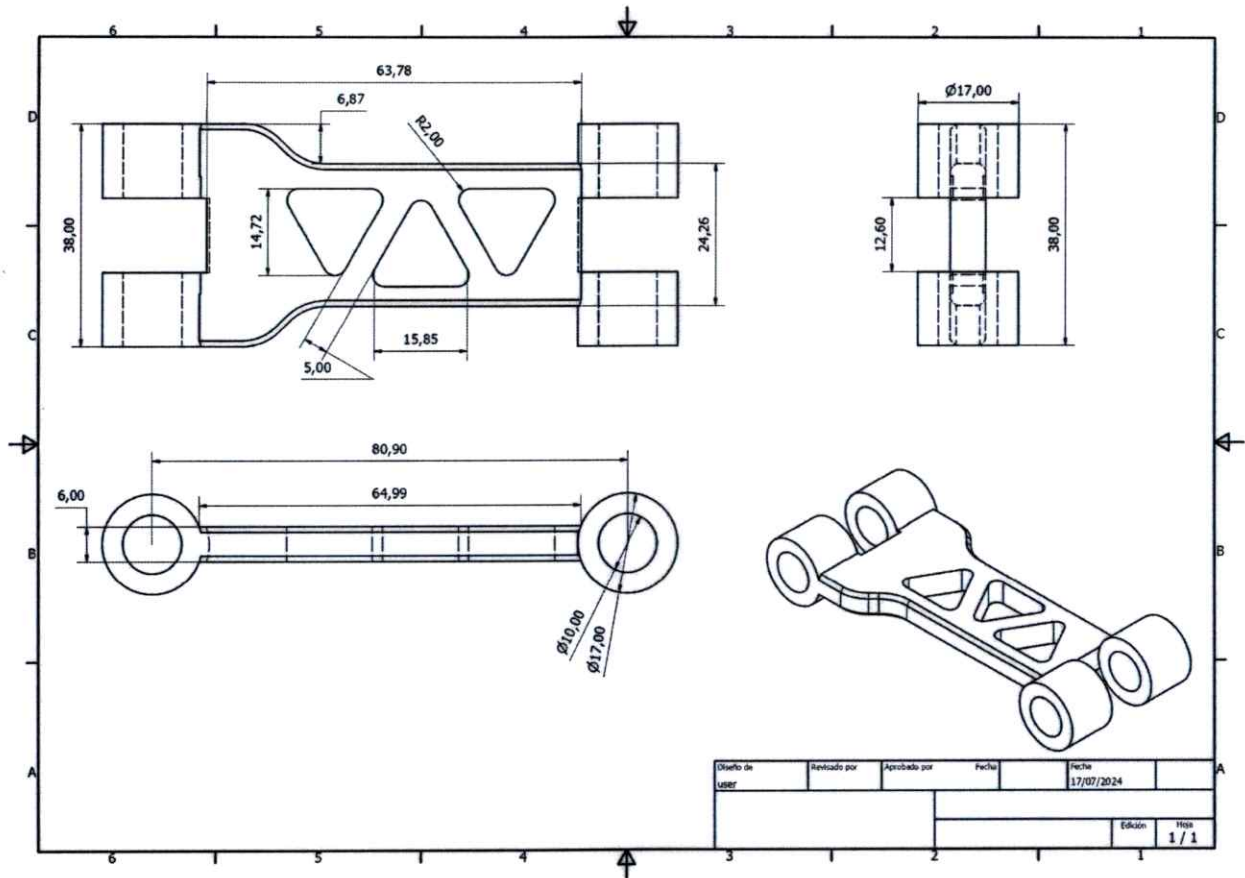


Figura 28: Lámina acotada

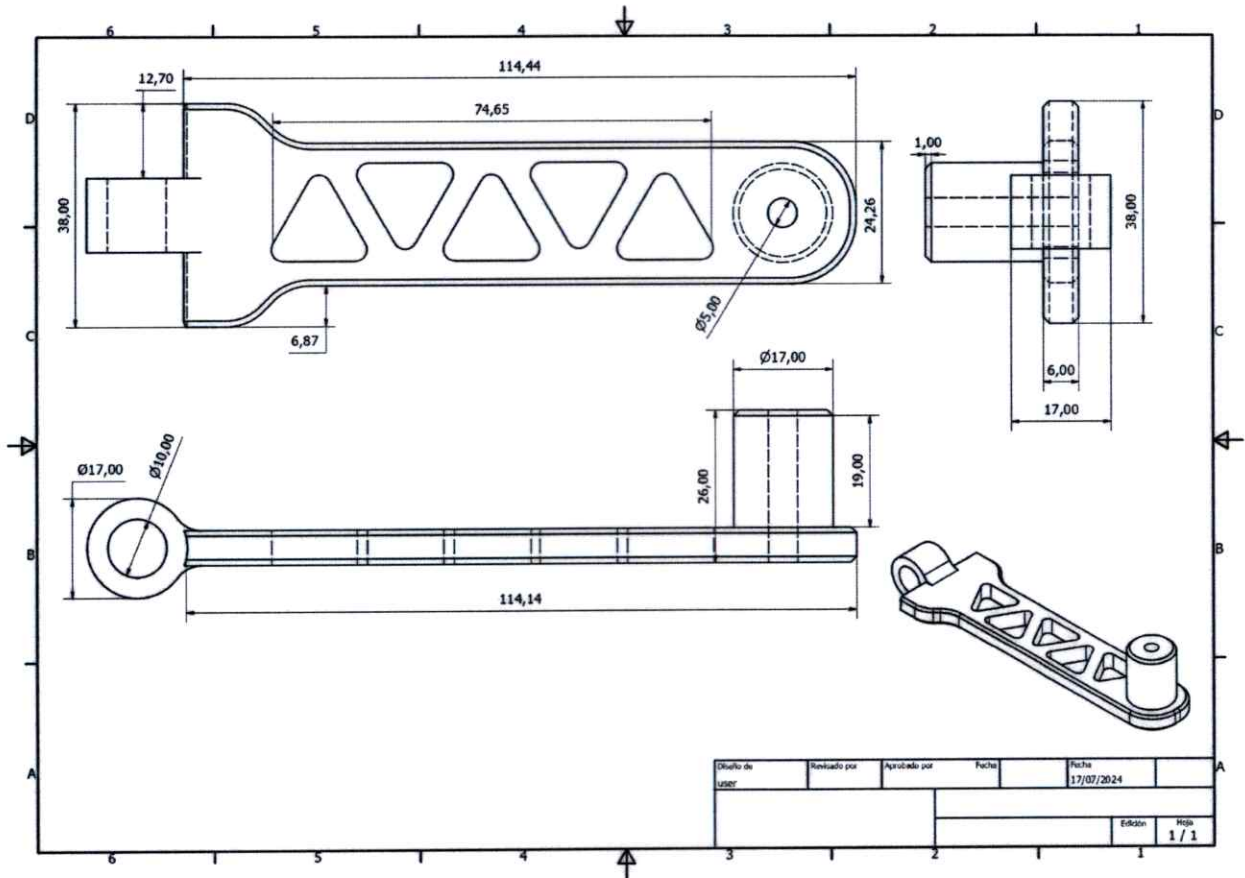


Figura 29: Lámina acotada

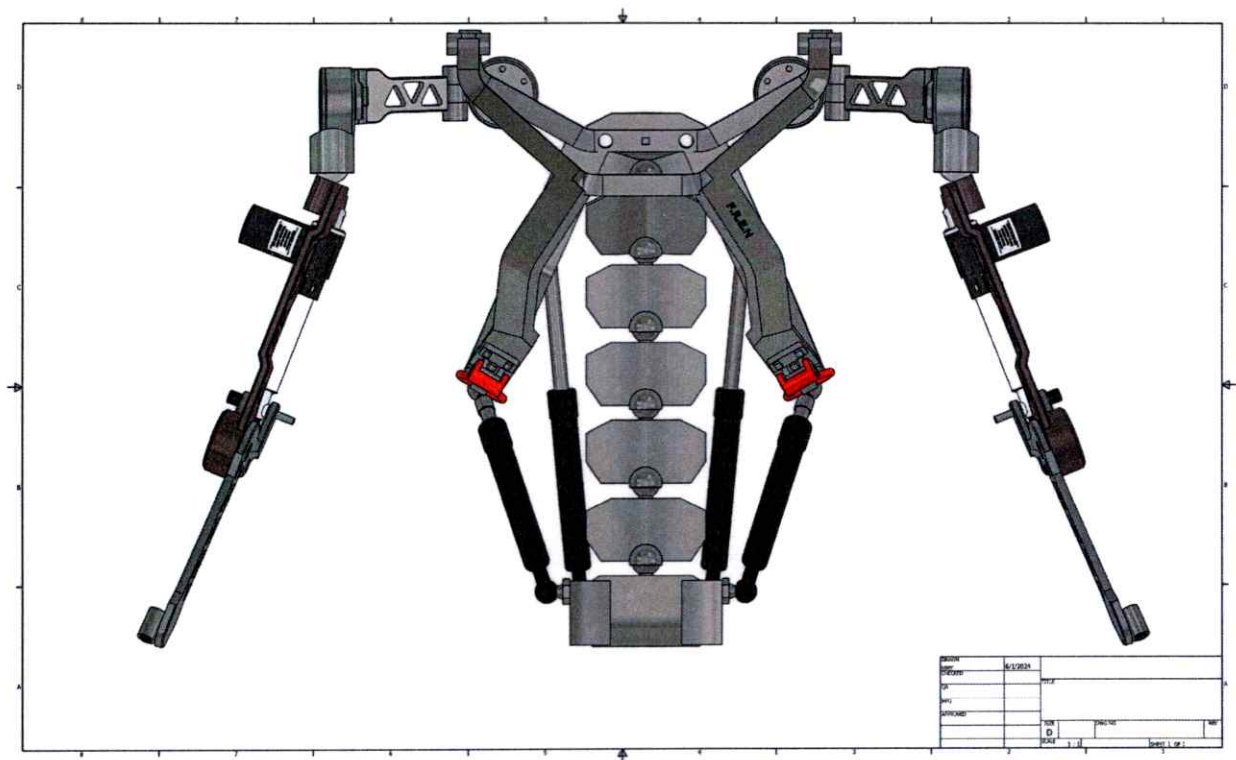


Figura 30: Diseño final del exoesqueleto

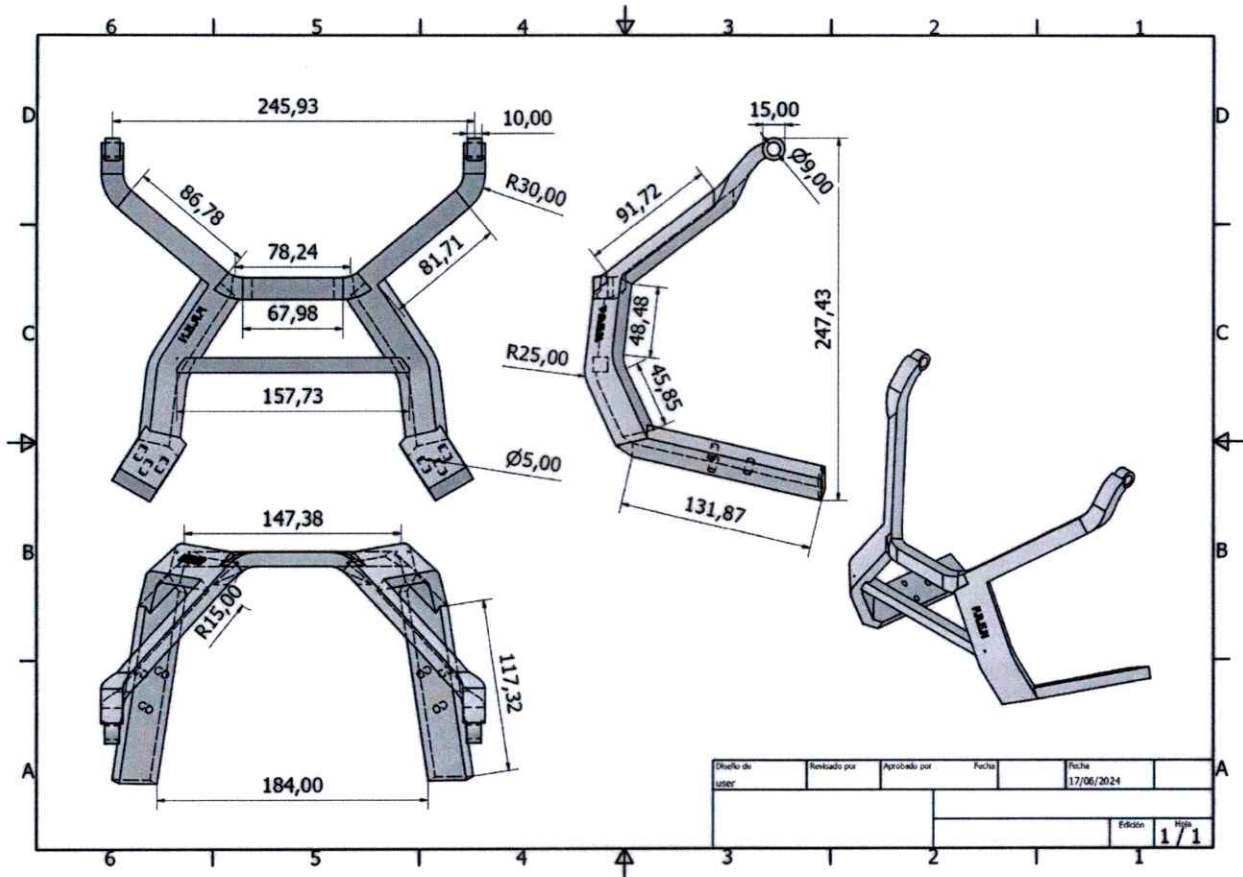


Figura 32: Lámina acotada de la estructura del pecho

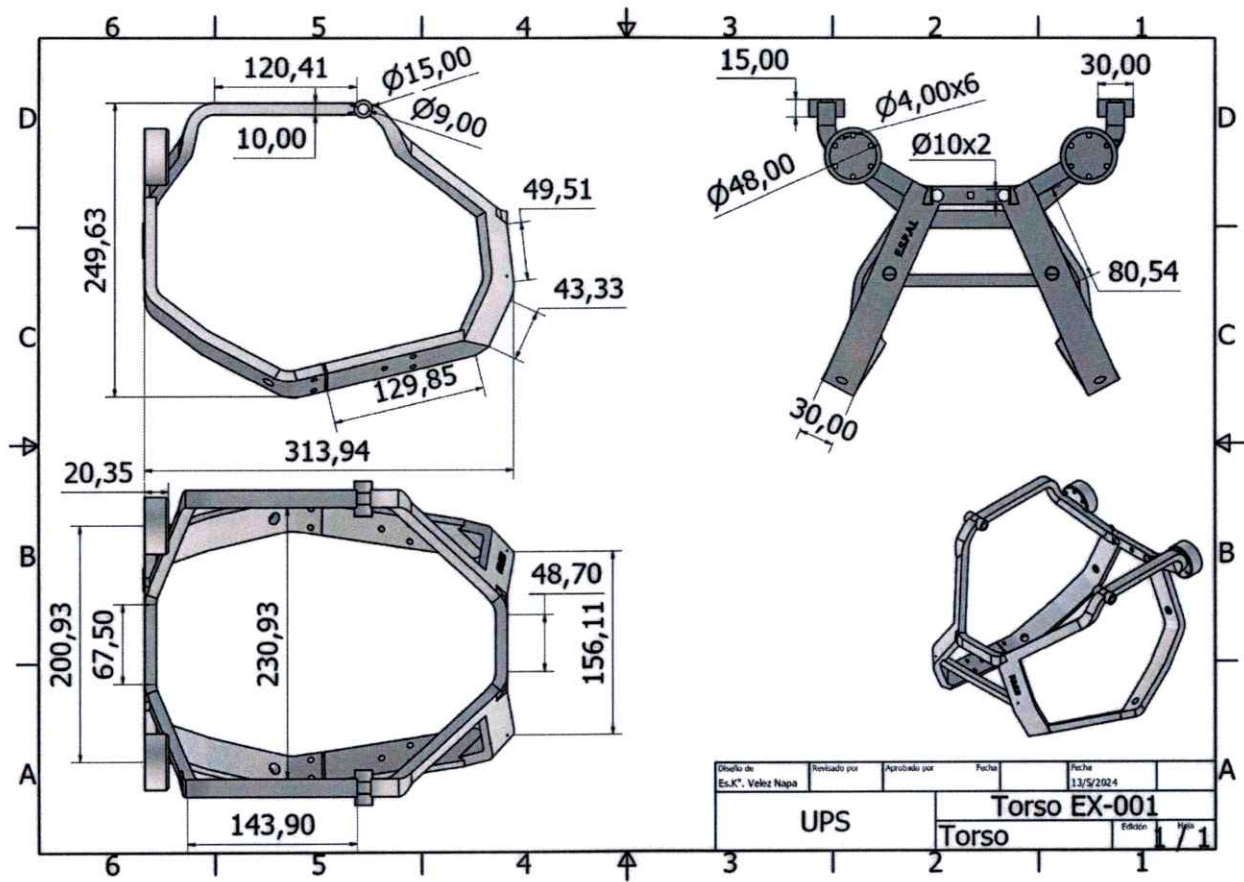


Figura 33: Lámina acotada

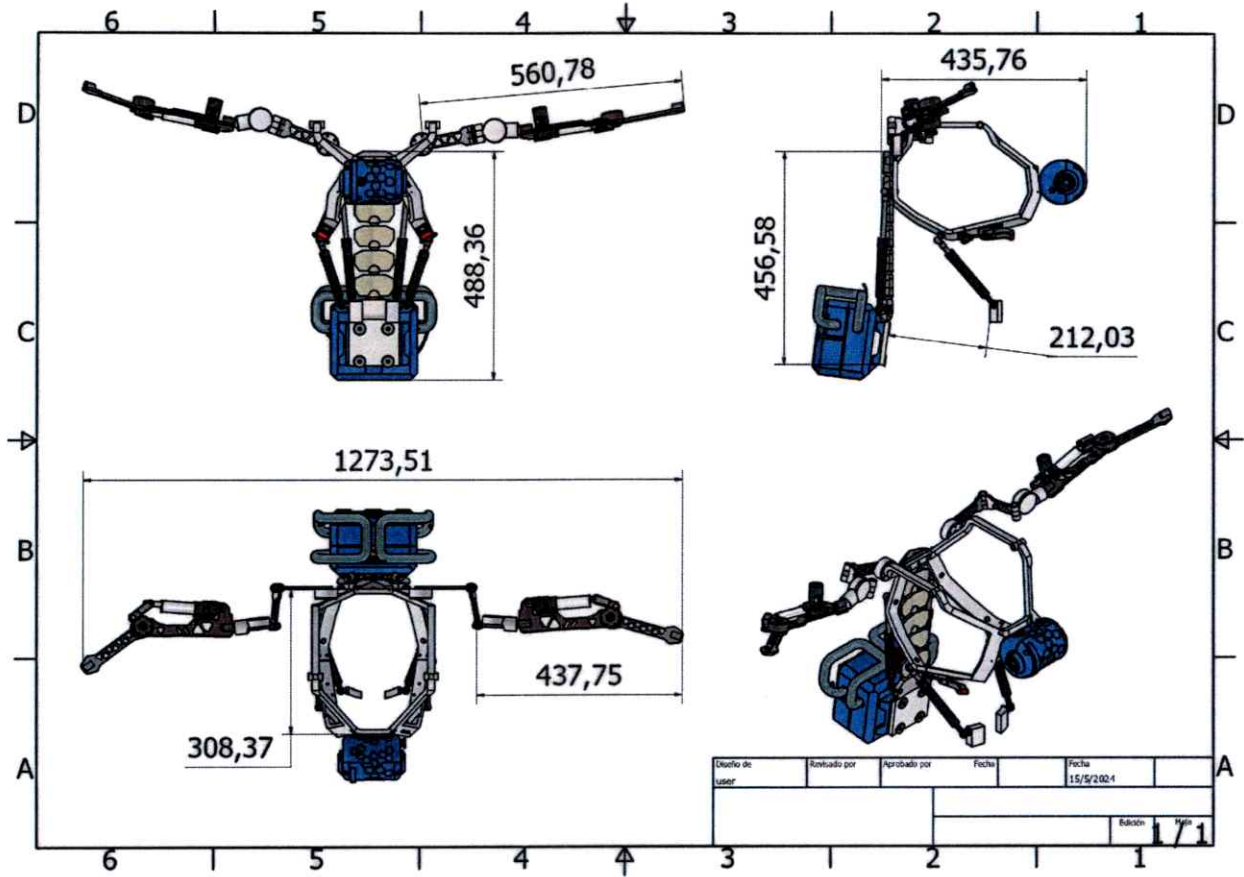


Figura 34: Lámina acotada del exoesqueleto a color

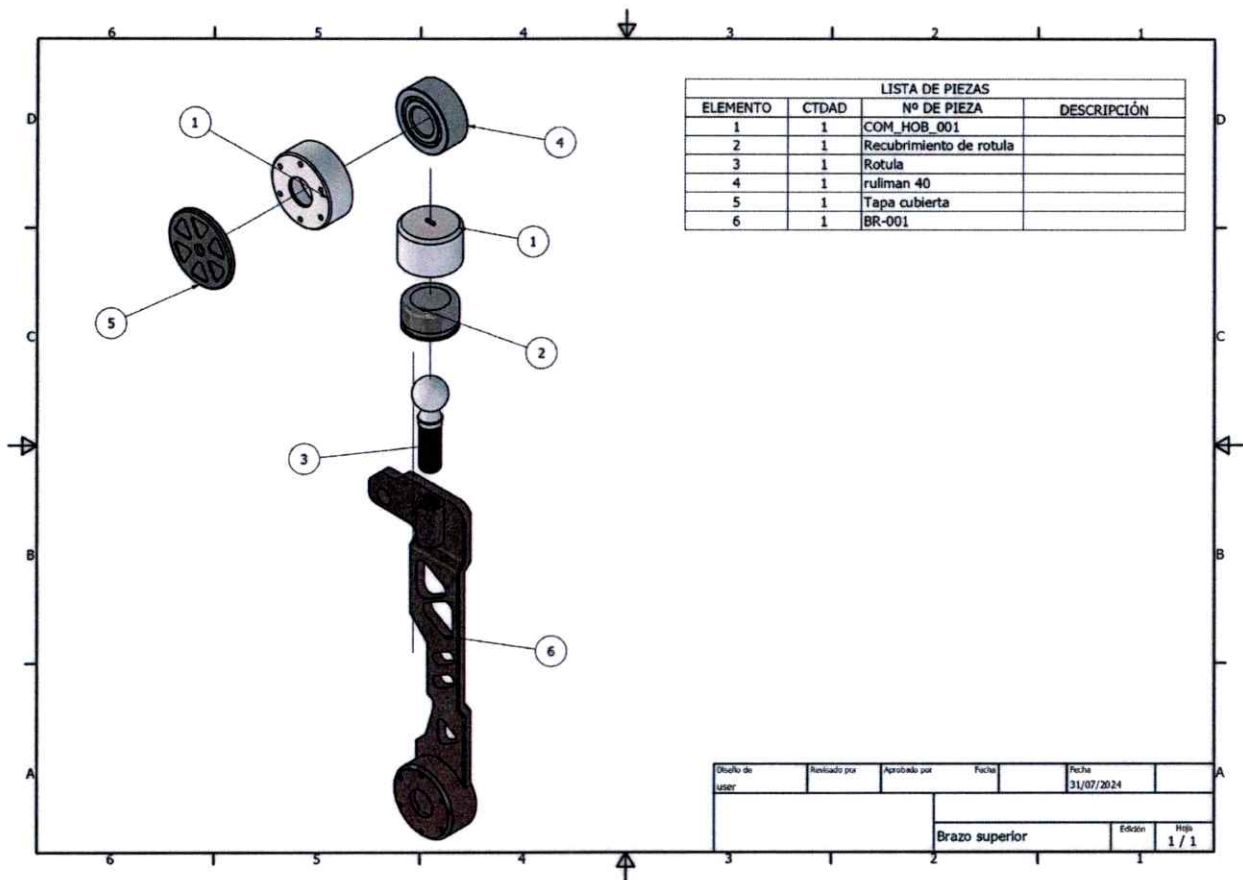


Figura 35: Piezas variadas a usar

ANEXO B
MECANIZADO Y ENSAMBLADO DE LA ESTRUCTURA



Figura 36: Estructura en proceso de mecanizado

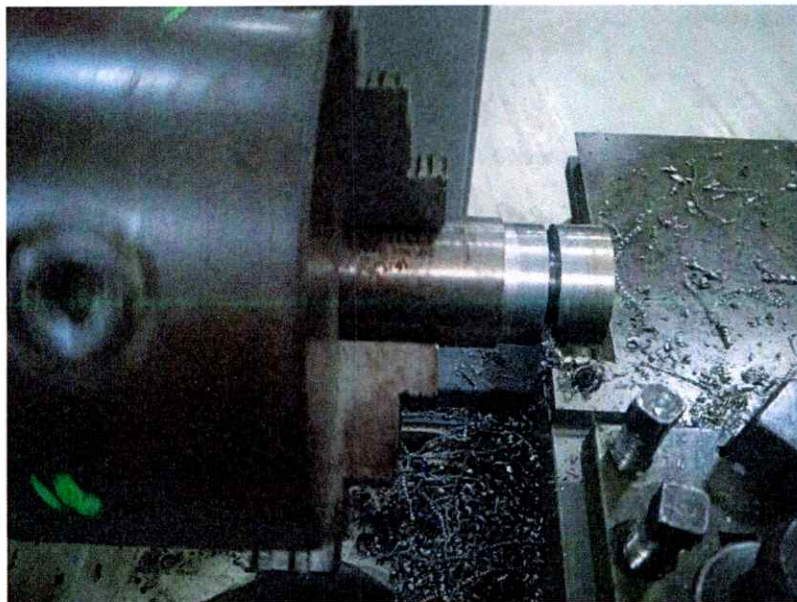


Figura 37: Torneado de una pieza



Figura 38: Colocación de abrazadera de palanca



Figura 39: Colocación de abrazadera de rulimanes



Figura 40: Estructura en proceso de ensamblaje



Figura 41: Estructura en proceso de ensamblaje



Figura 42: Estructura mecánica ensamblada



Figura 43: Estructura mecánica ensamblada

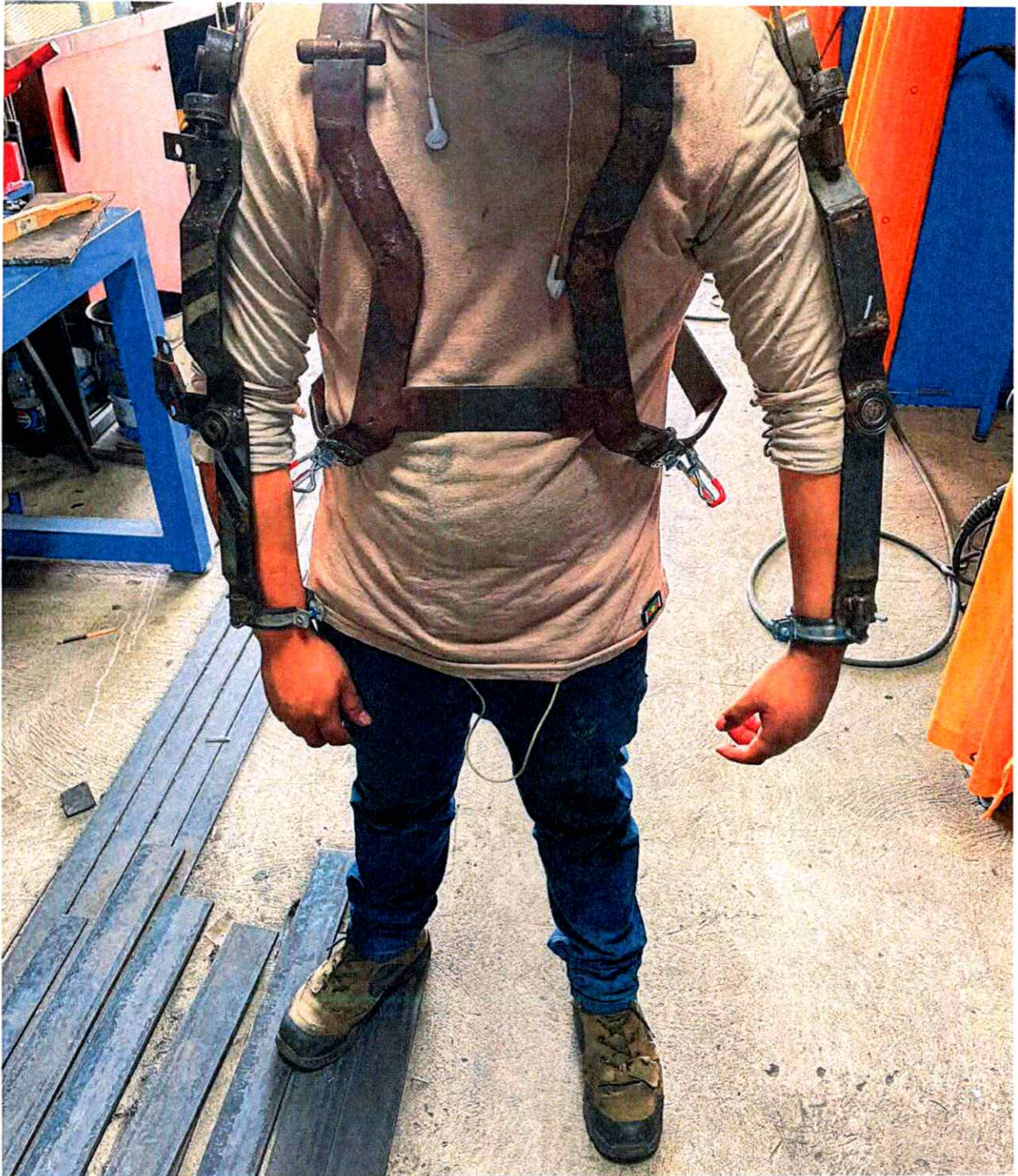


Figura 44: Usuario con la estructura mecánica



Figura 45: Usuario con la estructura mecánica



Figura 46: Prototipo del diseño propuesto